



CLIMASTER

Changement climatique dans le Grand Ouest ; quelles évolutions des systèmes agricoles et des ressources naturelles ?



Climat
Agriculture
Sols et eau
Perception
Scénarios

- Se saisir de la question climatique au niveau régional en mobilisant chercheurs et acteurs du territoire pour analyser l'évolution du climat, son impact, sa perception, et la capacité d'adaptation des systèmes naturels et humains.
- Anticiper les évolutions à venir et les conséquences des changements climatiques, en termes de gestion et de pratiques relatives aux activités agricoles et à la gestion des ressources naturelles.
- La réalité du changement dans le Grand Ouest est observée sur toutes les variables climatique (types de temps, pluie, température, réserve en eau des sols...) avec de forts gradients géographiques. La vulnérabilité du Grand Ouest présente une forte hétérogénéité liée aux conditions très locales. Les agriculteurs du Grand Ouest témoignent d'une bonne capacité d'adaptation, qu'elle soit autonome ou liée à la confiance dans les structures d'appui technique.

Problématique

- Quels changements climatiques dans le Grand Ouest, observés à partir des longues séries climatiques (depuis 1850)? Quelle influence de ces changements et de cette variabilité sur l'intensité et la fréquence des sécheresses, des excès d'eau, des gelées? ... Quelle évolution des types de temps?
- Quels changements de pratiques agricoles et d'occupation du sol en lien avec le changement climatique observés à différentes échelles spatiales (de la télédétection à l'échelle de l'exploitation? Quelle perception de l'influence du changement climatique chez les agriculteurs? Quelle capacité d'adaptation?
- Quelles évolutions des ressources en eau et en sol sont observables ou prévisibles sous l'effet du changement climatique? Quels sont les indicateurs pertinents, concernant l'érosion des sols, le stockage de carbone dans les sols, le débit et la qualité des cours d'eau, l'extension des zones humides?

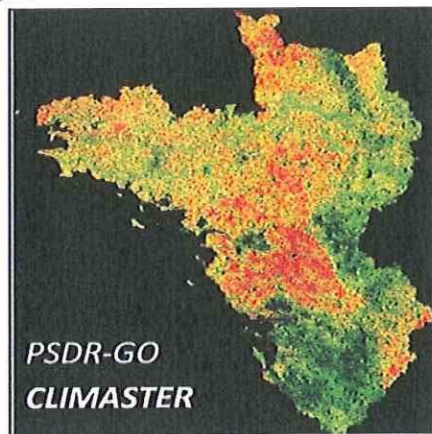


Image du capteur MODIS représentant la fraction de couverture du sol par la végétation -Mai 2010
(rouge /vert = peu /fortement couvert)

Référent Recherche Philippe MEROT, INRA
philippe.merot@rennes.inra.fr

Référents Acteurs Philippe DESNOS, TRAME
p.desnos@trame.org
Jean-Pierre Arrondeau, IAV
jean-pierre.arrondeau@lavilaine.com

Laboratoires

- UMR SAS, et UMR ESE, INRA-Agrocampus Rennes
- UMT Vinitera, UE 1117, INRA, et LEVA, ESA, Angers
- Géoscience Rennes, CNRS, Univ. Rennes 1
- Geophen, LEGT, UMR 6554, Caen
- COSTEL, LEGT, UMR 6554, Rennes
- SAD-Paysage, INRA, Rennes
- CRPCC, UBO, Brest
- AScA, Paris

Partenaires

- Centre d'Etude pour un Développement Agricole Plus Autonome (CEDAPA)
- Syndicat des producteurs de Saumur Champigny
- Institut d'Aménagement de la Vilaine
- Forum des Marais Atlantiques
- Syndicat du BV du Scorff
- Conseil Général 14
- CRA Normandie
- CRA Bretagne
- TRAME

Contribution au développement régional

- Ce projet vise à mettre à la disposition des acteurs territoriaux un ensemble de connaissances au niveau régional sur le changement climatique, son ampleur actuelle et future, ses conséquences sur les variables d'intérêt pour le secteur agricole et les gestionnaires de la ressource en eau et en sols.
- Il vise à évaluer la perception de ces changements par ces acteurs, et leur sensibilité et leur capacité à les prendre en compte dans l'élaboration de leurs stratégies.
- Par son existence même et par certains outils développés, il a permis de sensibiliser tant les chercheurs que les acteurs à cet enjeu ; il a augmenté la capacité collective des chercheurs à répondre à cette question posée au niveau régional par les responsables territoriaux;
- Il a, pour la première fois dans le GO, évalué la capacité des acteurs agricoles à l'adaptation au changement climatique.
- Il propose des méthodes d'analyse de la vulnérabilité des territoires (sols, eau, territoires agricoles) au changement climatique, et des scénarios qui pourront être pris en compte dans l'aménagement et la gestion des territoires.
- Il alimente les différentes politiques publiques territoriales prenant en compte le changement climatique et notamment les plans climat territoriaux.

CLIMASTER

Connaissance et sensibilisation au changement climatique

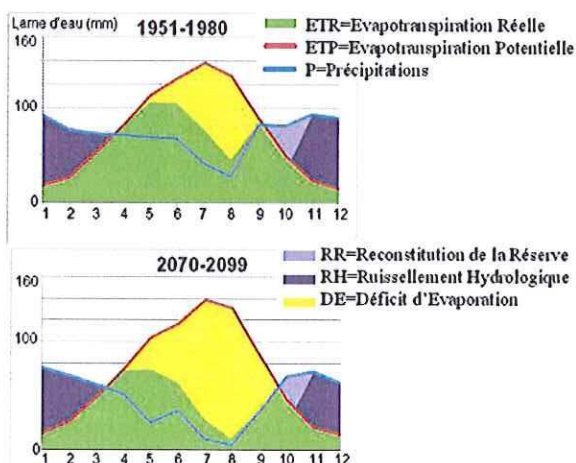
Les méthodes utilisées visent à :

- élaborer et mettre à disposition un corpus de connaissance sur le changement climatique et son impact dans le Grand Ouest
- analyser la sensibilisation, la perception et la capacité d'adaptation des acteurs au changement climatique

• Analyse des changements passés

Analyse des séries chronologiques passées : climat (longues séries, pluie, température, évapotranspiration, type de temps, sécheresse), ressource en eau, qualité des eaux (sur l'Observatoire de Recherche en Environnement ORE AgrHyS, série décennale de haute fréquence).

- Analyse spatiale de l'évolution passée des couverts végétaux par télédétection sur le GO.



Bilan de l'eau : L'étude des différents termes du bilan de l'eau incluant la réserve en eau des sols montre la tendance à la sécheresse

Les terrains d'étude

CLIMASTER s'est appuyé

- sur les observatoires long terme de Recherche sur l'environnement de l'INRA et de l'OSU (Observatoire des sciences de l'Univers) de Rennes, outils indispensables aux suivis des changements globaux :

- L'ORE AgrHyS sur les AgrohydroSystèmes
- L'ORE Petit Fleuve côtier
- La Zone Atelier Armorique

- sur l'observatoire du bassin de la Seulles en Basse-Normandie

- sur des groupes techniques d'agriculteurs déjà constitués et mobilisés par les partenaires du projet
- sur des panels enquêtés (agriculteurs, acteurs de l'eau)

• Analyse des changements futurs

- Le choix s'est porté sur les chroniques climatiques simulées d'après la projection issue du scénario A1b et régionalisée par AGROCLIM, INRA (méthode ARPEGE) sur la période 1960-2100

- Analyse des chroniques climatiques sur des variables pertinentes pour les acteurs.

- Analyse spatiale de l'évolution future de la vulnérabilité des sols par simulation

- Utilisation d'une série de modèles dynamiques (réserve en eau des sols, débit, qualité des eaux, stock de carbone dans les sols, extension des zones humides) pour anticiper l'évolution de ces variables sous l'effet des chroniques climatiques simulées pour différents sites du Grand Ouest.

• Analyse de la capacité d'adaptation des acteurs agricoles

- Différentes méthodes issues de la sociologie, de la psychologie sociale et de l'analyse stratégique (enquêtes, séminaires participatifs, réunion-débats...)

- Co-construction d'une méthode de conduite de réunion pour l'échange et la sensibilisation des acteurs agricoles au thème du changement climatique

- Construction de scénarios agronomiques



Réunion CLIMASTER avec des agriculteurs en Poitou-Charentes : Analyse de la prise en compte du changement climatique dans les exploitations



Bassin versant du Coët Dan à Kervidy, ORE AgrHyS (Réseau RBV). Aout 2011

Ce site est une référence long terme pour les études sur la relation agriculture-environnement dans l'Ouest

Les résultats

1- Le climat a déjà changé !

Au cours du XX^{ème} siècle, on constate que le réchauffement climatique s'est accompagné, dans les régions de l'ouest de la France, d'étés non seulement plus chauds, mais aussi plus fréquemment marqués par la sécheresse. Certains changements dans la fréquence d'apparition et les impacts de certains types de circulations depuis le milieu du XIX^{ème} siècle appuient quelques-unes des interrogations envisagées pour l'évolution à venir du climat (circulations pluvieuses d'hiver, circulations favorables aux températures élevées en été).

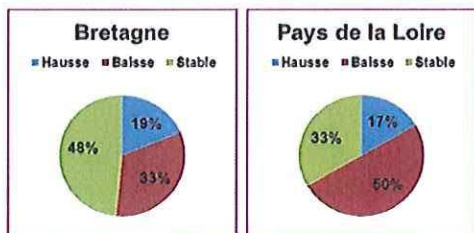
L'application aux régions de l'Ouest des scénarios climatiques pour le siècle en cours confirme ces craintes, en particulier l'aggravation des déficits hydriques liés à des étés à la fois plus chauds et moins arrosés. Les impacts de cette évolution climatique ne sont pas uniformes dans l'espace et certaines régions les subissent de façon plus atténuée ou accentuée (et rapide : par ex. le Val de Loire à Saumur) que d'autres. Les évolutions envisagées aux saisons intermédiaires sont plus complexes. Aussi, compte tenu de l'avancement des stades phénologiques, le risque de gel printanier demeure-t-il un problème pour les cultures délicates.

2- Changement climatique et conduite des surfaces fourragères: moins de contraintes en systèmes laitiers ?

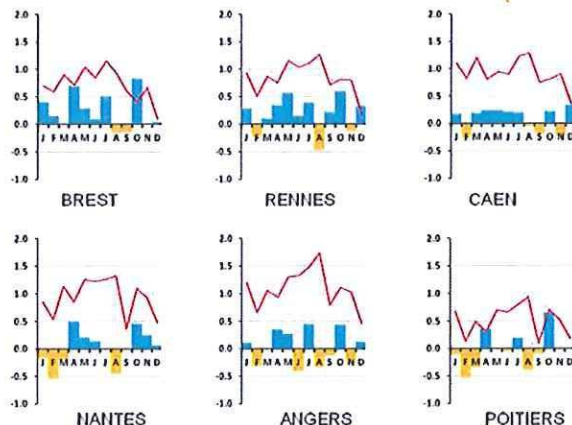
L'impact du changement climatique sur l'organisation du travail au sein d'exploitations laitières a été étudié à l'horizon 2030-2060. Pour le cas de sols limoneux sains du nord de l'Ille-et-Vilaine nous avons montré que pour les cultures fourragères :

- Les conditions d'implantation pour semer le maïs simulées avec le modèle Jdispo d'Arvalis devraient s'améliorer : plus 10 jours disponibles simulés sur la période 2030-60 par rapport aux 30 années passées. Les conditions d'intervention pour la récolte devraient peu changer.
- De même, on observerait une augmentation du nombre de jours favorables pour une récolte de foin entre le 15/05 et le 31/08.

Cependant d'autres études montrent que les conditions plus sèches auront des répercussions négatives sur les rendements des prairies et du maïs. Donc oui, il y aura probablement plus de souplesse pour la conduite des surfaces fourragères, mais ces résultats sont à mettre en regard des autres impacts du changement climatique sur l'agriculture et aussi en regard de l'évolution des structures des exploitations, en particulier l'augmentation de la charge en travail.



Evolution des teneurs en matière organique des eaux entre 1986 et 2009 (données: ARS Bretagne et Pays de la Loire). Les conditions locales (type de sol), pourraient expliquer la diversité des évolutions



Evolution des températures moyennes mensuelles (en rouge et en °C.) et précipitations moyennes mensuelles (en bleu/jaune et en mm/jour) : différences entre les normales 1951-1980 et les normales 1981-2010.

3- Les ressources naturelles

Ressource en eau fragilisée et plus variable

La forte variabilité inter annuelle des débits des cours d'eau en régime océanique empêche d'observer un effet du changement climatique sur les chroniques passées de débit.

La simulation des débits à l'aide de modèles hydrologiques adaptés au contexte du Grand Ouest, a été réalisée jusqu'en 2100, en Bretagne et Pays de la Loire. En Bretagne la baisse des débits rapportée au passé récent est de l'ordre de 20 à 25% que l'on soit en futur proche ou en futur lointain. Elle est plus importante en Pays de la Loire et pourrait atteindre plus de 40% en futur lointain.

L'étiage s'accroît et se décale des mois de septembre octobre aux mois d'octobre-novembre, et la reprise des débits est plus lente. Les zones humides des têtes de bassins versant diminuent.

L'incertitude sur ces estimations n'a pas été évaluée. Ces premiers résultats sont cependant corroborés par les résultats obtenus sur d'autres bassins du Nord de la France (la Seine notamment).

Matière organique des eaux influencée par le climat dans certaines situations

La teneur en matière organique des eaux a évolué différemment selon les bassins versants. Les modèles montrent que l'épaisseur de la couche organique du sol joue un rôle important. Les simulations indiquent que les évolutions climatiques ne seraient susceptibles de modifier les teneurs en matière organique des eaux que dans certaines situations pédologiques, en particulier les sols profonds.

Les résultats

Ressource en sol, une érosion plus fréquente

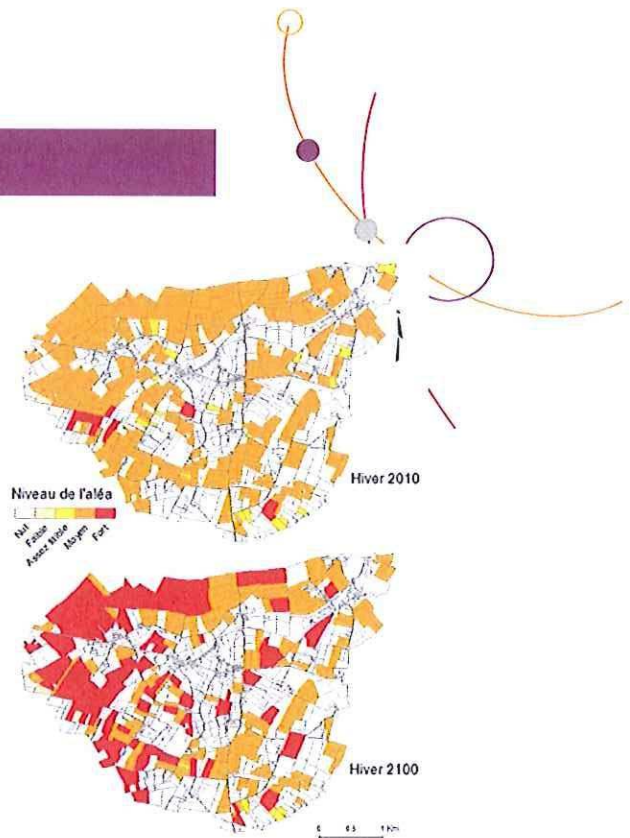
L'érosion hydrique est un risque bien identifié pour les sols à l'échelle de l'Europe. De nouveaux outils d'évaluation de l'aléa érosion des sols à l'échelle départementale et régionale ont été développés. Ils permettent d'estimer la sensibilité actuelle et future à l'aléa érosion des espaces agricoles du Grand Ouest.

Les simulations montrent que la pression érosive sur les sols cultivés d'une année moyenne à l'horizon 2100 est celle d'une année dont la fréquence actuelle est d'une fois tous les 4 ans. L'érosion pourrait donc être plus fréquente, et plus importante. L'importance de l'interaction avec l'occupation du sol, les itinéraires techniques incitent à une analyse partant de l'échelle de la parcelle.

4- S'interroger sur le changement climatique? La perception des acteurs

Les différentes modalités de concertation sur le changement climatique avec les agriculteurs ont montré leur ouverture à cette question pour peu 1) que l'on mette au centre de la réflexion un système agricole de référence dans lequel ils se reconnaissent ; 2) que l'on positionne la réflexion par rapport à des évolutions ou accidents climatiques vécus, hors d'un débat sur les causes de ce changement. Les agriculteurs ont montré une confiance dans les capacités d'adaptation autonome, et dans les solutions liées à la propre dynamique des filières, voire une opportunité à saisir en termes de marché. Des ruptures (changements de systèmes) sont peu ou pas évoquées.

Le questionnement des acteurs de l'eau sur le changement climatique apparaît de son côté plus lointain, fortement dominé par un gradient Nord-Sud.



Evolution de l'aléa érosion en hiver à l'horizon 2100. Simulation à l'échelle parcellaire à partir du modèle SCALES (Scénario A1B du GIEC, bassin de Lingèvres, Calvados)

Le positionnement est marqué par les problématiques locales de l'eau. La prégnance de problèmes immédiats de la qualité de l'eau dans les régions Bretagne, Pays de la Loire et Normandie, qui s'oppose à l'incertitude des évolutions à venir, rend difficile l'appropriation, voire la perception de questionnements à plus long terme.

Pour aller plus loin...

- Merot Ph., D. Delahaye, V. Dubreuil, Ph. Desnos, 2012. Le climat change dans le Grand Ouest : évaluation, impacts, perceptions. À paraître aux PUR, Rennes
- Dubreuil V., Planchon O., Quénot H., Bonnardot V., 2010 : *Risques et changement climatique*. Volume d'actes du 23e colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC), Rennes, 1-3 septembre 2010, 694 p
- Gascuel-Odoux C., Aurousseau P., Durand P., Ruiz L., Molenat J., (2010) The role of climate on inter-annual variation in stream nitrate fluxes and concentrations. *Science of the Total Environment*, 408, 5657-5666. doi:10.1016/j.scitotenv.2009.05.003

Pour citer ce document :

Merot, Philippe (2011) CLIMASTER, *Changement climatique dans le Grand Ouest. Quelles évolutions dans les systèmes agricoles et les ressources naturelles?* Projet PSDR Grand Ouest, Serie Les 4 pages PSDR3

Pour et Sur le Développement Régional (PSDR), 2007-2011

Programme soutenu et financé par :

Plus d'informations sur le programme PSDR :

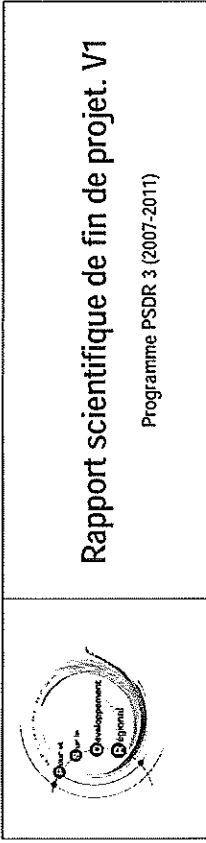
<http://www.psdrgo.org/>
<http://www.rennes.inra.fr/climaster/>

Contacts :

PSDR Région : Anne-Catherine CHASLES (INRA) – psdrgo@nantes.inra.fr
Direction Nationale PSDR : André TORRE (INRA)
andre.torre@agroparistech.fr
Animation Nationale PSDR : Frédéric WALLET (INRA)
frederic.wallet@agroparistech.fr

CLIMASTER





CLIMASTER
Régions concernées : Grand Ouest
Dates de début et de fin de projet : Décembre 2008 – Août 2011

Titre du projet
Changement climatique, systèmes agricoles, ressources naturelles et développement territorial

Responsable scientifique du projet			
Civilité (M, Mme, Mlle)	M	Titre	DR
Nom	MEROT	Prénom	Philippe
Adresse électronique	Philippe.merot@rennes.inra.fr		
Tél	02 23 48 54 36	Fax	...
Etablissement	INRA		
Unité	UMR Sol Agro et Hydrosystème, Spatialisation		
Département	Environnement et Agronomie		
N° d'unité	1069		
Directeur d'unité	Chantal Gascuel-Odoux		
Adresse	65 rue de saint Brieuc CS 84215		
Code postal	35 000	Ville	Rennes Cedex

Référént acteur du projet (le cas échéant)			
Civilité (M, Mme, Mlle)		Nom	Desnos
Prénom	Philippe	Fax	
Adresse électronique	p.desnos@trame.org		
Organisme	TRAME		
Responsable organisme			
Adresse			
Code postal		Ville	Rennes

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	m. Philippe Merot
Téléphone	02 23 48 54 36
Adresse électronique	Philippe.merot@rennes.inra.fr
Date de rédaction	Décembre 2011

Mots clés libres associés au projet (5 maximum)	
Français	Évolution, Vulnérabilité, adaptation, perception, prospective
Anglais	Change, vulnerability, adaptation, perception, prospective

Soutien total demandé au programme PSDR (en euros) : 447 500 €

Principaux laboratoires de recherche participants (Laboratoire 1 = porteur du projet)

Laboratoire n°	Nom du correspondant principal	Prénom	Titre ou grade	Adresse électronique	Discipline	Unité	Etablissement	Département de recherche
1	MEROT	Philippe	Directeur de recherche	Philippe.merot@rennes.inra.fr	Agro et agro-hydrologie	UMR 1213	INRA-Attractum Rennes	ESA
2	DELAHAYE	Daniel	Professeur	daniel.delahaye@rennes.inra.fr	Géographie	UMR 1055	Université de Caen	SIS
3	JOANNIN	Alexandre	Chargé de recherche	alexandre.joannin@rennes.inra.fr	Agronomie	SAD Paysage	INRA Rennes	SAD
4	HUBERT-MOY	Laurance	Professeur	Laurance.Hubert-Moy@rennes.inra.fr	Géographie, hydrologie	COCTEL	Université de Rennes 2	SIS
5	GRUAT	Gérard	Directeur de recherche	gerard.gruat@rennes.inra.fr	Agro-écologie	UMR 1055	Université de Rennes 1	Sauvages de la terre
6	PAUL	Guillaume	Maître de recherche	gpaule@rennes.inra.fr	Agro-écologie	LEVA	ESA, Angers	
7	BAQUINIERE	Jean-Luc	Directeur de recherche	jean-luc.baquinier@rennes.inra.fr	Agro-écologie	UMR 1055	INRA-Attractum Rennes	EPA
8	MICHEL-GUILLOU	Elisabeth	Maître de conférences	Elisabeth.Michel-Guilou@rennes.inra.fr	Agro-écologie, agro-économique, agro-sociologie	UMR 1055	Université de Bretagne occidentale, Brest	SIS
9	CORBIER	Mélanie	PR	Mélanie.Corbier@rennes.inra.fr	Agro-écologie	UMR 1055	Université de Rennes 1	
10	MURCY	Jérôme	Chercheur	jean-luc.murcy@rennes.inra.fr	Agro-écologie	UMR 1055	ASA, Paris	SAD
11	DARBAU	Gérard	PR	Gérard.darbau@rennes.inra.fr	Agro-écologie	UMR 1055	ASA, Paris	SAD

Note : L'équipe Agrodin (INRA Angers), non partenaire initial, a été fortement sollicitée pendant le projet climaster (contributions de Frédéric Huard).

* Un laboratoire peut être une unité ou une UMR.

PSDR 3 – CLIMASTER – Rapport scientifique de fin de projet

Acteurs et réseaux d'acteurs ³ collaborant au projet (acteur 1 = le référent acteur, le cas échéant)						
Acteur n°	Organisme	Sigle de l'organisme	Nom du correspondant principal	Fonction	Adresse électronique	Ville
1	TRAFIC rural, Etat des Groupements, études et de Dev. Afrique Centre et Sud pour un Développement Agricole	TRADEF-PROCEDA	DESROS	Ingénieur régional	a.desros@trafic.org	Rennes, 35042
2	Comité des SY	CEOMA	NICOLAS	Coordinateur	ced@trafic.org	Rennes, 35042
3	Comité des SY		BRIANT	Ingénieur	bric@trafic.org	Rennes, 35042
4	Institution Inter-États d'Aménagement de la Vallée (IETV)	IAY	ARNONDEAU	Directeur adjoint	arnondeau@trafic.org	Rennes, 35042
5	Chambres d'Agriculture de Bretagne	CRAU	CITEAU TROU	Ingénieurs et études	cit@trafic.org	Rennes, 35042
6	Groupe d'Études sur la Pollution des Eaux par les Matières Organiques Solides	GEPMO	PARAGET	Ingénieur Carie	paraget@trafic.org	Rennes, 35042
7	Syndicat du Bassin du Sillon		MOUINER	Responsable de la Gestion des Eaux	mo@trafic.org	Rennes, 35042
8	Chambres d'Agriculture 14	CA 14	LABRALDE	Responsable de la Gestion des Eaux	labralde@trafic.org	Rennes, 35042
9	Comité Général du Rempart du Bassin de la Vallée	CG 14	MASSON	Responsable de la Gestion des Eaux	masson@trafic.org	Rennes, 35042
10	Commissariat National de la Biodiversité	MAP DRAE PRSDE	Le BOULIER	Directeur	le@trafic.org	Rennes, 35042
11	Syndicat des Producteurs de Saumon-Champigny	SYNPROD	SIMONNEAU	Animatrice "coordination de projet"	simon@trafic.org	Rennes, 35042
12	Fédération des Producteurs de Saumon	FMA	MOSSEEC	Directeur	mosseec@trafic.org	Rennes, 35042

³ Groupements, associations, Chambres d'Agriculture, parcs naturels régionaux, collectivités territoriales, universités, etc.

Sommaire

Sommaire	4
1. Résumé consolidé public	5
Changement climatique dans le Grand Ouest : évaluations, impacts, perceptions	5
English summary : Climatic Change in the French West regions : evaluation, impacts, perceptions	7
2. Mémoire scientifique	8
2.1 Résumé du mémoire	8
CLIMASTER : Changement climatique dans le Grand Ouest : évaluations, impacts, perceptions	8
2.2 Enjeux et problématique, état de l'art	9
2.3 Présentation des terrains	11
2.4 Présentation et implication des partenaires	11
2.5 Approche scientifique et technique	14
2.6 Réalisations et résultats obtenus	15
2.7 Exploitation des résultats et valorisation	16
2.8 Contribution au développement régional et territorial	17
2.9 Discussion	20
2.10 Conclusions	21
2.11 Références	21
3. Impact du projet	23
3.1 Valorisation scientifique	23
3.1.1 Actions de valorisation scientifique	23
3.1.2 Liste des publications et communications	23
3.2 Valorisation opérationnelle	30
3.2.1 Actions de valorisation opérationnelle	30
3.2.2 Liste des éléments de valorisation	30
3.3 Valorisation par la formation	30
3.3.1 Actions de formation	30
3.3.2 Liste des éléments de formation	30
3.4. Liste des livrables	33
3.5 Gouvernance de l'ensemble du projet de recherche	33
3.6 Bilan des contributions individuelles aux projets de recherche	34
3.6.1 Contributions des personnels des organismes de recherche et partenaires	34
3.6.2 Bilan et suivi des personnels recrutés en CDD (hors stagiaires)	37

1. Résumé consolidé public

Changement climatique dans le Grand Ouest : évaluations, impacts, perceptions

1) Se saisir de la question climatique au niveau régional pour analyser l'évolution du climat, son impact, sa perception, et la capacité d'adaptation des acteurs.

Les questions sont de 3 ordres. Elles portent tout d'abord sur la nature et l'importance des changements climatiques passés, dans le Grand Ouest. Quelle influence de ce changement et de cette variabilité sur l'intensité et la fréquence des sécheresses, des excès d'eau, des gelées? ... Quelle évolution des types de temps?

Elles portent ensuite sur le domaine agricole : Quels changements de pratiques agricoles et d'occupation du sol en lien avec le changement climatique (CC) observés depuis l'échelle de la télédétection à celle de l'exploitation? Quelle perception de l'influence du changement climatique chez les agriculteurs? Quelle capacité d'adaptation?

Enfin elles portent sur les ressources environnementales : Quelles évolutions des ressources en eau et en sol sont observables ou prévisibles sous l'effet du CC? Quels sont les indicateurs pertinents, concernant l'érosion des sols, le stockage de carbone dans les sols, le débit et la qualité des cours d'eau, l'extension des zones humides?

Le projet a été mené par un collectif large de chercheurs du GO, en interaction avec des acteurs agricoles et en dialogue avec les acteurs de l'eau (membre des CLÉs), via des séminaires de concertation et de prospective et des enquêtes. Les terrains d'études spécifiques ont été les observatoires de recherche en environnement du GO, et des territoires de gestion avec qui une pratique d'échange existait préalablement (bassins du Yar, de la Seuilles, AOC Saumur Champigny, SAGEs du GO, réseaux agricoles techniques du GO).

2) Analyser le passé et le présent, et se projeter dans l'avenir : observations, modélisations, enquêtes

L'analyse des changements passés s'appuie sur le traitement des longues séries chronologiques (parfois depuis 1850) sur des variables telles que la pluie, la température, l'évapotranspiration, la sécheresse, les types de temps, mais aussi les débits des rivières et la qualité de l'eau. Le rôle du climat dans l'évolution de la couverture des sols est analysé à partir d'images régionale de télédétection.

L'étude des changements à venir par des simulations se base sur les projections climatiques issue d'un scénario moyen (A1b) d'émission de Gaz à Effet de Serre proposé par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), et régionalisé au GO.

Les simulations s'appuient sur une diversité de modèles d'impact concernant notamment la vulnérabilité des sols à l'érosion, l'évolution des débits et des teneurs en NO₃, le stock en carbone et la sécheresse des sols, l'extension des zones humides, et des variables agronomiques (jours disponibles).

La perception du changement climatique et les capacités d'adaptation des acteurs ont été analysées par des séminaires participatifs de prospective, des séminaires de concertation, des enquêtes semi-directives ou fermées auprès des acteurs.

L'ensemble de ces travaux portent une très forte incertitude. Les méthodes choisies et résultats sont là pour « donner à penser » le changement climatique plus que pour pronostiquer un avenir incertain.

CUMASTER propose un corpus de connaissance qui vise « à donner à penser le changement climatique » dans le GO. Il montre : la réalité des changements climatiques dans le Grand Ouest, actuels et à venir ; la vulnérabilité des ressources naturelles, qui présente cependant une forte hétérogénéité territoriale et demande à être caractérisée à une échelle fine ; la bonne capacité d'adaptation des acteurs agricoles, pour peu qu'elle n'induisse pas de rupture dans leur système de production ; la sensibilisation variable et parfois moindre des acteurs de l'eau (d'autant plus qu'on va du sud au nord du GO), préoccupés au quotidien par des questions de qualité de la ressource.

Un ouvrage intitulé : « le climat change dans le Grand Ouest ; évaluation, impact, perception » nous a semblé la façon la plus durable de valoriser CUMASTER. L'ouvrage, en cours de rédaction sera publié aux Presses universitaires de Rennes en juin 2012. Il vise un public de gestionnaires et d'élus territoriaux, de techniciens agricoles et agriculteurs, de gestionnaires de l'eau, d'associations environnementales, d'étudiants.

Par ailleurs, CUMASTER a produit un site web documenté (<http://www.rennes.inra.fr/climaster/>), le support de nombreuses interventions « grand public » et un support de séminaire de concertation avec les agriculteurs.

A la date de rédaction de ce rapport, une centaine de documents étaient répertoriés ; articles à comité de lecture dans des revues disciplinaires, communications dans des colloques disciplinaires ou non, rapports de stages ; communications auprès de différentes instances (gestionnaires territoriaux et agricoles, structures de formation, associations). Des articles de synthèse sont en préparation.

CUMASTER est un projet de recherche coordonné par Ph. Merot (INRA), en lien avec Ph. Desnos (TRAME) et J.P. Arrondeau (IAV). Il associe l'UMR SAS, et l'UMR ESE, INRA-Agrocampus Rennes; l'UMT Vinitera, UE 1117, INRA, et le LEVA, ESA, Angers; Géoscience Rennes, CNRS, Univ. Rennes 1; Geophen, LETG, UMR 6554, Caen; le COSTEL, LETG, UMR 6554, Rennes; le SAD-Paysage, INRA, Rennes; le CRPCC, UBO, Brest; l'IRISA (Rennes), l'AScA, Paris; le Centre d'Etude pour un Développement Agricole Plus Autonome; le Syndicat des producteurs de Saumur Champigny; le Comité des Bassins de la Lieue de Grève; l'Institut d'Aménagement de la Vialaine; le Forum des Marais Atlantiques; le Syndicat du BV du Scorff; le Conseil Général 14; la CRA Bretagne et CA 14; TRAME. Il a commencé en Décembre 2008 et a duré 33 mois. Il s'est déroulé en Basse Normandie, Bretagne, Pays de Loire et Poitou Charentes. Il a bénéficié d'une aide PSOR de 447 500 €.

English summary : Climatic Change in the French West regions : evaluation, impacts, perceptions

1) To address the issue of regional climate to analyze climate change, its impact, perception, and the adaptability of stakeholders and farmers.

We propose 3 issues. 1) First on the nature and importance of past climate change (CC), in the French West regions (le Grand Ouest). What is the effect of this change and this variability on the intensity and frequency of drought, water excess, frost? ... What types of changes in time? 2) Second, in agriculture: What changes in farming practices and land use in relation to climate change, observed from the remote sensing scale, down to the end-user scale? What perception of the influence of climate change among farmers? Which resilience? 3) Finally they relate to environmental resources: What changes in water and soil are observable or predictable as a result of CC? What are the relevant indicators on the soil erosion, the carbon storage in soils, the flow and quality of streams, the extension of wetlands?

The project was led by a broad group of researchers from the GO, interacting with actors and dialoging with farmers and stakeholders in water management (members of local water boards), via seminars, consultation and prospective investigations. The specific study areas have been the environmental Research Observatories of GO, and managed territories with prior existing exchange (basins of Yar, the AOC Saumur Champigny, SAGEs of the GO, agricultural technical networks of the GO).

2) Analyze the past and the present and look to the future: observations, modeling, investigations

The analysis of past changes are based on the processing of long time series (some since 1850) on variables such as rainfall, temperature, evapotranspiration, drought, weather types, but the river flows and water quality. The role of climate in the evolution of land cover is analyzed from regional remote sensing images.

The study of future changes through simulations is based on climate projections corresponding to the average scenario (A1b) of greenhouse gas emission proposed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), and regionalized to GO.

The simulations are based on a variety of models including the impact on soil vulnerability to erosion, changes in flow rates and concentrations of NO₃, the carbon stock of soils and drought, the expansion of wetlands and agronomic variables (agronomically available days).

The perception of climate change and adaptive capacity of the actors were analyzed using participatory foresight seminars, seminars, consultation, surveys, sociological inquiry. All these works are a very high uncertainty. The methods chosen and results are more there to give food for thought concerning climate change and its impact than to predict an uncertain future.

CLIMASTER offers a body of knowledge that aims "to discuss climate change" in the GO. It shows: the reality of climate change in GO, present and future, the vulnerability of natural resources, which, however, are spatially highly heterogeneous and need to be characterized at a fine scale, the good adaptability of agricultural actors, provided it does not result a break in their production system; and lastly, the variable and sometimes weak awareness of water stakeholders (especially in the north part of GO), more concerned with the daily issues of the quality of the resource.

A book entitled: "Climate change in the far West: evaluation, impact, perception" seemed the most sustainable value for CLIMASTER. The book, being written, will be published by Presses Universitaires de Rennes in June 2012. The target is a public of territorial stakeholders, agricultural technicians and farmers, water managers, environmental groups, students. In addition, CLIMASTER produced a website documented (<http://www.rennes.inra.fr/climaster/>). CLIMASTER is the support of many interventions for local people, and a support seminar for consultation with farmers.

2. Mémoire scientifique

2.1 Résumé du mémoire

CLIMASTER : Changement climatique dans le Grand Ouest : évaluations, impacts, perceptions

1) Se saisir de la question climatique au niveau régional pour analyser l'évolution du climat, son impact, sa perception, et la capacité d'adaptation des acteurs.

Les questions sont de 3 ordres. Elles portent tout d'abord sur la nature et l'importance des changements climatiques passés, dans le Grand Ouest. Quelle influence de ce changement et de cette variabilité sur l'intensité et la fréquence des sécheresses, des excès d'eau, des gelées? ... Quelle évolution des types de temps?

Elles portent ensuite sur le domaine agricole : Quels changements de pratiques agricoles et d'occupation du sol en lien avec le changement climatique (CC) observés depuis l'échelle de la télédétection à celle de l'exploitation? Quelle perception de l'influence du changement climatique chez les agriculteurs? Quelle capacité d'adaptation?

Enfin elles portent sur les ressources environnementales : Quelles évolutions des ressources en eau et en sol sont observables ou prévisibles sous l'effet du CC? Quels sont les indicateurs pertinents, concernant l'érosion des sols, le stockage de carbone dans les sols, le débit et la qualité des cours d'eau, l'extension des zones humides?

Le projet a été mené par un collectif large de chercheurs du GO, en interaction avec des acteurs agricoles et en dialogue avec les acteurs de l'eau (membre des CLE), via des séminaires de concertation et de prospective et des enquêtes. Les terrains d'études spécifiques ont été les observatoires de recherche en environnement du GO, et des territoires de gestion avec qui une pratique d'échange existait préalablement (basins du Yar, de la Seules, AOC Saumur Champigny, SAGEs du GO, réseaux agricoles techniques du GO).

2) Analyser le passé et le présent, et se projeter dans l'avenir :

observations, modélisations, enquêtes

L'analyse des changements passés s'appuie sur le traitement des longues séries chronologiques (parfois depuis 1850) sur des variables telles que la pluie, la température, l'évapotranspiration, la sécheresse, les types de temps, mais aussi les débits des rivières et la qualité de l'eau. Le rôle du climat dans l'évolution de la couverture des sols est analysé à partir d'images régionale de télédétection.

L'étude des changements à venir par des simulations se base sur les projections climatiques issue d'un scénario moyen (A1b) d'émission de Gaz à Effet de Serre proposé par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), et régionalisée au GO.

Les simulations s'appuient sur une diversité de modèles d'impact concernant notamment la vulnérabilité des sols à l'érosion, l'évolution des débits et des teneurs en NO₃, le stock en carbone et la sécheresse des sols, l'extension des zones humides, et des variables agronomiques (jours disponibles).

La perception du changement climatique et les capacités d'adaptation des acteurs ont été analysées par des séminaires participatifs de prospective, des séminaires de concertation, des enquêtes semi-directives ou fermées auprès des acteurs.

L'ensemble de ces travaux portent une très forte incertitude. Les méthodes choisies et résultats sont là pour «donner à penser» le changement climatique plus que pour pronostiquer un avenir incertain.

CLIMASTER propose un corpus de connaissance qui vise « à donner à penser le changement climatique » dans le GO. Il montre : la réalité des changements climatiques dans le Grand Ouest, actuels et à venir ; la vulnérabilité des ressources naturelles, qui présente cependant une forte hétérogénéité territoriale et demande à être caractérisée à une échelle fine ; la bonne capacité d'adaptation des acteurs agricoles, pour peu qu'elle n'induisse pas de rupture dans leur système de production ; la sensibilisation variable et parfois moindre des acteurs de l'eau (d'autant plus qu'on va du sud au nord du GO), préoccupés au quotidien par des questions de qualité de la ressource.

Un ouvrage intitulé : « le climat change dans le Grand Ouest : évaluation, impact, perception » nous a semblé la façon la plus durable de valoriser CLIMASTER. L'ouvrage, en cours de rédaction sera publié aux Presses universitaires de Rennes en June 2012. Il vise un public de gestionnaires et d'élus territoriaux, de techniciens agricoles et agriculteurs, de gestionnaires de l'eau, d'associations environnementales, d'étudiants. Par ailleurs, CLIMASTER a produit un site web documenté (<http://www.rennes.inra.fr/climaster/>), le support de nombreuses interventions « grand public », et un support de séminaire de concertation avec les agriculteurs.

A la date de rédaction de ce rapport, 62 documents étaient répertoriés : articles à comité de lecture dans des revues disciplinaires, communications dans des colloques disciplinaires ou non, rapports de stages, communications auprès de différentes instances (gestionnaires territoriaux et agricoles, structures de formation, associations. Des articles de synthèse sont en préparation.

CLIMASTER est un projet de recherche coordonné par Ph. Merot (INRA), en lien avec Ph. Desnos (TRAME) et J.P. Arrondeau (IAV). Il associe l'UMR SAS, et l'UMR ESE, INRA-Agrocampus Rennes; l'UMT Vinitera, UE 1117, INRA, et le LEVA, ESA, Angers; Géosciences Rennes, CNRS, Univ. Rennes 1; Geophen, LETG, UMR 6554, Caen; le COSTEL, LETG, UMR 6554, Rennes; le SAD-Paysage, INRA, Rennes; le CRPCC, UBO, Brest; l'ASCA, Paris; l'IRISA (Rennes), le Centre d'Etude pour un Développement Agricole Plus Autonome; le Syndicat des producteurs de Saumur Champigny; le Comité des Bassins de la Lieue de Grève; l'Institut d'Aménagement de la Vilaine; le Forum des Marais Atlantiques; le Syndicat du BV du Scorff; le Conseil Général 14; la CRA Bretagne; TRAME. Il a commencé en Décembre 2008 et a duré 33 mois. Il s'est déroulé en Basse Normandie, Bretagne, Pays de Loire et Poitou-Charentes. Il a bénéficié d'une aide PSDR de 447 500 €.

2.2 Enjeux et problématique, état de l'art

La question du changement climatique (CC) se trouve au cœur du débat de société, des politiques de recherches environnementales, et de l'incertitude sur les orientations à venir dans le développement territorial. Dans l'Ouest de la France, cette question a été longtemps occultée par l'impact très fort de l'agriculture sur les ressources en sol, en eau, en biodiversité et en paysage.

- Les questions que nous nous sommes posées dans le cadre de ce projet étaient les suivantes :
- s'interroger sur et caractériser la réalité du CC dans le grand ouest à la fois en termes de tendance mais aussi d'extrêmes climatiques, de variabilité et de répartition spatiale.
 - identifier et caractériser les réponses actuelles des acteurs agricoles à la perception qu'ils ont de ce CC, en le résumant par rapport à d'autres facteurs que sont les contextes économique et réglementaire et qui influencent significativement les décisions des agriculteurs,

- mesurer les changements observés sur les ressources en eau, en sol, en biodiversité, analyser et modéliser l'influence directe du CC et indirecte via les changements de pratiques agricoles associés, sur ces ressources,
- confronter les différentes perceptions du CC et de ses conséquences en termes de développement territorial entre les chercheurs, les agriculteurs et les nouveaux gestionnaires de l'eau.

Bien que la question du CC ne soit pas spécifique au GO, la spécificité interrégionale de l'impact du CC provient d'un certain nombre de caractéristiques partagées : 1) Le caractère côtier de la façade atlantique, qui induit des contraintes environnementales supplémentaires, 2) des ressources naturelles intensément exploitées ou impactées et de ce fait sensibles aux modifications climatiques, 3) la présence de structures de paysages « fortes », comme les réseaux de haies, ou les zones humides, 4) une sensibilité des populations du GO à la question environnementale marquée à la fois par une forte activité associative et l'importance de conflits d'usage; 5) une force de frappe scientifique importante sur les problématiques environnementales à forte composante agricole, 6) l'incertitude concernant le CC, renforcée dans le grand Ouest du fait de sa position entre un Sud et un Nord de l'Europe où les changements tendanciels sont plus marqués, mais dans des directions opposées ; 7) et enfin la demande pressante des gestionnaires et des politiques d'apporter un éclairage régional sur le sujet.

Ainsi, nous avons proposé de développer un projet portant sur les interactions entre le CC, les systèmes agricoles, les ressources naturelles et le développement territorial, pour permettre aux acteurs régionaux une anticipation raisonnée des évolutions à venir et des conséquences en termes de pratiques relatives aux activités agricoles et à la gestion spatiale de l'eau. Il s'agit de se donner des outils partagés d'observation sur le long terme, et d'analyse des pratiques, ainsi que une vision commune sur l'impact des changements.

On peut classer les connaissances à l'origine du projet en 3 catégories :

Des connaissances thématiques régionales : la réalité d'une évolution climatique en Bretagne appuyée sur les travaux des géographes et notamment du COSTEL (Dupont et al., 2001, Dubreuil, 2005 ; Dubreuil et Mounier, 1998 ; Jouan, 2005) la réalité d'une influence du climat sur les ressources en eau et en sol, appuyé sur les travaux de l'INRA et du CNRS (Aurousseau et Vinson, 2006, Gruau et Jardi, 2005) ; des analyses sur les relations complexes entre l'évolution de la couverture paysagère et agricole, climat et ressources en eau (Seguin et al., 1976 ; Viaud et al., 2005, Durand et al., 2006) dont les conséquences sont encore mal perçues.

Des connaissances thématiques nationales et internationales : un cadre de connaissances vaste et très divers existe, dans la continuité des travaux du GIEC, allant de conjectures jusqu'à des analyses très fines du CC et de ses impacts potentiels dans différents domaines (David et al., 2007). Au niveau national, un corpus très récent, voire en cours de constitution pendant le projet (avec les projets tels que CLIMATOR, CLIMFOUREL, CLIMADAPT, ADAGE,...) sur les relations entre CC et adaptation de l'agriculture, prenait le relais de travaux plus anciens sur l'impact de l'agriculture sur le CC et la question de l'atténuation (Amigues et al., 2006). Les travaux sur la ressource en eau (Ducharme, 2011) et en sol (projet ANR Land Soil, 2008-2011) dans un contexte pertinent pour le GO sont également très récents (projets REXHYSS, Hydrosol...).

Des connaissances méthodologiques : les équipes choisies pour le projet ont montré leur capacité à analyser les relations agriculture-environnement tant à partir de suivis long terme et des observations haute fréquence, qu'à partir de modélisations, pour comprendre les évolutions passées ou prévoir les futures, ou encore dans le domaine des Sciences Humaines et Sociales, leur maîtrise des méthodes de prospective (Hatem, 1993 ; Narcy, 2004), d'enquête

et de concertation, approches appliquées jusqu'ici aux changements de pressions agricoles (Weiss et al., 2006 ; Lemery, 2003).

2.3 Présentation des terrains

CLIMASTER réunissant de nombreuses disciplines et étant multi-échelle et multi-local a donc mobilisé différents types de terrains et de données.

- Des données de télédétection couvrant une large échelle (le Grand Ouest), et se focalisant sur des sites privilégiés (le BV du Lieu de grève, les bassins-versants de la Vie et du Jaunay, Vendée ; l'AOC Saumur Champigny...),
- Des observatoires de recherche en environnement (ORE) et zones ateliers (ZA) labellisés, qui fournissent des données qualifiées sur le long terme : ORE AgrHys en Bretagne, (<http://www.cerami.univ-rennes1.fr/ORE-AgrHys/>), l'ORE Petit Fleuve côtier, en Basse Normandie et Bretagne, la ZA Armorique, <http://osur.univ-rennes1.fr/zoneatelier-armorique/>.
- des Observatoires opérationnels en Environnement (OOE), en interaction avec les acteurs : en Bretagne, les bassins de la Lieu de grève, en Normandie, le bassin versant de la Seules ; en Pays de Loire, le Saumur Champigny.
- 7 stations spécifiques où les projections climatiques des scénarios du GIEC avaient été désagréées, à notre demande, par INRA AgroClim, et réparties sur tout le GO (Louvigné du désert, Ploudaniel, Rennes, Naizin, Montreuil Belay, Lusignan, Cognac).
- Des réseaux d'acteurs sollicités au cours de séminaires ou par des enquêtes : groupes techniques agricoles (dans les 4 régions), agriculteurs de la ZA Armorique, membres des CLE de différents SAGE...

On a disposé ainsi d'un certain nombre de sites observatoires correspondant à des statuts différents, permettant d'avoir à la fois les points de vue des scientifiques et celui des acteurs territoriaux.

On constate, - nous avons été amené à faire ce constat au cours du projet-, la nécessité de s'appuyer sur des données existantes, donc des observatoires et des réseaux existants. On ne peut guère concevoir un travail sur le CC qui ne prendrait pas en compte le long terme. CLIMASTER a ainsi bénéficié des observatoires préexistants, et confirmé l'intérêt d'avoir des observatoires environnementaux sur le long terme, qualifiés, voire labellisés, observatoires opérationnelles donnent cependant au dispositif un éclatement et une hétérogénéité.

Deux lectures opposées sont apparues en terme de genericité au cours du projet : 1) Les travaux, même s'ils sont dispersés, permettent de proposer des résultats à caractère générique, transposables en partie et porteurs de sens à l'échelle régionale, 2) la confrontation avec les acteurs de terrain demande de fournir une information localisée et spécifique – même si elle est fortement dégradée - au risque sinon d'être invalidée ou non prise en compte par les acteurs. Il s'agit là donc d'une contrainte forte.

Une limite du projet a été l'impossibilité d'avoir une couverture inter-régionale homogène. L'essentiel des travaux concernant l'impact sur les ressources ont eu lieu en Bretagne et Basse Normandie, les travaux étant plus équilibrés quant à l'impact sur l'agriculture et la perception des acteurs.

2.4 Présentation et implication des partenaires

Les partenaires du projet sont nombreux, du fait de son caractère interdisciplinaire et interrégional.

Les partenariats entre scientifiques ont été soutenus du début à la fin du projet. L'un des intérêts du projet CLIMASTER a été de fédérer un groupe cohérent de chercheurs se fréquentant déjà dans d'autres projets mais en général sur des questions plus restreintes et sous forme groupes disciplinaires. On soulignera l'intérêt tout particulier manifesté au cours du projet par les chercheurs pour les résultats en provenance d'autres volets de recherche. Il semble important d'insister sur les relations avec les « acteurs ».

Le fonctionnement a été hétérogène.

- Partenariat fort dès le démarrage et se renforçant au cours du projet, comme avec TRAMÉ et la CRAB.
- Partenariat soutenu par d'autres projets (interreg, ANR, projets régionaux) comme avec le CEDAPA, le lieu de Grève, l'IAV ou le BV du Scoff, qui permet d'apporter une expertise complémentaire aux partenaires (voir p. e. Narcy et al., 2013).
- Partenariat scientifique, organisé sur une base permanente, comme le GEMO, Partenariat nouveau et motivé, comme avec l'IAV, qui est resté relativement peu développé, du fait de difficulté de disponibilité et de mobilisation des acteurs de terrain (représentants des Comités Locaux de l'eau). Cela est instructif en soi sur la perception du CC par ces acteurs. Ce partenariat devrait cependant se développer dans l'avenir, notamment grâce aux résultats de climaster qu'on pourra mobiliser dans cet objectif.

Les partenariats ont été choisis dans les 2 dimensions du projet : la dimension agricole et la dimension gestion de l'eau, en croisant cela avec la représentation des 4 régions, ce qui a entraîné une difficulté de mobilisation. Ceci a particulièrement été vrai pour les acteurs de l'eau, reflétant là l'intérêt très mesuré, non pas des techniciens, mais des acteurs de l'eau (membres des CLE ...), ou leurs préoccupations première sur des questions d'actualités à traiter par ces acteurs (question algues vertes en Lieu de Grève...).

L'inter-régionalité de PSDR-GO s'est heurtée également à l'absence de structures opérationnelles de tous les partenaires à cette échelle (excepté TRAMÉ, dont le projet a pu bénéficier de l'efficacité). Elle a également été modulée par la variabilité de la sensibilité des régions aux enjeux du CC, la Basse Normandie étant en retrait pas exemple sur cette question au début du projet.

L'analyse du partenariat selon la grille proposée a été partiellement réalisée ci-dessous

	Avant le projet 7 A la fin du projet			
TRAMÉ-FRGEDE	DESINOS Philippe	nouveau	0,	3, 3, 3, 3
CEDAPA	N. Gouerec		2	1, 1, 1, 1
BV de la Lieu de Grève	BRIANT G		2	1, 1, 1, 1
IAV	ARRONDEAU J.P.	nouveau	0	2, 1, 1, 2
CRAB	GITEAU Jean-Luc TROU Guyliane		2	3, 3, 3, 2
GEMO	PANAGET T.		2	2, 2, 2, 2
Syndicat du Scoff	MOUJIER T.		1	1, 1, 1, 1
Chantire agriculture (14)	LAREAUDE D.		0	1, 1, 1, 1
CG 14	MASSON T			1 2 2 2
CNBF.	Le BOULIER H.	nouveau	0	1
Synd. Prod. Saumur-Champigny	SIMONNEAU M.A.		0	0
FMA	MOSSEC G.	nouveau	0	1, 1, 1, 1

Une analyse particulière du partenariat : Trame , Quatre notes pour qualifier des ambitions partenariales croissantes

Avant le projet avec Trame -FRGEDA

	Mode d'association des partenaires	Expression de la volonté de transfert	Produits issus du projet de recherche	Lien du projet aux enjeux du développement régional
0	Les partenaires ne sont pas associés		Publication des connaissances scientifiques standards	On n'en parle pas
1		L'intentionnalité est présente		

Au démarrage du projet Avec TRAME - Frgeda

	Mode d'association des partenaires	Expression de la volonté de transfert	Produits issus du projet de recherche	Lien du projet aux enjeux du développement régional
1	La recherche apporte une expertise aux partenaires		Diffusion des résultats auprès des partenaires	
2		Les modalités sont identifiées dans le projet		Le projet répond à la sollicitation d'acteurs régionaux
3				

La situation actuelle (en fin de programme) avec TRAME – FRGEDA

	Mode d'association des partenaires	Expression de la volonté de transfert	Produits issus du projet de recherche	Lien du projet aux enjeux du développement régional
2				Le projet répond à la sollicitation d'acteurs régionaux
3	La recherche est coproduite, elle modifie la position des chercheurs et des partenaires	Le moyen de réaliser le transfert existe (ingénierie)	Initiative du partenaire pour le développement régional	

La situation à N+1 est bien difficile à prévoir. Le projet s'est achevé en août dernier, les séminaires de restitution PSDR débutent, la valorisation scientifique continue (ouvrage au printemps). Grace au projet CLIMASTER, le groupe constitué est référent sur la question du changement climatique dans la France de l'ouest. Ce groupe va continuer à interagir dans les domaines de la recherche, de la formation et de l'expertise en tentant d'homogénéiser le niveau de connaissance des enjeux du CC dans toutes les régions et en s'attaquant à la question de la capacité d'adaptation des systèmes qui a été peu abordée dans ce premier projet.

2.5 Approche scientifique et technique

Comme demandé, les résultats sont présentés ici de façon synthétique et transverse aux volets de recherche. Les annexes au rapport d'activité présentent de façon complète, et ordonnée selon les volets de recherche, les résultats. Les annexes présentent un sommaire et 4 dossiers (Climat, ressources, agriculture, perception). Elles sont destinées aux instances d'évaluation et ne doivent pas être diffusées sans l'accord préalable écrit de leurs auteurs.

Analyser le passé et le présent ou se projeter dans l'avenir ? Les différentes disciplines proposent des points de vue différents à cet égard, qui laissent peu de marge de manœuvre sur un positionnement homogène à adopter. Nous avons choisi une position pragmatique qui tient compte à la fois de l'avancement des connaissances, de la disponibilité des données, de la force de travail disponible et principalement de l'objectif visé.

Vis-à-vis du climat, nous avons pu développer une analyse diachronique originale portant sur différentes longues chroniques climatiques du passé dans le Grand Ouest, pour voir l'évolution déjà en cours du changement climatique, à l'aide notamment de la méthode Hess-Brezowsky traitant des types de temps.

Nous nous sommes par ailleurs appuyés sur les projections climatiques qui découlent des scénarios socio-économiques du GIEC, régionalisées et mis à disposition par Frédéric Huard de l'équipe AGROCLIM (INRA Avignon) en différentes stations du Grand Ouest. Ces chroniques ont servi de base à l'ensemble des simulations développées jusqu'à l'horizon 2100, sur les différentes thématiques du projet, et ont données ainsi un référentiel unique pour le projet. Les résultats ont été présentés par période de 30 ans, passé récent (PR), jusqu'en 2000, actuel ou futur très proche (FTP), jusqu'en 2030, futur proche (FP), jusqu'en 2080, futur lointain (FL), jusqu'en 2100.

L'étude des impacts potentiels du CC dans les différents domaines (ressource en eau, en sol, érosion, agriculture) est basée sur la simulation, sous contrainte des projections climatiques du scénario A1b, à partir de différents modèles dynamiques basés sur des processus. Ces modèles sont soit des modèles déjà validés et utilisés par les équipes du projet, soit des modèles externes appropriés au cours du projet (modèle jour disponible, Jdispo d'Arvalis), soit de nouveaux modèles (Carboland, V. Viaud). Lorsque nécessaire, les pratiques agricoles prises en compte sont les pratiques actuelles, ou des hypothèses très contrastées d'occupation du sol (tout herbe ou tout maïs). Il a semblé illusoire en effet de construire des scénarios évolutifs réalistes de l'usage des sols, du fait des incertitudes socio-économiques qui s'ajoutent à celles du climat, les simulations étant là pour donner à réfléchir.

Les résultats des simulations ont en particulier été utilisés au sein même du projet dans les séminaires de discussion avec les agriculteurs, parfois de façon dégradée, pour cadrer les impacts locaux projetés du CC.

Les analyses de données passées ont porté plus sur la mise en évidence de la variabilité spatiale de la vulnérabilité au climat et des facteurs qui la contrôlent (chroniques d'occupation des sols par télédétection, de cartes de sécheresse), ainsi que sur l'évolution climatique et les impacts des événements extrêmes, comme ceux d'années « normales » dans le futur. La limite principale de ces données étant la faible profondeur temporelle. Certaines variables (flux érosifs) ont fait l'objet de mesures pendant le projet et c'est là aussi la variabilité spatiale de la vulnérabilité qui a été suivie.

Vis-à-vis des acteurs régionaux (agriculteurs et gestionnaires de l'eau), de leur perception du CC et de leur capacité à en prendre compte l'impact, nous avons multiplié les points de vue, avec différentes approches « découplées », mais nous apportant autant d'éclairage. Des méthodes d'enquêtes avec des entretiens ouverts ou des questionnaires fermés, s'appuyant

sur des approches agronomiques, de la sociologie de l'environnement ou de la psychosociologie ont été appliquées à différents panels (éleveurs laitiers, membres des SAGES). Des séminaires d'échanges et un atelier participatif de prospective ont été construits, en se basant soit sur des scénarios agricoles sous contraintes de changement climatiques simulés, soit sur les années exceptionnelles vécues, comme « analogues » du futur, et alimentés par les résultats des volets techniques. Ces séminaires et ateliers participatifs, arrivés en fin de projet, ont été précédés par une série de 3 réunions d'une journée, réunissant l'ensemble des volets de recherche ainsi que les acteurs porteurs du projet, pour construire le référentiel et bâtir le questionnement sur le changement climatique et les adaptations potentielles.

2.6 Réalisations et résultats obtenus

Au cours du $XX^{ème}$ siècle, on constate que le réchauffement climatique s'est accompagné, dans les régions de l'Ouest de la France, d'étés non seulement plus chauds, mais aussi plus fréquemment marqués par la sécheresse. Certains changements dans la fréquence d'apparition et les impacts de certains types de circulations depuis le milieu du $XIX^{ème}$ siècle appuient quelques-unes des interrogations envisagées pour l'évolution à venir du climat (circulations pluvieuses d'hiver, circulations favorables aux températures élevées en été).

L'application aux régions de l'Ouest des scénarios climatiques pour le siècle en cours confirme ces craintes, en particulier l'aggravation des déficits hydriques liés à des étés à la fois plus chauds et moins arrosés. Les impacts de cette évolution climatique ne sont pas uniformes dans l'espace et certaines régions les subissent de façon plus atténuée ou accentuée (et rapide : par ex. le Val de Loire à Saumur) que d'autres. Les évolutions envisagées aux saisons intermédiaires sont plus complexes. Aussi, compte tenu de l'avancement des stades phénologiques, le risque de gel printanier demeure-t-il un problème pour les cultures délicates comme la vigne.

Ces informations sur le climat passé et futur ont nourri le travail des différents volets de recherche, par l'extraction d'informations climatiques localisées dans l'espace du grand Ouest

L'impact du changement climatique sur l'organisation du travail au sein d'exploitations laitières a été étudié à l'horizon 2030-2060. Pour le cas de sols limoneux sains du nord de l'Ille-et-Vilaine nous avons montré que pour les cultures fourragères :

- Les conditions d'implantation pour semer le maïs simulées avec le modèle Jdispo d'Arvalis devaient s'améliorer à l'horizon 2030-60. Les conditions d'intervention pour la récolte changeraient peu.

- De même, on observerait une augmentation du nombre de jours favorables pour une récolte de foin entre le 15/05 et le 31/08.

Cependant d'autres études montrent que les conditions plus sèches auront des répercussions négatives sur les rendements des prairies et du maïs. Donc, il y aura probablement plus de souplesse pour la conduite des surfaces fourragères, mais ces résultats sont à mettre en regard des autres impacts du changement climatique sur l'agriculture et aussi en regard de l'évolution des structures des exploitations, en particulier l'augmentation de la charge en travail.

Les ressources en eau seront fragilisées et plus variables, mais la forte variabilité inter annuelle des débits des cours d'eau en régime océanique empêche d'observer un effet du changement climatique sur les chroniques passées de débit. La simulation des débits à l'aide de modèles hydrologiques adaptés au contexte du Grand Ouest, a été réalisée jusqu'en 2100, en Bretagne et Pays de la Loire. En Bretagne la baisse des débits rapportée au passé récent est de l'ordre de 20 à 25% que l'on soit en futur proche ou en futur lointain. Elle est plus importante en Pays de la Loire et pourrait atteindre plus de 40% en futur lointain.

L'étéage s'accroît et se décale des mois de septembre octobre aux mois d'octobre-novembre, et la reprise des débits est plus lente. Les zones humides des têtes de bassins versant diminuent. Ces premiers résultats sont cependant corroborés par les résultats obtenus sur d'autres bassins du Nord de la France (la Seine notamment).

La *teneur en matière organique (MCO) des eaux* influencée par le climat de façon parfois opposée, en fonction des conditions du milieu. On montre ainsi une augmentation de la MCO dans les eaux uniquement pour des sols profonds riches eux même en MCO.

L'érosion hydrique est un risque bien identifié pour les sols à l'échelle de l'Europe. De nouveaux outils d'évaluation de l'aléa érosion des sols à l'échelle départementale et régionale ont été développés. Ils permettent d'estimer la sensibilité actuelle et future à l'aléa érosion des espaces agricoles du Grand Ouest. L'importance de l'interaction avec l'occupation du sol et les itinéraires techniques incitent à une analyse intégrant l'échelle de la parcelle.

La perception du changement climatique par les acteurs et leurs capacités d'adaptation ont été analysées de différentes manières. D'une part, une analyse par enquêtes des changements de pratiques passés et de leur causes, dans 60 exploitations laitières de la moitié nord du GO, montre que les évolutions climatiques sont faiblement prises en compte jusque maintenant par les agriculteurs. Néanmoins, les agriculteurs ont montré leur ouverture à cette question lors d'ateliers prospectifs au cours desquels nous avons 1) mis au centre de la réflexion un système agricole de référence dans lequel ils se reconnaissaient, 2) positionné la réflexion par rapport à des évolutions ou accidents climatiques vécus, hors d'un débat sur les causes de ce changement. Lors de ces ateliers, les résultats des différents volets ont été mobilisés. Les agriculteurs ont montré une confiance dans les capacités d'adaptation autonome, et dans les solutions liées à la propre dynamique des filières, parfois dans une logique de territoire, associée à une opportunité à saisir en termes de marché. Des ruptures (changements de systèmes) sont peu ou pas évoquées.

La questionnement des acteurs de l'eau sur le changement climatique apparaît de son côté plus lointain, fortement dominé par un gradient Nord-Sud. Le positionnement est marqué par les problématiques locales de l'eau. La prégnance de problèmes immédiats de la qualité de l'eau dans les régions Bretagne, Pays de la Loire et Normandie, qui s'oppose à l'incertitude des évolutions à venir, rend difficile l'appropriation, voire la perception de questionnements à plus long terme.

2.7 Exploitation des résultats et valorisation

A l'origine du projet, la valorisation scientifique avait été prévue de façon traditionnelle et disciplinaire (« la valorisation scientifique se fera à travers les supports habituels à la communauté scientifique »). Il avait été prévu par ailleurs que le transfert se fasse par le biais des différentes structures de développement intégrées dans le projet, en s'appuyant sur les séminaires.

A cette étape du projet, on peut constater :

- Effectivement une valorisation scientifique à travers des revues référencées à comité de lecture international
- Des communications assez nombreuses dans des colloques disciplinaires (European Geophysical Union, colloques de géographie,...)
- Des communications également nombreuses dans les colloques de l'Association Internationale de Climatologie.

La phase de valorisation disciplinaire des résultats a en fait commencé récemment et devrait se poursuivre pendant toute l'année 2012.

Des articles de synthèse sur le projet sont programmés, notamment dans la revue « Global Environmental Change, Human and Policy Dimensions »

Sur le plan de la valorisation opérationnelle, la stratégie a été enrichie.

- Création d'un site WEB CLIMASTER
- De nombreuses interventions dans le champ du CC et de l'adaptation ont été et sont programmées, dans différents cadres, traitant du contexte régional du changement climatique. Alors que ce thème était traité jusqu'ici par des intervenants se situant au niveau national (p.e. B. Seguin, mission CC de l'INRA), il y a un transfert sur les chercheurs de CLIMASTER.
- TRAME et les chambres d'agriculture ont élaboré au sein de CLIMASTER un « kit » constitué d'un montage PPT et une note de synthèse sur le CC en appui à une méthode de travail avec des agriculteurs, en séminaire sur le changement climatique.
- C'est suite au séminaire PSDR de Carcans en 2010 qu'il a paru pertinent de valoriser les travaux à travers un ouvrage à diffusion large consacré au CC dans le GO. (titre provisoire : « le climat change dans le GO ; évaluation, impacts, perception). La proposition a été bien reçue par tous. Nous avons choisi les PUR Presses Universitaires de Rennes (1er éditeur universitaire français), à la fois parce qu'il associe les universités des régions GO de PSDR et qu'il a un bon réseau de diffusion. La livraison est prévue début Juin 2012. La version V0 est pratiquement terminée.

2.8 Contribution au développement régional et territorial

La question du CC est permanente. Au niveau médiatique, le moindre accroissement météorologique est immédiatement inscrit dans ce cadre du CC. Mais au delà de ce "marionnette" journalistique, la question est réelle, inscrite au niveau politique, par exemple en France dans le Grenelle de l'environnement, et suscite craintes et menaces au niveau international. Désirant inscrire leurs politiques dans une vision prospective, les gestionnaires territoriaux s'interrogent naturellement sur la question du CC, d'autant plus qu'ils doivent la décliner dans des planifications à différentes échelles territoriales (du plan énergie communal au schéma régional climat-air-énergie par exemple).

Jusqu'à la fin de la précédente décennie, le point de vue sur le CC était centré de façon première sur l'atténuation, tant par les scientifiques que par les gestionnaires, et cela a permis de proposer un panel large de solutions techniques visant essentiellement à diminuer l'émission de GES et la dépense énergétique non renouvelable. La question de l'adaptation est autrement redoutable, car elle croise des forces motrices et des pressions externes liées au CC, à des territoires et des sociétés qui doivent s'adapter. CLIMASTER se justifie clairement à cette aune là. Il s'agit de donner à chacun à différents niveaux (du gestionnaire régional à l'agriculteur) des éléments pour penser le changement climatique dans son quotidien et dans son futur. CLIMASTER veut ainsi donner à penser le changement climatique dans la gestion et le développement territorial.

Parmi les enjeux transversaux aux différents volets de recherche, 3 enjeux majeurs du développement régional ont été identifiés : s'adapter à l'incertitude ; améliorer la résilience des systèmes naturels et anthropiques ; accroître la capacité d'adaptation des acteurs.

1) *s'adapter à l'incertitude*. Bien que les travaux menés dans CLIMASTER n'aient pas permis de développer des analyses complètes de l'incertitude sur les conséquences à venir du CC, la mise en perspective de nos travaux avec ceux d'autres équipes ainsi que le développement d'une culture scientifique sur le CC nous amènent à considérer ce point de vue comme central. L'incertitude des impacts projetés est dépendante d'une cascade d'incertitudes liées aux modèles dynamiques et à leur paramétrisation, aux scénarios d'émissions (SRES) du

GIEC, mais plus encore aux projections climatiques (Ducharne, 2011) en particulier en ce qui concerne l'évolution des précipitations et des accidents climatiques. De cela découlent les 2 nécessités suivantes : 2) *améliorer la résilience des systèmes naturels et anthropiques* ; la question est cruciale dans le Grand Ouest où l'on constate une faible résilience des ressources naturelles du fait de pressions agricoles trop fortes (question de la qualité de l'eau ou des sols (stockage du carbone en baisse)) ou la faible durabilité des exploitations agricoles (baisse de 20% du nombre d'agriculteurs en 10 ans, in AGRESTE, 2011) ; 3) *accroître la capacité d'adaptation des acteurs* par l'appropriation de la question du CC : c'est une des leçons de CLIMASTER que d'avoir identifié cette capacité d'adaptation, assez forte chez les agriculteurs tant qu'il s'agit d'une adaptation sans rupture, et plutôt faible chez les acteurs de l'eau, du moins dans 3 régions sur 4, préoccupés qu'ils sont par des problèmes à échéance plus courte.

La mise en perspective des différents aspects du développement régional (ressources naturelles, systèmes agricoles...) au regard du CC apporte, par construction, un nouveau point de vue tant pour les scientifiques que pour les acteurs. Les interactions du climat et de la qualité de l'eau, la sensibilité des sols à l'érosion étudiée régionalement à l'échelle parcellaire, ou encore le questionnement des agriculteurs sur l'évolution à long terme de leurs systèmes de production sous la contrainte du CC, sont des exemples de nouvelles approches analytiques de ces thématiques. Elles correspondent à une approche distancée de thématiques qui favorisent un dialogue interdisciplinaire entre chercheurs et acteurs.

CLIMASTER a mobilisé de nombreuses ressources méthodologiques. On peut identifier 5 points : 1) La valorisation des bases de données, séries chronologiques, données spatio-temporelles de télédétection sur tout le GO, observatoires de recherche, observatoires opérationnels. Ces points ont été évoqués au § 2.2 ; 2) l'appropriation des projections climatiques régionalisées issues de ARPEGE et de SAFRAN, sur la base du scénario ALB, qui ont permis l'ensemble des simulations du projet ; 3) l'application et l'adaptation de modèles existants (TNT2, TopModel, SCALES, MESALES, modèles hydro et agro hydrologiques,), l'importation et l'appropriation de modèles utiles au projet (Modèle jours agromonomiquement disponibles *JDsipo développé par ARVALIS*), enfin la construction de modèles spécifiques (modèle carboland en partenariat avec le projet landsoil, sur le stockage de carbone), toujours sous contrainte de CC ; 4) la construction d'indicateurs pertinents dans le contexte du GO ; 5) la constitution de méthodes d'enquête et de prospective en agronomie, et SHS permettant l'échange, la confrontation des idées et la sensibilisation des acteurs au CC.

Les dynamiques territoriales ont été abordées dans CLIMASTER par 2 voies principales. L'analyse diachronique des cartographies de l'état d'occupation du sol en fin d'automne (cartographies marquant la sécheresse édaphique), a montré d'une part une composante climatique du déterminisme de l'occupation du sol, et d'autre part sur le plan méthodologique la capacité de l'outil. Ce type d'analyse prendra tout son sens avec l'allongement des séries chronologiques et permet déjà d'analyser les causes de ces tendances ("qu'est ce qui fait climat dans ces évolutions?"). Dans une vision plus prospective, l'analyse de systèmes agricoles spécifiques comme la vigne, à travers le prisme des conditions agro-climatiques actuelles et à venir, permet d'analyser la vulnérabilité des systèmes et de proposer les adaptations nécessaires, et vient compléter et régionaliser des travaux issus de CLIMATOR, un projet simulant l'impact des CC sur les principales espèces, et utilisé comme base de connaissance dans CLIMASTER.

Le degré de généralité et de transférabilité des résultats et des méthodes a été évoqué rapidement à propos des observatoires, mais la question mérite d'être approfondie. En ce qui concerne les méthodes utilisées, elles sont pour la plupart robustes, déjà éprouvées par les différentes équipes de recherche, et pour lesquelles le CC est un domaine d'application nouveau, mais qui ne remet pas en cause leur fiabilité.

En ce qui concerne les résultats, la situation se présente de façon vraiment différente selon qu'il s'agisse d'une vision prospective ou rétrospective. L'analyse des données climatiques passées, spatialisées directement à l'échelle régionale, permet d'avoir un corpus de connaissances sur l'évolution du climat passé, voire de l'occupation du sol fiable et pertinent à ces échelles temporelles. Par contre, l'ensemble des travaux de modélisation des impacts s'appuyant sur les projections climatiques découlant des scénarios du GIEC portent en eux l'incertitude de ces projections (à laquelle s'ajoute, mais de façon secondaire, l'incertitude propre des modèles), sur laquelle nous n'avons pas la main, mais pour lesquelles une extrême prudence s'impose, notamment vis à vis de l'évolution des précipitations et des événements extrêmes. Or ces 2 points sont majeurs dans le GO. Un des points n'a pas pu être réellement abordé, mais on dépasse là la limite des études possibles aujourd'hui sur le CC, c'est la question justement de l'impact des événements extrêmes (le GIEC a publié un rapport spécifique sur cette question le 19/11/2011, qui souligne l'importance de ce point, sans apporter d'information vraiment déterminante).

Sur le plan de la sensibilisation au CC des acteurs, il apparaît clairement dans les travaux de CLIMASTER la nécessité, lors de la confrontation avec les acteurs de terrain, de fournir une information localisée et spécifique – même si elle est fortement dégradée – au risque sinon d'être invalidée ou non prise en compte par les acteurs. Il s'agit là donc d'une contrainte forte, qui s'inscrit non pas dans une demande de généralité des résultats mais de spécificité locale.

Les chercheurs en sciences humaines et sociales ont développé dans le cadre de CLIMASTER un certain nombre d'outils visant à évaluer la capacité d'adaptation des acteurs : enquêtes auprès des agriculteurs et des membres des commissions locales de l'eau, une méthode participative visant à faire ressortir les atouts et contraintes de l'exploitation vis à vis du CC, les opportunités et les menaces du CC, a été élaborée et testée auprès de groupes d'agriculteurs. Ces protocoles d'enquête et d'organisation de séminaires sur le CC auprès des acteurs sont autant d'outils disponibles.

Les gestionnaires territoriaux sont particulièrement attentifs au travail réalisé dans le cadre de CLIMASTER. Ainsi à titre d'exemple, le début du projet a été marqué par une participation à la réflexion du Conseil Economique, Social et Environnemental Régional de Bretagne sur la gouvernance de la Bretagne à l'épreuve du CC. La fin du projet est marquée notamment par la création d'un groupe permanent sur le CC au conseil scientifique de l'environnement, dépendant du conseil régional de Bretagne et piloté par le responsable de CLIMASTER, et la participation à l'élaboration du SRCAE (schéma régional État – Région climat air énergie) sur cette question du CC. Les membres de CLIMASTER participent à un groupe de travail équivalent en Basse Normandie.

L'intérêt des acteurs locaux pour s'informer et débattre du CC se marque par le nombre (6 à 9/an) de manifestations dans lesquels les uns et les autres membres du projet ont été appelés à intervenir, tant auprès des acteurs du développement territorial, que dans le débat public, en particulier autour du monde agricole, aux agues de connaissances régionales et locales sur le CC, son impact sur les ressources et les systèmes agricoles, et sur les voies d'adaptation. Cette problématique est également intégrée au sein des cursus de formations permanente ou initiale (Collège des Hautes Études en Développement Durable, Rennes ; écoles d'agronomie (Rennes, Angers).

Cet intérêt manifeste du public pour une connaissance régionalisée du CC nous a conduits à réaliser et éditer un livre, aux Presses universitaires de Rennes, permettant ainsi d'alimenter le débat sur le CC dans le GO en intégrant les connaissances les plus récentes acquises au sein de CLIMASTER et de programmes complémentaires

2.9 Discussion

La discussion sera organisée en 3 points : un bilan global ; les verrous non traités ou qui apparaissent ; les ouvertures possibles et les perspectives.

Au-delà de l'affirmation d'un bilan « globalement positif », il nous apparaît que cette première mise de fond sur le changement climatique dans le Grand Ouest dans un projet interdisciplinaire associant chercheurs et acteurs est réussie, d'une part concernant la thématique, d'autre part le partenariat. Hormis les climatologues et géographes, les chercheurs du GO ne s'étaient pas jusqu'ici emparés de cette thématique. Ils l'ont fait en produisant de nombreux résultats, en se positionnant de façon originale par rapport à de nombreuses équipes françaises qui avaient une antériorité sur le sujet. Ce pari scientifique est donc en passe d'être gagné. Il a permis ainsi à toute une communauté d'avoir un positionnement clair sur le CC, ses impacts, et la question de l'adaptation dans le GO. Concernant le partenariat avec les acteurs, il s'est manifesté d'une part par l'investissement fort de TRAMÉ, co-porteur du projet, de la chambre d'agriculture de Bretagne et par la mobilisation efficace sur le thème de CC de groupes d'agriculteurs souvent déjà constitués (pour des raisons notamment de dynamique de groupe). Cela a permis d'aborder en profondeur la question de la perception du CC et de l'adaptation. Soulignons ici cependant le support indispensable de réseaux préexistants au projet (réseaux de chercheurs comme l'OSUR-CAREN, pôle AgroEcoTerMer de l'INRA, réseau techniques agricoles etc.).

On peut relever quelques points négatifs à ce bilan : un affichage initial de partenariats trop nombreux et trop précoces (en particulier dans le domaine de l'eau) ; la non réalisation de séminaires spécifiques (remplacés par de nombreuses interventions à la demande d'acteurs) ; une vision Grand Ouest parfois difficile du fait à la fois d'un déséquilibre des forces, mais aussi du « géoclimat » (Brisson & Levraut, 2010) (le Poitou-Charentes est rattaché par exemple au Sud-ouest dans la régionalisation des résultats de Climator, et non pas au GO-PSDR).

Les verrous sont de 3 ordres. Ils concernent le climat, les acteurs et les outils. *En terme de climat*, outre l'incertitude sur les projections climatiques, la question des événements climatiques extrêmes (Décamps, 2010) est centrale, car ces événements conditionnent fortement les impacts, la vulnérabilité des systèmes, leur résilience et les capacités d'adaptation. Ce point est difficile à aborder du fait de l'incertitude des projections, mais les années atypiques passées peuvent servir de « patron ». *Vis-à-vis des acteurs*, 3 questions émergent : comment aborder les adaptations agricoles non pas autonomes, mais en « rupture » ? Quelle est la vulnérabilité spécifique des différents systèmes de production et des différents territoires ? Dans le domaine de l'eau, comment (ou peut-on ?) mobiliser les acteurs de l'eau, peu sensibilisés (hormis en Poitou-Charentes) au CC, en l'absence d'impact actuel avéré ? *En termes d'outils*, il est nécessaire de renforcer les observatoires long terme en environnement, qui sont à la base des connaissances, mais aussi la capacité de modélisation et de simulations dynamiques par les équipes. Enfin, il faut renforcer la maîtrise d'outils d'accompagnement à la concertation (voir le travail de CLIVFOUREL ou la modélisation d'accompagnement COMOD – <http://comod.scirod.fr/ComMod/It/>).

Les ouvertures demandées par les gestionnaires territoriaux à l'échelle régionale concernent notamment les questions de la biodiversité, de l'urbain et du périurbain face au CC et de la mer et du littoral (ressources marines, risque côtier etc...), mais qui ne pourraient être traités qu'avec d'autres communautés scientifiques.

Les perspectives sont actuellement très ouvertes. Il y a à la fois une nécessité d'approfondissement disciplinaire (marqué notamment par le démarrage de thèses sur le sujet), une inscription des recherches dans de nouveaux grands programmes sur le CC (comme le méta programme ACCAF de l'INRA), la montée en puissance de la préoccupation des gestionnaires territoriaux sur la question du CC, qui nous questionnent directement, et l'intérêt manifeste du monde agricole pour cette question de l'adaptation. Cependant à cette phase du projet, peu de choses sont à nouveau engagées.

2.10 Conclusions

Nous avons proposé dans ce projet de construire un corpus de connaissance pour donner à penser le changement climatique dans le grand Ouest. Nous avons travaillé simultanément sur l'évolution du climat, sur l'impact du CC sur les ressources en eau et en sol, et sur l'agriculture, et enfin nous avons développé une vision prospective sur la perception du CC et les capacités d'adaptation au CC des agriculteurs du GO.

En terme scientifique, ce questionnement nous a permis de renouveler le point de vue et d'ouvrir ainsi de nouvelles pistes de recherche dans le terrain parfois rebattu des relations agriculture – environnement.

En terme opérationnel, l'importance des menaces, mais l'importance encore plus grande des incertitudes nous fait comprendre qu'il faut proposer des réponses "sans regret", c'est-à-dire des réponses qui permettront une moins grande vulnérabilité des systèmes agricoles et une plus grande résilience des ressources naturelles, quelques soient les évolutions à venir. Il s'agit in fine d'une opportunité pour élaborer des systèmes plus durables.

A cette phase du projet, le collectif CLIMASTER est persuadé – ce qui n'était pas donné d'avance –, qu'un projet sur le changement climatique était parfaitement à sa place dans le programme PSDR-GO, pour apporter aux acteurs du développement régional des références, outils et méthodes répondant à leurs besoins. Nous avons suivi B.Chevassut-au-Louis, qui résume ainsi la démarche qu'il faut développer pour travailler sur le CC : « analyser le risque climatique, pour en déduire des réponses appropriées aux 2 sens du terme » : les bonnes réponses, qui feront l'objet d'une appropriation par les acteurs.

Dans un futur proche, comme cela a d'ailleurs déjà commencé, les acquis de CLIMASTER seront bien valorisés face à des interrogations vis à vis du CC de la part des gestionnaires territoriaux et du monde agricole, interrogations qui montent de façon très forte en cette fin de programme.

2.11 Références

- Aniquin J.P., P. Debacke, B. Ilier, G. Lemaire, B. Seguin, F. Tardieu, A. Thomas (éditeurs). 2006. *Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau*. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA, 72 p
- Aurousseau, P., Vison, J. 2006. Mise en évidence de cycles pluriannuels relatifs aux concentrations et aux flux de nitrates dans les bassins versants de Bretagne. Conséquences pour l'interprétation de l'évolution de la qualité des eaux. In : *Qualité de l'eau en milieu rural. Savoirs et pratiques dans les bassins versants*. MIEROT, Ph (Eds). Edition Quae, 49-60
- Brisson, N. and Levrault, F., 2010. *Le vrai vert du projet CLIMATOR*. ADEME-INRA, Angers.
- David S. C. Thomas D.S.G. Twyman C., Othair H., Hewison B., 2007. Adaptation to climate change and variability: farmer responses to intra-seasonal precipitation trends in South Africa. *Climatic Change*, 83-3 : 301-322
- Décamps, H., 2010. *Environnements climatiques extrêmes. Réduire les vulnérabilités des systèmes écologiques et sociaux*. Rapport science et technologie. Acad. Sci., Paris.
- Dubreuil V., Mounier J., 1998. Recent evolution of spatial fluctuations of monthly rainfall in western part of France : in *Pre-regional conference meeting of the commission on climatology of the International Geographical Union « Climate and environmental change »*, Evora Portugal, août 1998.

- Ducharme, A., 2011. *Hydrologie continentale et environnement: Apports de la modélisation pour comprendre le milieu physique et les impacts de l'anthropisation*, HDR, UPMC.
- Dupont N., Dubreuil V., Planchon O. 2001. L'évolution récente des crues de la Vienne : le rôle des précipitations et de l'occupation du sol du bassin versant. *Pub. Assoc. Int. Climatologie*, 13
- Durand P., Ferchoud F., Salmon-Monviola J., Goetsch F., Martin C. 2006. *Etude sur l'évolution des paramètres nitrates dans les eaux brutes des bassins versants Bretagne (Est Pire et des autres bassins versants bretons) Volet 3 : Evaluation de l'impact des actions agricoles sur l'évolution des paramètres nitrates par l'utilisation de modèles déterministes Volet 4 : Evolution des paramètres nitrates dans les B.V. en fonction de plusieurs scénarios d'actions agricoles*. Rennes, INRA-Agros campus Rennes
- Graut G., Jarde E. 2005. Export of DOM by rivers: Assessing the relative effects of climate change and human activities using long-term records. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69: A759-A759.
- Haton F. (1993). *La prospective : pratiques et méthodes*. Paris, Economica.
- Jouan, D., 2005. *Etude des conséquences de l'évolution du climat induit par l'effet de serre sur la fréquence et l'intensité des perturbations cycloniques et sur la distribution des valeurs extrêmes du vent au sol en Europe de l'Ouest*. Thèse UHB
- Lémery B., 2003. Les agriculteurs dans la fabrique d'une nouvelle agriculture. *Sociologie du travail*, n° 45, 9-25.
- Narry J.B., 2003. *Pour une gestion spatiale de l'eau. Comment sortir du riyen* Ecopolis, Bruxelles, 242 p.
- Narry, J. B., Dufour, A., Poux, X., Cudennec, C. and Merot Ph., 2011. La polarisation civile des recherches. Comment éclairer le changement agro-environnemental. Le cas des marées vertes dans le bassin versant du Yar. *Revue d'anthropologie des connaissances*, 17p.
- Vaud V., Durand P., Merot Ph., Sautouat E., Sadi Z., 2005 - Modeling the impact of the spatial structure of a hedge network on the hydrology of a small temperate catchment. *Agr. Water Manage.*, 74, 135-163
- Weiss, K., Moser, G., & Germann, C. (2006). Perception de l'environnement, conceptions du métier et pratiques culturales des agriculteurs face au développement durable. *Revue Européenne de Psychologie Appliquée*, 56, 73-81

3. Impact du projet

Ce rapport rassemble des éléments nécessaires au bilan du projet et plus globalement permettant d'apprécier l'impact du projet à différents niveaux.

3.1 Valorisation scientifique

3.1.1 Actions de valorisation scientifique (à détailler en 3.1.2)

Publications et communications						
Diffusion	Type de publication	Tot al	Dont publications multi-partenaires	Dont publications mono-partenaires	Dont publications inter-régionales	Dont publications inter-disciplinaires
International	Revue à comité de lecture	9	2	8	4	2
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage	5	1	1	1	1
	Communication (conférences)	35	9	26	14	12
	Revue à comité de lecture	10	5	4	4	5
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage	2	1	1	2	1
France	Communication (conférences)	12	3	9	5	2
	Revue à comité de lecture					

Organisation de manifestations scientifiques				
Type de manifestation	Tot al	Dont multi-partenaires	Dont mono-partenaires	Dont inter-disciplinaires
Animation scientifique	1	1		1
Conférence internationale				
Colloque national ou international	1	1		1
Colloque régional				
Séminaire de recherche	5	5		5

3.1.2 Liste des publications et communications

Revue à comité de lecture (internationale)
Barbeau C., Joannon A., Barbeau G., Vineyard management in a climate change perspective.
Example of workable days for disease-control (en cours de rédaction pour *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*)
Dubreuil, V., Lamy, C., Lecerf, R. & Planchon, O. (2010) Monitoramento de secasna Bretonha : reconstrução histórica e abordagem por teledeteção. <http://www.mercator.ufc.br/index.php/mercator/article/view/536>, *Mercator*, 9, 107-119.

Gascuel-Odoux, C., Auroousseau, P., Durand, P., Ruiz, L. & Molénat, J. (2010) The role of climate on inter-annual variation in stream nitrate fluxes and concentrations. *Science of the Total Environment*, 408, 5657-5666.

Lambert T., Pierson-Wickmann A.-C., Gruau G., Thibault J.-N., Jaffréze A. (2011) Carbon isotopes as tracers of dissolved organic carbon sources and water pathways in headwater catchments. *Journal of Hydrology*, 402: 228–238.

Le Gouée, P., Delahaye, D., Bermond, M., Marie, M., Douvnet, J. & Viel, V. (2010) A large-scale assessment model of soil erosion hazard in Basse-Normandie (Northern-Western France). *Earth surface Processes and Landforms*, 30, 887-901.

Planchon, O., Quénel, H. & Corgne, S. (2009) Assessing precipitation and large-scale weather situations in Brittany : the usefulness of the Hess-Brezowsky classification. *Die Erde*, 140, 1-27.

Planchon, O., Quénel, H., Dupont, N. & Corgne, S. (2009) Application of the Hess-Brezowsky classification to the identification of weather patterns causing heavy winter rainfall in Brittany (France). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 1161-1173.

Quénel, H., Planchon, O. & Wahl, L. (2008) Méthodes d'identification des climats viticoles. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 51, 127-137.

Vaud, V., Angers, D. & Walter, C. (2010) Towards landscape-scale modelling of soil organic matter dynamics in agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 74, 1847-1860.

Ouvrage ou chapitre d'ouvrage (international)
Delahaye D., (2009). Modelling the watershed as a Complex Spatial System: A review. in *Modeling Process in Geography*, sous la direction Yves Guermont (eds), Wiley ed. 191-223
Dubreuil, V., Planchon, O., Quénel, H. & Bonnardot, V. (2010) Risques et changement climatique - actes du 23e colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC), Rennes, France.

P, Cantot O., Bernsard A. and Goulet A. (2011). SCALES: An Original Model to Diagnose Soil Erosion Hazard and Assess the Impact of Climate Change on its Evolution, in D. Godone and S. Stanich (Eds.), *Soil Erosion Studies*. ISBN: 978-953-307-710-9, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/articles/show/title/scales-an-original-model-to-diagnose-soil-erosion-hazard-and-assess-the-impact-of-climate-change-on->

Michel-Guillev, E. (in presse, à paraître en 2012). Representations of Climate Change by Water Managers. In S. Kabisch, A. Kunath, P. Schweizer-Ries & A. Steinführer (Eds), *Vulnerability, Risks and Complexity. Impacts of Global Change on Human Habitats*. Advances in People-Environment Studies (Vol. 3). Göttingen: Hogrefe & Huber Publishers.

Michel-Guillev, E. (soumis). Ressource en eau et changements climatiques : L'évaluation spatio-temporelle de problèmes environnementaux par des gestionnaires de l'eau. In F. Chlou-Ducharme (Ed), *Penser le présent comme un passé pour demain* (titre de la conférence). Rennes : PUR.

Communications (conférences internationales)
Aubert A., Mérot Ph., Gascuel-Odoux C., Grimaldi C., Gruau G., Ruiz L. (2011). A view of annual water quality cycle and inter-annual variations in agricultural headwater catchments (Kervidy-Naizin, France). AGU, San Francisco, 2011. Session H58: Seasonal Effects of Climate Variability and Change on Hydrological and Biogeochemical Processes?

Bensaïd, A., Cantat, O., Saint-Gerand, T. & Savouret, E. (2010) Conception et réalisation d'un logiciel pour la détermination automatique des types de temps. In: Actes du 23^e colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC). 71-76.

Bonnefoy, C., Quénol, H., Barbeau, G. & Madelin, M. (2010) Analyse climatique à l'échelle des coteaux du Layon. In: Actes du VIII International Terroir Congress. 109-114, Soave, Italie.

Bonnefoy C., Quénol H., Barbeau G. et Madelin M., 2009. Analyse multiscalaire des températures dans le vignoble du Val de Loire. *XXII^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*. Roumanie, août 2009. Actes dans *Geographia Technica. Numérisé spécial* 2009. p 85-90

Cantat, O., Le Gouée, P. & Bensaïd, A. (2009) Rôle de la topographie et des sols dans la modélisation spatiale d'échelle fine des bilans hydriques en Normandie. In: Actes des Journées de climatologie 2009, « Climat et relief ». 29-44. Comité National Français de Géographie, Commission «Climat et Sociétés», Besançon.

Cantat, O., Le Gouée, P., Bensaïd, A. & Savouret, E. (2010) Une méthode originale de spatialisation d'échelle fine des bilans hydriques. In: Actes du 23^e colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC). 101-106.

Corgne S., Alban T., Lecerf R., Hubert-Moy L., Planchon O., Bonnefoy C., 2011, Control de las variables biofísicas del captador MODIS sobre el viñedo de Saumur-Champigny del 2000 al 2010. Impacto del cambio climático a la escala de los "terroirs" vitícolas. Valparaíso, Chile.

Douvinet J., Planchon, O., Delahaye, D. & Cantat, O. (2008) Episodes pluvieux et types de circulations atmosphériques à l'origine des « crues rapides » dans le Nord de la France (Bassin Parisien). In: Actes du 21^e colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC). 207-213, Montpellier.

Douvinet, J., Viel, V., Delahaye, D., Langlois, P., Le Gouée, P. & Gaillard, D. (2008) Cellular modelling of muddy floods occurring in dry valleys : advances and challenges. In: European Geosciences Union, General Assembly. Vienne, Autriche.

Douvinet J., Delahaye D., Langlois P. (2009) – Complex systems in geomorphology: supplies and challenges. *Proc. of the Workshop on Dynamics in the Human Sciences - Cognitive, Behavioural, & Social Complexity*. ANR-NSF on Complex Systems, 27-28 avril 2009, Reims, France

Douvinet J., Delahaye D. (2010) – Triggering conditions and dynamics of flash floods occurring in northwestern France: a contribution to the risk assessment. Annual Meeting of the AAG (Association of American Geographers), Washington, April 14-18

Douvinet J., Fleurant C., Delahaye D., Caillaud S., Viel V., Ellerkamp P. (2011) Cellular automata and Multi-Agent Systems to better assess complex environmental problems : a review on French research over the last ten years. European Geosciences Union, General Assembly, 3–8 Avril 2011, Vienne, Autriche.

Dubreuil, V., Lamy, C., Lecerf, R., Planchon, O. & Funatsu, B.M. (2010) Monitoramento de secas na Bretanha : Reconstituição histórica e abordagem por teledeteção. In: IX Simposio Brasileiro de Climatologia Geográfica, Fortaleza, Brasil.

Dubreuil, V. & Planchon, O. (2009) Bilan d'un siècle d'observation des sécheresses et des types de circulations atmosphériques associées à Rennes. In: XXII^e colloque de l'AIC. 139-144. Geographia Technica. Cluj University Press.

Lambert T., Pierson-Wickmann A-C., Gruau G. (2011) Carbon isotopes as tracers of dissolved organic carbon sources and water pathways in headwater catchments. *EGU 2011 General Assembly*, 3-8 april, Vienna, Austria.

Lamy, C. & Dubreuil, V. (2010) Impact des sécheresses en Bretagne sur le bilan hydrique : modélisation à partir du climat d'années passées. In: Actes du 23^e colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC). 325-330, Rennes, France.

Lamy, C. & Dubreuil, V. (2011) Modélisation du bilan hydrique en Bretagne dans le contexte du changement climatique : cas du scénario A1B du GIEC. In: Actes du 24^e colloque de l'Association Internationale de l'AIC. sous presse.

Le Gouée, P., Cantat, O., Bensaïd, A. & Savouret, E. (2010) The farming system sensibility of the Normandy in connection with the Climatic Change (2000-2100). In: European Geosciences Union, Geophysical Research Abstracts. EGU2010-7048-2011

Le Gouée, P., Cantat, O., Bensaïd, A. & Savouret, E. (2010) La sensibilité des systèmes de production agricole en Normandie face au changement climatique (2000-2100). In: Actes du 23^e colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC). 331-336.

Lecerf, R., Planchon, O., Dubreuil, V. & Hubert-Moy, L. (2008) Impact de la variabilité climatique sur la dynamique de la végétation par télédétection moyenne résolution à l'échelle régionale : le cas de la Bretagne. In: Actes du XXII^e colloque de l'AIC. 385-390

Lespez, L., Viel, V., Germain-Vallée, C., Cadot, J.M. & Delahaye, D. (2009) Widespread silting up of valley bottoms on Normandy since 3000 BP, climatic and anthropogenic controls. In: International Association of Geomorphologists, Melbourne, Australie.

Lespez L., Viel V., Cadot J.-M., Germaine M.-A., Germain Vallée C., Rollet A.-J., Delahaye D., (2011) Les dynamiques environnementales des petits cours d'eau normands depuis le Néolithique. Quelles leçons aujourd'hui dans le cadre de la DCE ? Actes de la Commission des Hydrosystème Continentaux – UNIL, 11-13 Juillet 2011, Sion, Suisse.

Marchand, J.P., Planchon, O. & Bonnardot, V. (2010) Le climat vécu, une aide à la détermination des climats passés : les hivers à Laval (1481-1537). In: Actes du 23^e colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC). 373-378.

Michel-Guillou, E. (2010) Water managers and climate change: what they think about it? In: The 21th Conference of the International Association for People-Environment Studies (IAPS): "Vulnerability, Risk and Complexity: Impacts of Global Change on Human Habitats.

Merot, P., Gascuel-Oudou, C., Corgne, S., Delahaye, D., Joannon, A., Planchon, O., Arrondeau, J.P. & Desnos, P. (2008) CLIMASTER: climatic change, farming systems, natural resources and regional development. In: Agriculture, Water Management and Climatic Change, Bath, U.K.

Merot, P., Gascuel-Oudou, C., Delahaye, D., Le Gouée, P., Grimaldi, C. & Gruau, G. (2010) Impact du changement climatique sur la qualité des eaux dans les hydrosystèmes sous influence agricole : questions en suspens. In: 23^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC). 101-106.

Planchon, O., Quénol, H. & Corgne, S. (2008) Apport de la classification de Hess-Brezowsky pour la typologie des types de circulations pluvieuses hivernales en Bretagne occidentale. In: XXII^e colloque de l'AIC. 527-532, Montpellier.

Planchon, O., Quénol, H., Wahl, L., Cantat, O. & Bonnefoy, C. (2009) Types de circulations atmosphériques et types de temps en situations gélives dans les régions viticoles de la moitié nord de la France. In: XXII^e colloque de l'AIC. 371-376. Geographia Technica. Cluj University Press.

Quénol, H., Planchon, O. & Wahl, L. (2009) Identification and frequency of atmospheric circulation patterns causing spring frost in the northern French vineyards using the objective

version of the Hess–Brezowsky classification. In: European Geosciences Union General Assembly 2009, Geophysical Research Abstracts.

Viel V., Delahaye, D., Le Gouée, P. & J. D. (2009) Coupling soil erosion sensibility and runoff connectivity to assess slope contribution watershed sediment budget. In: International Association of Geomorphologists, Melbourne, Australie.

Viel V., Douvinet J., Delahaye, D. & Le Gouée, P. (2009) Connectivity of cultivated areas in bocage watersheds. In: European Geosciences Union, General Assembly, Vienne, Autriche.

Viel V., Delahaye D. (2011), Impact of climate change on the sensitivity of agricultural land to erosion hazard. International Association of Geomorphologists, 18 – 22 Février, Addis-Ababa, Ethiopie. Communication orale.

Viel V., Lespez L., Delahaye D., Le Gouée P. (2011) Establishing Holocene sediment budget for a small river catchment in western France. International union for Quaternary research, 20 – 27 juillet 2011, Berne, Suisse. Communication orale.

Viel V., Rollet A-J, Delahaye D., Lespez L., Cadot J-M., 2011 (accepté). Identification of sediment contributions to sediment budgets in a Western France ordinary stream: the case of the Seules river. Actes de la Commission des Hydrosystème Continentaux – UNIL, 11-13 Juillet 2011, Sion, Suisse.

Vongvixay, C., Grimaldi, C., Gascuel-Odoux, C., Laguionie, P., Fauchoux, M., Gillert, N. & Mayet, M. (2010) Analysis of suspended sediment concentration and discharge relations to identify particle origins in small agricultural watersheds. In: the ICCE symposium "Sediment Dynamics for a Changing Future". 76-82. IAHS

Revue à comité de lecture (nationale)

Arnaud-Fassetta G., Astrade L., Bardou E., Corbommois J., Delahaye D., Fort M., Gautier E., Jacob N., Peiry J.-L., Piégay H., 2009, Hydrogeomorphological contribution to flood-hazard analysis in fluvial-risk management, *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, n° 2, 109-128

Barbeau G., Coulon C., Neethling E., Bonnefoy C., Quénoel H., 2011. Le changement climatique et les interactions sol-climat. *Revue française de géologie*. N°168.

Bonnefoy, C., Quénoel, H., Planchon, O. & Barbeau, G. (2010) Températures et indices bioclimatiques dans le vignoble du Val de Loire dans un contexte de changement climatique. *ÉcoGéo*, 14, 13p.

Coulon C., Quénoel H., Garcia de Cortázar Atauri I., Barbeau G., 2009. La modélisation : un outil de pilotage du couple climat - vigne? *Revue française d'œnologie*. N° 235 – avril-mai 2009, p15-22.

Douvinet J., Planchon, O., Cantat, O., Delahaye, D. & Cadot, J.M. (2009) Variabilité spatio-temporelle des pluies de forte intensité à l'origine des « crues rapides » dans le Bassin parisien (France). *Climatologie*, 6, 47-72.

Douvinet J., Delahaye D., 2010. Caractéristiques des « crues rapides » du nord de la France (Bassin parisien) et risques associés. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, n°1, 73-90

Marie, M., Bensaïd A., Delahaye D. (2009) Le rôle de la distance dans l'organisation des pratiques et des paysages agricoles : l'exemple du fonctionnement des exploitations laitières dans l'arc atlantique, *CyberGéo : Revue européenne de Géographie*, article 460.

Marie, M., Bermond, M., Le Gouée, P., Delahaye, D. (2008) Intérêts et limites des statistiques agricoles pour l'étude des structures spatiales produites par l'agriculture en Basse-Normandie, *Norois*, 207(2), 21-33.

Marie, M., Le Gouée, P., Bermond, M. (2008) De la terre au sol : des logiques de représentations individuelles aux pratiques agricoles. Etude de cas en Pays d'Auge, *Etude et Gestion des Sois*, 15(1), 19-35.

Neethling E., Barbeau G., Quénoel H., Bonnefoy C. Evolution du climat et de la composition des raisins des cépages principaux cultivés dans le Val de Loire (soumis à *Climatologie*).

Ouvrage ou chapitre d'ouvrage (national)

Corbommois J., Jacob N., Delahaye D., Alber N., Arnaud-Fassetta G., Astrade L., Beck T., Castanet C., Delorme V., Douvinet J., El Ghachi M., Garlatti F., Joana-Torolmac G., Kane C., Masson E., Raccazi G., Rollet A-J, Thénard L., (2009), La recherche sur le thème de la dynamique fluviale : processus, aléa, aménagement. In : *Les géographies de l'eau : Processus, dynamique et gestion de l'hydrosystème*, Richard Laganiér, Gilles Arnaud-Fassetta (eds), édition l'Harmattan, pp. 229-298

Delahaye D., Douvinet J., Langlois P., (2011) Le bassin versant : de l'unité spatiale aux sous unités fonctionnelles. In : *qu'appelle-t-on aujourd'hui les sciences de la complexité ?*, sous la direction de G. Weisbuch et H. Zwirn (eds), Vuibert, pp. 301-322

Communications (conférences nationale)

Aubert, A., Gascuel C., Merot Ph., 2011. Describing annual water quality cycle and its inter-annual variations in agricultural headwater catchment (Keridy-Naizin, France). Strasbourg Colloque Réseau Bassin Versant-SOERE

Cantat, O., Le Gouée, P., Bensaïd, A. & Savouret, E. (2010) Réflexions à propos des stratégies d'adaptation des systèmes agricoles au Changement climatique en Normandie : constat et perspectives à l'horizon 2100. ERS, Environnement, Risques et Santé.

Coulon C., Quénoel H., Garcia de Cortázar Atauri I., Barbeau G., 2009. La modélisation : un outil de pilotage du couple climat - vigne? *48ème Congrès National des œnologues de France*, 5 juin 2009, Nantes

Lamy, C. (2011) Evolution du bilan de l'eau en Bretagne de 1950 à 2100. In: Journées de la commission « Climat et Société » du CNFG. Lyon.

Le Gouée, P., Cantat, O., Bensaïd, A. & Savouret, E. (2010) Evaluation et cartographie de la sécheresse des sols forestiers normands à l'horizon 2100 : des connaissances nouvelles pour une gestion durable des forêts. In: Actes, Festival de Géographie, Saint Dié les Vosges.

Marie, M. & Delahaye, D. (2009) De la caractérisation des formes parcellaires aux usages agricoles de l'espace. Essai de comparaison des logiques d'organisation des paysages en domaine laitier et bocager en Europe de l'Ouest (Galice, Normandie, Sud de l'Angleterre), Actes en ligne des 9^{ème} Rencontres ThéQuart, Besançon

Merot, P., Gascuel-Odoux, C., Delahaye, D., Le Gouée, P., Grimaldi, C. & Grunau, G. (2010) Impact du changement climatique sur la ressource en eau dans les AGRO-hydrosystèmes du grand ouest: questions de recherche. In: Ecole-Chercheurs Pour et Sur le Développement Régional, Bormannes, France.

Merot, Ph., Viaud V., 2011. Impact du changement climatique sur les sols et les eaux dans le grand ouest : une première approche (projets CLIMASTER et LANDSOIL), in Colloque inter ZA - Rennes 4 - 7 octobre 2011, Atelier n°4, Changements climatiques et des usages des sols : conséquences sur les écosystèmes"

Michel-Guillou, E. (2010) Problème local / problème global : La prise en compte de la dimension temporelle dans la dualité des problèmes environnementaux. In: 2nd Colloque fédérateur de l'Institut des Sciences de l'Homme et de la Société (ISHS-UBO) : « Penser le présent comme un passé pour demain », Brest, France

Michel-Guillou, E. (2011) Changement climatique et ressource en eau. Représentation et évaluation des problématiques environnementales par des questionnaires de l'environnement. In: 4ème Colloque ARPEV - L'individu et la société face à l'incertitude environnementale. Ifsttar, Lyon-Bron.

<http://arpev2011.ifsttar.fr/ARPEVrepresentations%20/session-perceptionMichelGuillou.pdf>.

Savouret, E. & Cantat, O. (2009) Identification et spatialisation des bioclimats. Les apports du couplage d'une approche naturaliste et de l'analyse des conditions climatiques. In: Actes des Journées de climatologie 2008, « Climat et végétation ». CCES. Comité National Français De Géographie) pp. 29-44, Nantes.

Vertes F., Léon A.S., Aussems E., van Tilbeurgh V., Thenail C. Place du changement climatique parmi les facteurs d'adaptation des systèmes fourragers dans les élevages laitiers du grand ouest de la France. 17èmes journées des Rencontres Recherche Ruminants, Paris 7-8 déc 2011 (poster + 1page)

Séminaire de recherche

Delahaye, D. & Gascuel-Oudou, C. (2011) Analyser et anticiper les interactions entre climat, ressource en sol et en eau, qualité des écosystèmes aquatiques (Projet Climaster) In: Séminaire PS DR Grand Ouest : Les activités halieutiques, agricoles et agroalimentaires dans les processus de développement territorial, Rennes, France.

Dubreuil, V. & Lamy, C. (2011) Mudanças climáticas no oeste da França: o caso das secas. In: Séminaire de lancement du Projet USP-COFEUCUB "Políticas públicas e impactos regionais e locais das mudanças climáticas sobre áreas frágeis".

Merot, P. (2011) Les enjeux du Changement Climatique pour les territoires du Grand Ouest. In: Séminaire PS DR Grand Ouest : Les activités halieutiques, agricoles et agroalimentaires dans les processus de développement territorial, Rennes, France.

Viel V., Delahaye D. (2011) Caractérisation des transferts sédimentaires d'un bassin versant situé à l'interface entre massif ancien et bassin sédimentaire. Journées des Jeunes Géomorphologues, 2 – 5 Février 2011, Avignon, France.

Document à vocation de transfert

Mandroux C., 2010. Changement climatique, qu'en est-il précisément dans le Val de Loire ? 26/11/2010. www.techniloire.com (d'après le rapport d'E. Neethling)

Mandroux C., 2010. Changement climatique et qualité des raiains dans le Val de Loire. 12/12/2010 www.techniloire.com (d'après le rapport d'E. Neethling)

Lucas, J.R. (2011) Réflexion prospective sur le climat : Bretagne, Normandie et Poitou-Charentes à la pointe. Terra, n°288, p.31

Neethling G., 2010. Relation entre le milieu physique et la qualité des raiains dans le Val de Loire. Evolution et perspective dans un contexte de changement climatique. 20/12/2010. www.techniloire.com Post doc

(voir les rapports d'étude et de stage en 3.3.2)

3.2 Valorisation opérationnelle

3.2.1 Actions de valorisation opérationnelle

Pas d'actions dans ce cadre

3.2.2 Liste des éléments de valorisation

Sans objet dans ce cadre

3.3 Valorisation par la formation

3.3.1 Actions de formation (à détailler en 3.3.2)

	Nomb re et année	Partenaires Impliqués	Cible	Format	Porte ur	Commentaire (formations avérées ou probables)
Thèses	3					
Stages	20					
Mémoires de fin d'étude	18					
Création de formations						
Création de modules de formation	1 en 2011	TRAME et Crab	Agriculteurs des groupes de discussion	Texte	Trame	Formation testée et démultipliée
Création de supports pédagogiques diffusables	1 en 2011	Trame et Crab	Animateurs des groupes de discussion	Diaporama	Trame	Support réutilisé plusieurs fois en Formation et en action de sensibilisation (ex : Alençon le 24/11)
Autres (préciser)						

3.3.2 Liste des éléments de formation

Rapport d'étude

Aussems, E., Léon, A.S., 2010. Mise en commun de résultats d'enquêtes menées chez des éleveurs laitiers du Grand Ouest pour Climaster. INRA, Rennes, p. 3AS Léon + E Aussems (2011)

Barbeau Christine, 2010. Méthodes et modèles pour le calcul des jours agronomiquement disponibles pour les travaux agricoles. Synthèse bibliographique réalisée dans le cadre du projet PS DR CLIMASTER (11p).

- Barbeau Christine, 2011. *Jours agronomiquement disponibles en viticulture. Exemple des traitements phytosanitaires à Montreuil-Bellay*. Rapport d'étude. Projet PSDR CLIMASTER. 47pp + annexes
- Etienne L., Corgne S., Planchon O., 2010. Analyse climatique en Vendée. Application au SAGE de la Vie et du Jaunay. Rapport d'étude, COSTEL UMR CNRS 65554 LETG, Université Rennes 2, 70 p.
- Herrault P.A., Corgne S., 2010. Analyse de l'occupation du sol et du réseau bocager sur le bassin de la Vie, du Jaunay et du Uignéon à partir de données de télédétection. Rapport d'étude, COSTEL UMR CNRS 65554 LETG, Université Rennes 2, 14 p.
- Josse, J., 2010. *Influence du changement climatique sur les zones humides*. In: Rapport interne. 17pp. INRA, UMR SAS.
- Monthy A., Gruau G., (2010) *Pollution des captages d'eau brute des Pays de Loire par les Matières Organiques. Variabilité Spatiale, Tendances Evolutives, Causes Possibles et Recommandations*. Rapport Final. DRASS des Pays de Loire, 65p.
- Planchon, O., Bensaid, A., Bernardot, V., Bonnefoy, C., Cantat, O., Delahaye, D., Douvnet, J., Dubreuil, V., Dupont, N., Lamarre, D., Lamy, C., Lecerf, R., Le Gouée, P., Quéno, H. & Savouret, E. (2011) *Les risques climatiques liés aux changements en cours dans la dynamique des masses d'air sur l'Europe Occidentale*. Rapport final de programme de recherche (non publié), p. 126 p. Appel d'offres « Evolution climatique, risques engendrés et impact sur la société », Financement : Fondation MAIF (2008-2010), Rennes.
- Mémoires de stage**
- Aussens, E. (2010) *Place du changement climatique parmi les facteurs d'évolution des systèmes fourragers dans les élevages laitiers du Grand Ouest de la France*, ESA Angers, Angers.
- Balcerak, M. (2010) *Influence des échanges nappes – cours d'eau sur la température des cours d'eau*. Mémoire de master, Université Rennes 1.
- Bellec, N. (2010) *Caractérisation de l'état hydrique des surfaces par télédétection*. Mémoire ACO Université de Lyon 1, INRA-umr-sas.
- Choupaut, S. (2010) *Diversité des successions culturales intégrant blé tendre et/ou maïs et des itinéraires de ces 2 cultures en Bretagne : Analyse à partir d'une base de données de 82 enquêtes et de 4 nouvelles enquêtes en exploitations agricoles*. Master 1 STS, biovigpa, université de rennes 1, Rennes.
- Denes, J. (2011). *Evolution de l'impact de l'évolution du climat sur la matière organique des sols dans des paysages de bocage de l'ouest de la France*. Ingénieur agronome, Agrocampus-Ouest.
- Floch, A.L. (2010) *Rôle de l'humidité et de la température sur la production de carbone organique dissous par le sol*. Master 2 : Sciences de la Mer et du Littoral : Sciences Chimiques de l'Environnement Marin, Université de Rennes 1, 20p
- Goulet, A. (2010) *Application d'un modèle de diagnostic de l'érosion des sols (SCALES) en Basse-Normandie : Analyse aux échelles saisonnière et mensuelle des effets du changement climatique*. Master 1 Ingénierie et Géosciences du Littoral, Université de Caen Basse Normandie.
- Jambou N., 2010. *Adaptation du modèle MESALES d'estimation de l'aléa érosif au contexte pédoclimatique et agricole du nord de l'île-et-Vilaine (Bretagne). Effet de l'évolution climatique et des pratiques agricoles sur l'aléa érosif estimé*. Mémoire de Master 2

- H3 (Hydrogéologie -Hydrobiogéochimie - Hydro pédologie), Université de Rennes 1, 21p + annexes.
- le Paven, E. (2011) *Modélisation de l'impact du changement climatique sur le fonctionnement d'un bassin versant : extension des zones humides et évolution des débits*. M2 H3, Université de Rennes 1, Rennes.
- Léon, A.S. (2010) *Influence des changements climatiques sur la gestion territoriale des exploitations de polycultures-élevage*. Mémoire de fin d'études, ENITA de Bordeaux, Rennes.
- Lucas J-R., 2011. *Diaporama d'avenir : Le Changement Climatique, Réflexion prospective sur les impacts* (72 diapos). Outil pour l'aide à la formation d'agriculteurs.
- Lucas J.R., Desros Ph., 2011 *Comptes-rendus des réunions de réflexion prospective à Saintes, à Saint-Laurent-de-la-Prée, à Corbois, à Saint-Ségol, TRAME*, 21 pp
- Lucas J.R., 2011. *Changement Climatique et conséquences sur les pratiques agricoles du Grand-Ouest" document préparatoire aux réunions d'agriculteurs pour une réflexion prospective sur le changement climatique*, TRAME – CRAB. Projet Climaster, 27pp.
- Martignac, F. (2009) *Evolution de l'habitat de l'Oir : Mise en évidence de la modification des compositions granulométriques du substrat d'un cours d'eau bas-normand*. Master Gestion des Habitats et des Bassins Versants, Université Rennes 1.
- Martin, T. (2010) *Sensibilité des différentes zones humides en Bretagne au changement climatique*. Master 2 Hydrogéologie-Hydrogéochimie-Hydro pédologie (H3), Université Rennes1-Agrocampus Ouest.
- Mayet, M. (2009) *Dynamique des MES et perspective de modélisation dans deux petits bassins versants agricoles de l'Ouest de la France*. Master Sol Eau Hydrosystème, Agrocampus Ouest.
- Méneut, Y. (2011) *Une analyse rétrospective de l'évolution des teneurs en matières organiques dans les retenues du Fémur (Pont Avez, Bois Jolly) et de la Haute-Rance (Rophemel) : Nouvelles contraintes sur l'évolution dans le temps de la contamination*. Master 1 H3 – Hydrogéologie, Hydrochimie, Hydro pédologie, Université de Rennes 1, 29p.
- Neethling G., 2010. *La relation entre le milieu physique et la qualité des ruisins : évolutions et perspectives*. Mémoire de fin d'étude international Master Vinage, Groupe-ESA
- Pauchard, L. (2011) *Sensibilité des agriculteurs aux questions environnementales. Mesure de l'adoption des pratiques agricoles aux changements globaux dans le bassin versant de la Seules*, Master 1 de Géographie « Sociétés, Territoires, Aménagement et Risques », Université de Caen Basse-Normandie, 142 p.
- Postic, S. (2009) *Représentation sociale du changement climatique auprès des gestionnaires de l'eau*. Master 1, option « Psychologie sociale des représentations Université de Bretagne Occidentale
- Poussot Sylvain, 2011-12. *Impacts du changement climatique sur les Jours Agronomiquement Disponibles. Application à la culture du blé dans des exploitations de polyculture-élevage de Bretagne*. Mémoire de fin d'étude, ESA d'Angers.
- Preux, T. (2011) *Dynamiques paysagères et agrandissement des exploitations agricoles. L'exemple du Bessin*, Master 1 de Géographie « Sociétés, Territoires, Aménagement et Risques », Université de Caen Basse-Normandie, 146 p..
- Raimbaut, T. (2009) *Mise en place du dispositif d'observation des jours agronomiquement disponibles dans un réseau d'exploitations agricoles bretonnes*. p. 19. INRA-SAD.

Rouxel M. (2011) *Modélisation du transport de COD dans les bassins versants sur socle : analyse des mécanismes mis en œuvre et effet du réchauffement climatique*. Mémoire de stage de post-doctorat. Université de Rennes 1, 65 p.

Tété, E. (2010) *Modélisation de la dynamique du carbone dans l'horizon A du sol et à l'échelle du paysage agricole*. Master 2 Hydrogéologie-Hydrogéochimie-Hydropédologie (H3), Université Rennes 1-Agrocampus Ouest.

Thomas, H. (2010) *Modélisation spatiale des zones sources en matières en suspension dans les bassins versants*. Master 1 Ingénierie et Géosciences Littorales, Université de Caen Basse-Normandie

Thèse (non financées par Climaster, mais ayant contribué)

Aubert A. (2010-2012) en cours : *variabilité climatique et qualité des eaux en Bretagne*. Agrocampus Ouest, Rennes

Lamy, C. (en cours) : *Sécheresse et changement climatique dans le Grand Ouest U. Rennes 2*

Marie, M. (2009) *Des pratiques des agriculteurs à la production de paysage de bocage. Etude comparée des dynamiques et des logiques d'organisation spatiale des systèmes agricoles laitiers en Europe (Basse-Normandie, Galice, Sud de l'Angleterre)*, Thèse de Doctorat de Géographie dirigée par D. Delahaye (Géophen) et P. Madeline (ESO-Caen), Université de Caen, 513 p.

3.4. Liste des livrables

Pas de livrables identifiés formellement au début du projet.

Date de livraison	N°	Titre du livrable	Nature du livrable	Partenaires (soutenant le responsable)	Commentaires
Début 2009		http://www.rennes.inra.fr/clima	Site internet	Univ. RENNES 1 ; Olivier Trocaz	
12/2011		CLIMASTER Changement climatique dans le Grand Ouest; quelles évolutions des systèmes agricoles et des ressources naturelles?	4-pages	Ph. Merot	
12/1012		Titre : Le climat change dans le Grand Ouest : Évaluation, Impact, Perception	Fait marquant INRA département E&A et SAD	Ph. Merot, A. Joannon	

3.5 Gouvernance de l'ensemble du projet de recherche

Les 3 premiers volets de recherche (Climat, ressource, agriculture) étaient autonomes dans leurs fonctionnement. Le travail sur la perception des agriculteurs a été mené au contraire en coordination avec une suite de 3 séminaires de travail animés par l'ASCA, et ont servi de fédérateur au projet. Ils ont réuni de 15 à 20 personnes à chaque fois, acteurs et chercheurs. L'objectif était notamment d'identifier les variables d'intérêt pour construire le questionnaire vis-à-vis des agriculteurs.

D'autres séminaires d'échange ont eu lieu lors des AG, en Décembre 2008, Novembre 2009 et Octobre 2010.

Les difficultés du projet étaient liées

- à des questions de financement (retard initial dans le financement, à l'absence de financement de thèse, complexité financière, difficulté sur les prestations de service, difficulté pour les acteurs d'adapter leur propre fonctionnement financier)

- à l'inter-régionalité : méconnaissance initiale des partenaires, difficultés concrètes liées à l'éloignement ; difficultés liées au déséquilibre numérique entre les équipes des différentes régions,

- à l'ambition même du projet, interdisciplinaire, inter-organisme, multi-sites, interrégional, multi financement, inter acteurs-chercheurs. Il y a sans doute une nécessité de faire des choix, avec notamment un meilleur ciblage disciplinaire.

L'inter-régionalité a été développée soit par un regard distant (télédétention) sur l'ensemble du GO, soit par des approches en général 2 à 2 ciblées sur un processus (érosion par exemple, entre Bretagne et Basse Normandie)

3.6 Bilan des contributions individuelles aux projets de recherche

3.6.1 Contributions des personnels des organismes de recherche et partenaires

Pour les équipes de recherche

VR 1	Nom	Prénom	Titre ou grade	CLIMAT			Temps effectif
				Discipline	Unité	Etablissement	
VR 2	Cantat	Olivier	ou grade MCF	Géographie	OSV&S-UNIV	Univ-Caen	4
	Dubreuil	Vincent	HDR	Géographie	OSV&S-UNIV	Univ-Rennes-2	4
	Planchon	Nicolas	HDR	Bioclimatologie	OSV&S-UNIV	Agrocampus	4
	Quénol	Hervé	HDR	Géographie	OSV&S-UNIV	Univ-Rennes-2	4
Changement climatique et changement de pratique							
VR 2		Prénom	Titre ou grade	Discipline	Unité	Etablissement	Temps effectif consacré au VR pour la période considérée (nb de mois ETP)
THENAIL	Claudine	CR	CR	Agronomie	SAD-Paysage	INRA	1
JOANNON	Alexandre	CR	CR	Agronomie	SAD-Paysage	INRA	4
CODET	Christophe	IR	IR	Enquêtes exploitation	SAD-Paysage	INRA	1

Résumé des différentes productions

Aide pour le remplissage

(H) Valorisation expérience : précieuse et la première expérience acquise pendant le projet.

Aubert A., Métrot Ph., Gascuel-Odoux C., Grimaldi C., Gruau G., Ruiz L., 2011. A view of annual water quality cycle and inter-annual variations in agricultural headwater catchments (Kervidy-Naizin, France).

Climatic conditions impact biotransformation and transfer of solutes. Therefore, they modify solute emissions in streams. Studying these modifications requires long term and detailed monitoring of both internal processes and river loads, which are rarely combined. The Kervidy-Naizin catchment, implemented in 1993, is part of the French network of catchment for environmental research (SODRE - RBV). It is an intensive agricultural catchment located in a temperate climate in Western France (Brittany) (Morel et al., 2009). It presents shallow aquifers due to impervious bedrock (Molénat et al., 2008). Both hydrology and water chemistry are monitored with a daily time step since 2000-01, as well as possible explanatory data (landuse, meteorology, etc.). Concentrations in major anions in this catchment are extremely high, which make people call it a "saturated" catchment.

We identified annual patterns for chloride, sulphate, dissolved organic and inorganic carbon and nitrate concentration variations. First, we considered the complete set of concentration data as function of the time. From that, we foresaw 3 cyclic temporal patterns. Then, from representing the concentrations as function of meteorological parameters, intra-annual hysteretic variations and their inter-annual variations were clearly identified.

Our driving question is to know if and how climatic conditions are responsible for variations of the patterns in and between years. In winter, i.e. rainy and cold period, rainfall is closely linked to discharge because of a direct recharge to the shallow groundwater. Conversely, in transition periods (spring and fall) and hot periods, both rainfall and temperature influences discharge in relation to their range of variations. Moreover, biological processes, driven by temperature and wetness, also act during these periods. On the whole, we can emphasize the specificity of water chemistry patterns for each element. Noticeable differences between hot and cold years and between wet and dry years can mainly be observed during spring and autumn period, i.e. when combining variations of rainfall and temperature. Further jointed statistical analyses between water chemistry and meteorology have to be carried on.

References

Molénat, J., Gascuel-Odoux, C., Ruiz, L., and Gruau, G. (2008). Role of water table dynamics on stream nitrate export and concentration, in agricultural headwater catchment (France). *Journal of Hydrology* 348, 363-378.

Morel, B., Durand, P., Jaffrezic, A., Gruau, G., and Molénat, J. (2009). Sources of dissolved organic carbon during stormflow in a headwater agricultural catchment. *Hydrological Processes* 23, 2888-2901.

AUTEUR : Emmanuel AUSSEMS Promotion 2005 - ESA Angers Patron de Mémoire : Annie SIGWALT	
Signallement du mémoire : Place du changement climatique parmi les facteurs d'évolution du système fourrager dans les élevages laitiers du Grand Ouest de la France. 137 pages, 34 tableaux, 27 figures, 6 annexes.	
Mots clés : Systèmes fourragers, changement climatique, élevage laitier, enquête, adaptations	
RESUME D'AUTEUR	
CONTEXTE	Dans un contexte de changement climatique admis par la communauté scientifique (GIEC, 2007), l'INRA a mis en place un programme de recherche intitulé PSDR Clim afin de comprendre et anticiper ces changements climatiques dans le Grand Ouest de la France. Ce travail contribue au volet 2 de ce programme : « Changement climatique et changement des pratiques agricoles ».
BUT	Son objectif est d'étudier les déterminants actuels et les adaptations des pratiques, des systèmes fourragers et des systèmes de production laitiers dans quatre régions du Grand Ouest de la France et de cerner la place du changement climatique – de manière indirecte – parmi les facteurs d'évolution de ces systèmes.
MATÉRIEL ET MÉTHODES	Nous avons choisi de travailler par enquêtes chez des éleveurs laitiers dans des zones climatiques contrastées : Bretagne (Basse-Normandie), Centre-Ouest-Bretagne, Haut-Auvergne (Pays de la Loire) et Vienne (Poitou-Charentes). Le choix des exploitations a été fait en fonction leur diversification (lait spécialisé, lait-viande, lait-cultures), et de la part du maïs dans la surface fourragère principale. Les entretiens visent à décrire les caractéristiques des systèmes de production, puis étaient très ouverts avec comme fil directeur la sécurité fourragère. Des entretiens complémentaires auprès d'experts locaux des systèmes fourragers ont permis d'avoir un regard plus global sur les évolutions régionales dans les élevages.
RÉSULTATS	Nous avons montré que le principal facteur d'évolution des systèmes fourragers est actuellement celui pour un futur proche) les contextes socioéconomique et réglementaire. Le changement climatique est perçu par 1/3 des éleveurs enquêtés, plus fréquemment en zones sèches, et les principales adaptations réalisées concernent plus les pratiques que des modifications des systèmes fourragers. Pour une zone donnée, les éleveurs herbagers perçoivent plus le changement climatique car ils ont un système fourrager plus tendu et une dépendance au climat plus forte que les systèmes basés sur le maïs. Les systèmes alimentaires maïs très intensifs dépendent néanmoins de l'accès à l'eau, et des importations de protéines.
CONCLUSION	Au regard de l'évolution si rapide de l'agriculture actuelle, celle du climat est aujourd'hui trop lente pour que les agriculteurs en ressentent des effets sur l'équilibre des systèmes fourragers. Ils sont par ailleurs peu informés des changements assez brutaux que pourraient provoquer le réchauffement climatique. Il faudrait donc améliorer ce point en vulgarisant davantage les travaux scientifiques (de plus en plus nombreux) réalisés à ce sujet, auprès des agriculteurs et des divers conseillers agricoles.

Bellec Nicolas

master "Caractérisation et gestion de l'atmosphère" à Lyon 1. 2010

Encadrant

Hervé Nicolas

Résumé

La télédétection est devenue un outil particulièrement indispensable pour l'analyse spatiotemporelle des tendances de l'évolution du climat. Ainsi, cette étude de l'état hydrique des surfaces sur quatre régions du grand ouest (Bretagne, Pays de la Loire, Poitou-Charentes, Normandie) utilise des données issues de l'instrument MODIS. Pour pouvoir étudier l'impact de la vague de chaleur de 2003 et comparer l'état des surfaces avec 2007 (année de pluviosité « moyenne »), trois indices ont été sélectionnés car ils permettent d'illustrer trois informations complémentaires de la surface : la structure du couvert végétal (NDVI), la teneur en eau des surfaces (NDII) et leur capacité d'évaporation (EF ou Evaporative Fraction). L'année 2003 a été marquée par une baisse globale des valeurs d'indice, forte pour les indices directement liés à l'état hydrique des surfaces (NDII et EF), et dans une moindre mesure pour le NDVI. Les variations les plus fortes se trouvent en Cotentin et à l'Est de la région Poitou-Charentes. Le Nord-Bretagne (notamment le bassin versant du Yar) semble avoir été relativement épargné, alors que le Sud-Bretagne (notamment le bassin versant du Scorff) montre une plus forte sensibilité à un épisode de vague de chaleur. D'autre part, les classes d'occupation du sol les plus marquées sont les zones agricoles hétérogènes et les prairies. L'étude a également montré que le dessèchement de la surface se traduit par une plus grande variabilité spatiale des indices liés à l'état hydrique des surfaces.

AIC 2010

UNE METHODE ORIGINALE DE SPATIALISATION D'ECHELLE FINE DES BILANS HYDRIQUES

Olivier CANTAT¹, Patrick LE GOUÉE¹, Abdelkrim BENSALD¹ et Edwige SAVOURET²

¹ GEOPHEN, Université de Caen Basse-Normandie, UMR 6554 CNRS, Esplanade de la Paix, BP 5186, 14032 Caen Cedex 5
² EneC (Espaces, Nature et Culture), Université de Paris IV-Sorbonne, UMR 8185 CNRS, 191 rue Saint Jacques, 75005 Paris

Résumé — La méthode de spatialisation du bilan hydrique présentée dans ce poster permet d'accéder à une connaissance fiable et détaillée de la diversité géographique des disponibilités en eau dans le sol. Comparativement aux données utilisées traditionnellement, les atouts de cette méthode découlent de l'intégration à très fine échelle des conditions de sols (réserve utile) et de relief (pente et exposition), en sus des données climatiques de base, le tout associé à des moyens de calcul performants.

Disposer d'une information quantitative précise et en de très nombreux points de la réserve utile apparaît comme une condition essentielle pour envisager une représentation réaliste à échelle fine du bilan hydrique. Tout récemment, l'établissement d'une carte des sols au 1/25000 sur le Calvados a permis d'accéder à cette connaissance « intime » des variations spatiales de la réserve agricole utile (Le Gouée, 2008). Il en a résulté pour ce département la possibilité de substituer aux 100 mm de réserve utile une valeur généralement retenue par défaut d'information dans les travaux cartographiques des valeurs « vraies », ici comprises entre 10 et 235 mm. La connaissance de la topographie de détail constitue le second volet majeur à prendre en compte pour obtenir un bilan hydrique valide à échelle fine car, en fonction de la pente et de l'exposition d'un terrain, la quantité d'énergie solaire peut varier beaucoup d'un point à un autre de l'espace. Cela se traduit sur les versants par des contrastes importants entre les valeurs d'ETp in situ et celles faisant office de référence régionale, calculées à partir d'une surface conventionnellement horizontale et en quelques points seulement du réseau d'observation. Grâce à l'apparition des Modèles Numériques d'Altitude (MNA) à fine résolution spatiale et au développement de la puissance des ordinateurs, il a été possible d'intégrer la composante topographique dans le calcul du rayonnement solaire global (Rich et al., 1994), grandeur qui contrôle majoritairement l'intensité des phénomènes évapotranspiratoires. L'ETp a été calculée selon la formule de Turc, légèrement modifiée pour rendre compte davantage des facteurs géoclimatiques locaux (Cantat et al., 2009).

Au final, pour le calcul du bilan hydrique, les trois composantes cardinales du système biopédoclimatique représentant l'offre (P), la demande (ETp) et la réserve (RU) ont été échantillonnées selon un maillage carré de 50 m de côté. L'offre a été calculée par krigeage des données pluviométriques de 27 stations météorologiques calvadosiennes et limitrophes ; la demande, évaluée d'après une ETp calculée en fonction des données astronomiques (hauteur solaire et durée du jour) et des caractéristiques topographiques de chaque point (pente et exposition) ; et la réserve, élément de régulation primordial dans les échanges hydriques, évaluée selon les valeurs de RU maximales issues de la carte détaillée des sols. L'écriture d'un programme en Visual Basic a permis d'automatiser les procédures de calcul pour les quelques 2,2 millions de points de grille nécessaires pour couvrir le Calvados. Enfin, l'utilisation de logiciels de cartographie a rendu possible la production de documents à très fine résolution spatiale pour évaluer à l'échelle de la parcelle l'évapotranspiration réelle, le déficit hydrique et les surplus hydrologiques, variables utiles au traitement de divers problèmes environnementaux (inondations, sécheresse, érosion des sols...).

Mots-clés : bilan hydrique, topographie, réserve utile des sols, modélisation spatiale, Normandie.

CNFG 2009

LE RÔLE DE LA TOPOGRAPHIE ET DES SOLS DANS LA MODÉLISATION SPATIALE D'ÉCHELLE FINE DES BILANS HYDRIQUES

Olivier CANTAT¹, Patrick LE GOUËE, Abdelkrim BENSALD

GEOPHEN, Université de Caen Basse-Normandie, UMR 6554 CNRS, Esplanade de la Paix, BP 5186, 14032 Caen Cedex 5

Résumé — Dans les régions à vocation agricole, le bilan hydrique matérialise les disponibilités en eau et en énergie dont les cultures ont besoin pour se développer. En sus des données climatiques de base (P et Etp), une connaissance très précise de la topographie (pente et orientation) et de la nature des sols (via leur réserve utile) est alors indispensable pour produire une cartographie à échelle fine valide. La modélisation présentée ici rend compte de la diversité spatiale du stress hydrique dans le Calvados à l'échelle de la parcelle. Les résultats diffèrent parfois assez sensiblement de ceux obtenus par les procédures « traditionnelles » (espace supposé plan et RU calée conventionnellement à 100 mm). Cette nouvelle lecture des contraintes hydriques, plus en accord avec les réalités du terrain, peut s'avérer utile pour les acteurs en charge de la gestion et de l'aménagement du territoire, mais aussi pour l'agriculteur puisque la fine résolution spatiale permet d'identifier les exploitations les plus affectées par le déficit en eau des sols agricoles.

Mots-clés : bilan hydrique, topographie, sol, modélisation spatiale, Calvados, Normandie.

ERS 2010

REFLEXIONS A PROPOS DES STRATEGIES D'ADAPTATION DES SYSTEMES AGRICOLES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE EN NORMANDIE

Olivier CANTAT¹, Patrick LE GOUËE², Abdelkrim BENSALD¹ et Edwige SAVOURET²

¹ GEOPHEN, Université de Caen Basse-Normandie, UMR 6554 CNRS, Esplanade de la Paix, BP 5186, 14032 Caen Cedex 5

² ENCG (Espaces, Nature et Culture), Université de Paris IV-Sorbonne, UMR 8185 CNRS, 191, rue Saint Jacques, 75005 Paris

Résumé — D'après le GIEC, la Normandie devrait connaître d'ici la fin du 21ème siècle une sécheresse estivale de plus en plus marquée. Cette perspective pose clairement la question des impacts du changement climatique sur le fonctionnement des écosystèmes et interroge sur les stratégies d'adaptation des systèmes agricoles dans une région où l'agriculture occupe plus des 3/4 du territoire.

Globalement, la hausse des températures et la baisse des précipitations accentueraient la sécheresse des sols en été, pénalisant ainsi les productions céréalières et fourragères. Cependant, un gain de production serait réalisable là où la réserve utile en eau des sols (RU) est importante. La cartographie du bilan hydrique [1] indicateur des ressources en eau superficielles du sol [2] présente à ce titre un enjeu capital pour apprécier la diversité spatiale de la sensibilité de l'agriculture normande face à l'évolution climatique annoncée.

L'apport de la recherche présentée lors du colloque Innovation et Précaution s'appuie en premier lieu sur une connaissance de la RU à l'échelle de la parcelle agricole grâce à plus de 7500 sondages pédologiques. Les valeurs mesurées [3] comprises entre 10 et 235 mm [2] rendent alors compte de la quantité d'eau réellement disponible pour les plantes, comparativement à la plupart des travaux où cette lame d'eau est calée par défaut à 100 mm. Concernant les pertes hydriques, la précision des modèles numériques d'altitude permet pour sa part de traduire en termes d'énergie disponible les effets topographiques d'ombre et de lumière modulant la demande évaporatoire du système atmosphère-plante-sol. En intégrant l'ensemble de ces données dans un programme informatique développé par nos soins, il a été possible de calculer puis de spatialiser à échelle très fine toutes les composantes du bilan hydrique jusqu'à l'horizon 2100.

In fine, sous réserve de confirmation des projections climatiques, les exploitants agricoles pourraient alors anticiper l'évolution des contraintes hydriques en fonction des caractéristiques de leurs terres et par conséquent développer des stratégies d'adaptation face à ces nouvelles conditions environnementales. Plus largement, la réalisation d'un atlas pourrait servir de support à la mise en place de programmes d'atténuation des effets négatifs du changement climatique sur l'économie agricole régionale.

Sarah CHOUPAULT, 2010. Diversité des successions culturales intégrant blé tendre et/ou maïs et des itinéraires de ces 2 cultures en Bretagne : Analyse à partir d'une base de données de 82 enquêtes et de 4 nouvelles enquêtes en exploitations agricoles.

Master STS 1^{ère} année, mention BAS, spécialité BioViEPA, Agrocampus Ouest - Université de Rennes 1 - Campus de Beaulieu, Avenue du Général Leclerc, 35042 RENNES CEDEX. (France)

Encadrement : Claudine Theriault

INRA SAD-Paysage - 65, rue de Saint-Brieuc - CS84215 - 35042 Rennes Cedex

RESUME

Les changements climatiques sont étudiés à l'échelle nationale mais très peu à l'échelle locale, d'où la conception du projet Climaster. Cette étude s'intègre dans la thématique du volet de recherche « Evaluation des changements de pratiques en cours dans les exploitations agricoles et prospectives ». A travers 82 d'enquêtes enregistrées dans la base de données « Agripays » et la détermination de 8 variables qui pourraient potentiellement expliquer les successions et itinéraires techniques, un test d'information mutuelle a été effectué afin de montrer le lien entre les variables. Beaucoup de ces tests se sont révélés non significatifs. Toutefois, certaines variables explicatives sont sorties du lot, telles que la température moyenne, la texture du sol ou le pourcentage de maïs par rapport à la SFP (surface fourragère principale). La prépondérance des parts de SFP, notamment du maïs, dans les systèmes de culture explique le choix des successions culturales. 4 nouvelles enquêtes ont été réalisées sur les changements de pratiques. D'après le raisonnement des exploitants, les modifications d'itinéraires de cultures du blé et du maïs seraient imputables à la variabilité climatique interannuelle et aux facteurs socio-économiques.

Mots clés : Climat, information mutuelle, orientation technique, assolement

LISSIES 2010

RECRUESCENCE DES CRUES RAPIDES PRINTANIERES ET ESTIVALES DANS LE NORD DE LA FRANCE ENTRE 1992 ET 2001 : UNE SIMPLE VARIABILITE D'ECHELLE DECENNALE, OU L'AMORCE D'UN CHANGEMENT CLIMATIQUE ?

JOHNINY DOUVINET¹, OLIVIER CANTAT², DANIEL DELAHAYE²

¹ Equipe d'Avignon, UMR ESPACE 6012 CNRS, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 74 rue Louis Pasteur, 84009 AVIGNON Cedex 1 (johniny.douvinet@univ-avignon.fr)

² Laboratoire GEOPHEN, UMR LETG 6554 CNRS, Université de Caen Basse-Normandie, Esplanade de la Paix, 14035 CAEN Cedex 5

Résumé – Des phénomènes de crues rapides, caractérisés par des écoulements sub-torrentiels fortement chargés en matériaux issus de l'érosion des sols, sont régulièrement observés en périodes printanière et estivale dans les régions du nord du Bassin Parisien (France). Alors que les seuils de déclenchement ne semblent pas avoir évolué dans le temps, leur nombre a, lui, augmenté sur la période 1992-2001. Ce constat n'est pas simple à expliquer. Sans enregistrer une augmentation ou un abaissement du seuil nécessaire à l'apparition de ces crues rapides, le déclenchement pourrait devenir plus systématique : i) si les systèmes précipitants présentent une plus grande étendue spatiale ; ii) si les maxima quotidiens donnent des hauteurs d'eau plus élevées ; iii) si l'intensité des pluies est plus importante alors que le cumul quotidien reste, lui, identique. Afin de vérifier ces hypothèses, la démarche retenue repose sur une analyse à plusieurs niveaux d'observation, de l'échelle régionale aux échelles fines. Si les records de pluies étudiés sur la période 1983-2005 sont bel et bien relevés entre 1992 et 2001, leur évolution n'est toutefois pas constante et les variations demeurent importantes entre les années. L'augmentation des pluies de plus de 30 mm et une augmentation de leur fréquence pourraient, en revanche, expliquer cette recrudescence des crues rapides dans le nord de la France à l'échelle régionale. Des variations peuvent également exister localement entre les stations, ce qui perturbe les analyses. Tous ces résultats alimentent finalement la discussion actuelle autour d'un éventuel « réchauffement climatique ».

Mots clés : crues rapides, nord de la France, variabilité, aléa climatique.

MONITORAMENTO DE SECAS NA BREITANHA : RECONSTITUIÇÃO HISTÓRICA E ABORDAGEM POR TELEDETECÇÃO.

Dubreuil V., Lamy C., Lecerf R., Planchon O., Funatsu B. M.
COSTELETG - UMR 6554 CNRS et FR CAREN, Université Européenne de Bretagne,
Rennes 2, Place du Recteur H. Le Moal, 35043 Rennes Cedex
Vincent.dubreuil@univ-rennes2.fr

Resumo :

A Breitanha, como a maior parte de outras regiões francesas, sofre ocasionalmente com secas de duração e intensidade variáveis. O objetivo deste estudo é de analisar o impacto das secas sobre os recursos hídricos e sua evolução à partir do século XIX. Foi utilizado um modelo de balanço hídrico adaptado para escala regional para diversas estações na Breitanha (Rennes, Plougonvelin, Nantes, etc.). A deficiência da evaporação calculada em escala temporal mensal destaca a variabilidade espaço-temporal da seca. Em escala temporal anual, é observada uma leve intensificação que resulta essencialmente do aumento do déficit no mês de agosto, no fim do verão. A utilização dos dados do índice de vegetação (NDVI) derivados das imagens SPOT-Vegetation permite estabelecer a extensão horizontal desse fenômeno. Análises para o ano de 2003 (ano da última grande seca na França Ocidental) mostram uma boa relação entre o NDVI e a evapotranspiração, entretanto os efeitos bidirecionais, os ângulos de visada, bem como os algoritmos utilizados podem afetar significativamente os valores do NDVI.

Abstract:

Brittany, as many French territories, experiences sometimes drought issues which can vary in intensity and duration. The aim of this study is to determine the impacts of droughts on soil water resources since the early XIXth century. Thus, a soil water balance suited to regional scales was used and applied to different cities of Brittany and surroundings such as Rennes, Plougonvelin and Nantes. The evaporation deficiency obtained at a monthly scale revealed droughts intensity and inter-annual variability. At a yearly scale a positive tendency of the deficiency was noticed. At a monthly scale the inter-annual variability was clearly shown and revealed a 4-year period rhythm with soils lacking of water for one summer month. Finally, we used the NDVI calculated from SPOT-Vegetation images for monitoring the spatial extent of drought in Brittany. For 2003 (the last great drought observed in western France), we found a good relationship between the NDVI and the evapotranspiration but bidirectional reflectance effects, angular values and composing's procedures may also have a great impact on observed values of NDVI.

Palavras-chave : Seca, mudanças climáticas, NDVI, NOAA-AVHRR, Breitanha
Keywords: Drought, global climate change, NDVI, NOAA-AVHRR, Brittany

Floch Anne Lise, 2010; Rôle de l'humidité et de la température sur la production de carbone organique dissous par le sol, M2 Sci de la Mer et du Littoral; Science chimique de l'environnement marin (VR3)

Résumé : Pour évaluer l'impact du climat sur la production en carbone organique dissous (COD) dans les sols, des expériences d'incubation de sol ont été réalisées à température et humidité contrôlées pendant 56 jours. Pour cela quatre modalités ont été mises en place : 10 °C et 30 °C à humidité constante (0.37 g/g, 10 °C H, 30 °C H), 30 °C à humidité décroissante (de 0.37 à 0.25 g/g, 30 °C S) et 30 °C à forte décroissance d'humidité (de 0.37 à 0.07 g/g, 30 °C S+). A différentes dates (0, 7, 21, 35, 56 jours), la production en COD, les concentrations en CO₂ dégagées et l'absorbance UV ont été suivies. La température a un léger effet positif sur la production en COD (+83 % entre 10 °C H et 30 °C H en 56 jours) avec une diminution du % d'aromaticité. Cet effet semble se produire dans la première semaine de l'incubation après la réhumectation à capacité au champ. Le facteur de contrôle pourrait donc être une combinaison de la température et de l'humidité. Une forte diminution d'humidité provoque une augmentation de la production en COD (+86 % entre H et S+) avec une faible diminution du % d'aromaticité du COD. Cet effet négatif d'une diminution d'humidité pourrait être expliqué par la lyse des cellules microbiennes provoquée par un choc osmotique. L'humidité semble être l'effet prépondérant de contrôle de production de COD par le sol.



The role of climate on inter-annual variation in stream nitrate fluxes and concentrations

Chantal Gascuel-Odoux^{a,b,*}, Patrick Durand^{a,b}, Laurent Ruiz^{a,b} and Jérôme Molénat^{a,b}

^a INRA, UMR 1069, Sol Agro and hydrosystem, F-35000 Rennes, France

^b Agrocampus Ouest, UMR 1069, Sol Agro and hydrosystem, F-35000 Rennes, France

^c Université Européenne de Bretagne, France

Received 8 January 2009;

revised 26 April 2009;

accepted 4 May 2009.

Available online 3 June 2009.

Abstract

In recent decades, temporal variations in nitrate fluxes and concentrations in temperate rivers have resulted from the interaction of anthropogenic and climatic factors. The effect of climatic drivers remains unclear, while the relative importance of the drivers seems to be highly site dependent. This paper focuses on 2–6 year variations called meso-scale variations, and analyses the climatic drivers of these variations in a study site characterized by high N inputs from intensive animal farming systems and shallow aquifers with impervious bedrock in a temperate climate. Three approaches are developed: 1) an analysis of long-term records of nitrate fluxes and nitrate concentrations in 30 coastal rivers of Western France, which were well-marked by meso-scale cycles in the fluxes and concentration with a slight hysteresis; 2) a test of the climatic control using a lumped two-box model, which demonstrates that hydrological assumptions are sufficient to explain these meso-scale cycles; and 3) a model of nitrate fluxes and concentrations in two contrasted catchments subjected to recent mitigation measures, which analyses nitrate fluxes and concentrations in relation to N stored in groundwater. In coastal rivers, hydrological drivers (i.e., effective rainfall), and particularly the dynamics of the water table and rather stable nitrate concentration, explain the meso-scale cyclic patterns. In the headwater catchment, agricultural and hydrological drivers can interact according to their settings. The requirements to better distinguish the effect of climate and human changes in integrated water management are addressed: long-term monitoring, coupling the analysis and the modelling of large sets of catchments incorporating different sizes, land uses and environmental factors.

Keywords: Climate; Agricultural practices; Nitrate; Modelling; Long-term record



Josse Jim EN 159

Rapport de recherche juillet/aout 2010



Influence du changement climatique sur les zones humides

Résumé

Cette étude se fait dans le cadre programme de recherche Climaster et utilise le scénario climatique A1b du GIEC sur un siècle. L'objectif est de rechercher l'influence du changement climatique sur le comportement hydrologique des zones humides. On cherche ici à déterminer l'évolution de ces zones en réponse au changement des conditions météorologiques, ceci en fonction de leur position au sein du bassin versant. Leur position s'identifie par l'ordre de Stralher du bief auquel elles appartiennent. Autrement dit, il s'agit de mettre en évidence une différence de réponse entre les zones humides d'amont et d'aval de bassin versant vis à vis du climat.

Dans ce but, des données climatiques issues du scénario A1b du GIEC et régionalisées par AgroClim (INRA) pour le projet Climaster ont été utilisées et appliquées au bassin versant du Scorff, en Bretagne.

Ce scénario climatique se traduit ainsi par une augmentation des événements météorologiques à forte pluviométrie ($p > 30 \text{ mm/j}$) mais également par une augmentation de la fréquence des événements à faibles précipitation ($p < 10 \text{ mm/j}$) par rapport à des événements qui occasionnent des précipitations moyennes. On retrouve ce phénomène lorsqu'on fait une distinction par trimestre des périodes.

Les résultats soulignent une plus grande sensibilité des zones humides d'amont vis à vis du changement climatique par rapport aux zones humides situées en aval du bassin versant. De ce fait, dans le cadre d'un programme de gestion environnemental, des actions territorialisées semblent indispensables pour assurer la préservation de ces zones naturelles.

AIC 2010

LA SENSIBILITE DES SYSTEMES DE PRODUCTION AGRICOLE EN NORMANDIE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE (2000-2100).

Patrick LE GOUEE¹, Olivier CANTAT¹, Abdelkrim BENSALD¹ et Edwige SAVOURET²

¹ GEOPHEN, Université de Caen Basse-Normandie, UMR 6554 CNRS, Esplanade de la Paix, BP 5186, 14032 Caen Cedex 5
² Emec (Espaces, Nature et Culture), Université de Paris IV-Sorbonne, UMR 8185 CNRS, 191 rue Saint Jacques, 75005 Paris

Résumé — L'économie agricole française est très étroitement contrôlée par les conditions météorologiques. La sécheresse liée à la canicule de 2003 a affecté l'état de la végétation en conduisant à un ralentissement significatif de l'activité photosynthétique. Cela s'est traduit par une réduction conséquente de la production agricole, notamment pour les cultures et les fourrages. Le réchauffement du climat amorcé depuis la fin du 19ème siècle et qui semble devoir se poursuivre et s'amplifier au 21ème siècle (rapport du GIEC, 2007) pose la question de la sensibilité dans le futur des systèmes de production agricoles face au changement climatique.

En France, des travaux récents (Cloppet et al, 2009) ont conduit à une spatialisation sur le territoire national des caractéristiques climatiques à venir selon divers scénarios. Quel que soit le scénario envisagé, il semblerait que le type de climat actuel normand disparaisse d'ici la fin du siècle au bénéfice d'un temps marqué par une évapotranspiration, des températures minimales et maximales ainsi qu'une vitesse du vent et un rayonnement solaire plus élevés. Globalement, cela aurait pour conséquence d'accentuer l'impact négatif de la sécheresse des sols agricoles sur les productions des grandes cultures et des pâturages (Burlaui, 2009, Ruget & Brisson, 2007). Cependant, il semblerait que cette évolution climatique apporterait un gain de production dès lors que la réserve utile des sols permettrait d'empêcher ou de limiter fortement l'apparition du stress hydrique.

L'évaluation et la cartographie à fine résolution spatiale de cet indicateur pédo-climatique pour la période actuelle et pour l'horizon 2100, d'après le scénario A1B du GIEC, présentent à ce titre un enjeu capital pour tenter d'apprécier la sensibilité de l'agriculture normande face à l'évolution climatique annoncée pour la fin du 21ème siècle. Ce travail exploratoire a été mené sur l'ensemble du territoire du Calvados (5500 km²). Pour y parvenir, il a fallu préalablement élaborer une cartographie précise des sols sur la base de 7514 sondages réalisés à la tarière à main. Le traitement de la base de données pédologiques a rendu possible la conception d'une carte des réserves utiles au 2500ème. Par la suite, la modélisation et la cartographie des conditions évapotranspiratoires locales ainsi que la cartographie départementale des précipitations ont alimenté un algorithme de calcul du bilan hydrique à fine résolution spatiale. L'estimation et la représentation cartographique de la sécheresse des sols (déficit hydrique) pour la période actuelle et pour 2100 selon le scénario A1B a été obtenue alors par requêtes de la base de données pédo-climatique.

Pour la période actuelle, les résultats montrent que, dans le Calvados, la sécheresse des sols agricoles de faible intensité concerne un peu plus de 1100 km², soit le tiers de la superficie des surfaces agricoles déclarées (3500 km²). La sécheresse édaphique de forte intensité apparaît très circonscrite puisqu'elle ne s'étend que sur 182 km² (environ 5% de la SAU déclarée). Les résultats obtenus pour 2100 sont particulièrement alarmants. Ils témoignent d'un accroissement spectaculaire des surfaces agricoles touchées par une sécheresse des sols de forte intensité. Celles-ci représenteraient près de 2500 km², soit 70% de la SAU déclarée. Si un tel scénario devait se confirmer, c'est toute l'économie agricole normande qui s'en trouverait profondément affectée.

Mots clés : Agriculture, Normandie, sécheresse, sol, changement climatique

EGU 2010

THE FARMING SYSTEM SENSIBILITY OF THE NORMANDY IN CONNECTION WITH THE CLIMATIC CHANGE (2000-2100)

Patrick LE GOUEE¹, Olivier CANTAT¹, Abdelkrim BENSALD¹ et Edwige SAVOURET²

¹ GEOPHEN, Université de Caen Basse-Normandie, UMR 6554 CNRS, Esplanade de la Paix, BP 5186, 14032 Caen Cedex 5
² CEGUM, EA 1105, Université de Metz, 57000 Metz

Abstract — The French agricultural economy is closely connected with weather-climatic conditions. For example, dryness caused by the heat-wave of 2003 seriously affected the vegetation leading to a significant slowdown of photosynthetic activity. This resulted in logical decrease of agricultural production, in particular for arable lands and fodders. The Global warming that has begun at the end of the 19th century and seems to continue and even intensify during the 21st century (GIEC, 2007) arises a question of farming system sensibility when faced with Climate Change in the future.

In France, recent studies (Cloppet and al, 2009) have conducted to the probable climate features spatialization on the national territory according to different scenarios. Whatever the scenario considered, it seems that the present Norman climate type is going to disappear by the end of century to be supplanted by a type of weather influenced by raising evapotranspiration, minimal and maximum temperatures as well as a raising speed of wind and solar radiation. Globally, this could emphasize agriculture soil dryness negative impact on large cereal land and pastures production (Burlaui, 2009, Ruget & Brisson, 2007). However, this climatic evolution could bring some production gain when the available water content of soils allows preventing or strongly limiting the hydrous stress emergence.

For the current period and horizon 2100, according to the scenario A1B of the GIEC, the evaluation and the mapping with fine spatial resolution of this pedo-climatic indicator present a capital stake to appreciate the sensibility of the agriculture of the Normandy in connection with the climatic evolution announced for the end of the 21st century.

This exploratory work has been undertaken for the departmental territory of Calvados (5500 km²). For that purpose, it has been necessary beforehand to work out a precise mapping of soils on the basis of 7514 soil boreholes. The treatment of the soil database has allowed to design a map of the available water content of soils for the 1:25,000 scale.

Thereafter, the modelling and the mapping of the local evapotranspiration conditions as well as the departmental mapping of rainfalls have permitted to elaborate a calculation algorithm of hydrological balance with fine spatial resolution. The estimate and the cartographic representation of the soil dryness (hydrous deficit) for the current period and 2100 according to the scenario A1B have been obtained then by requests of the pedo-climatic database.

For the current period, as far as Calvados is concerned, the results show that, the dryness of the agricultural soils of low intensity concerns a little more than 1100 km², which means one the third of the agricultural area (3500 km²). The soil dryness of strong intensity appears very circumscribed since it extends only on 182 km² (approximately 5% of agricultural area). For 2100, the results are particularly alarming. They testify to a spectacular increase in the agricultural area touched by soil dryness with a strong intensity. These would represent nearly 2500 km², which represents 70% of the agricultural area. If this kind of scenario was to be confirmed, it is all the agricultural economy of Normandy which would be deeply affected.

FIG 1010

EVALUATION ET CARTOGRAPHIE DE LA SECHERESSE DES SOLS FORESTIERS NORMANDS A L'HORIZON 2100 : DES CONNAISSANCES NOUVELLES POUR UNE GESTION DURABLE DES FORETS.

PATRICK LE GOUÉE¹, OLIVIER CANTAT¹, ABDELKRIM BENSALD¹ et EDWIGE SAVOURET²

¹ GEPHEN, Université de Caen Basse-Normandie, UMR 6554 CNRS, Esplanade de la Paix, BP 5186, 14032 Caen Cedex 5

² CECUM, EA 1105, Université de Metz, 57000 Metz

Résumé – Le Grenelle de l'environnement a confirmé la nécessité de diviser par 4 nos émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050. Cet objectif s'applique sur une évolution des modes de production d'énergie : dépasser 20 % d'énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie en 2020. La forêt, en tant que ressource de biomasse (matériau et bois énergie) sera mise à contribution dans le cadre d'un programme de mobilisation durable s'appuyant sur le principe de dynamisation de la filière forêt-bois tout en protégeant la biodiversité forestière ordinaire et remarquable.

Pour lutter contre le changement climatique, la forêt représente un levier puissant qui n'a pas manqué d'être souligné dans la loi d'orientation agricole du 5 janvier 2006 : « La gestion forestière et la valorisation des produits forestiers contribuent à la réduction des émissions nationales de gaz à effet de serre et au développement des énergies renouvelables ». Cependant, pour remplir efficacement ce rôle, la forêt devra pouvoir maintenir son potentiel de production de biomasse dans un contexte où le réchauffement climatique apparaît comme une contrainte à son bon développement (sécheresse, incendie, insectes ravageurs...). Le rapport du GIEC (2007) a montré que de nombreuses espèces forestières du Nord-Ouest de l'Europe vont être fortement fragilisées et menacées de disparition (chêne pédonculé, hêtre) en raison du renforcement de la sécheresse des sols.

En France, les conséquences immédiates ou différées de la canicule de 2003 ont amené les sylviculteurs à repenser les pratiques de gestion sylvicole dans un contexte de réchauffement climatique à long terme. Parmi les pratiques proposées, on peut citer (1) la généralisation de la futaie claire régulière ou irrégulière et de la forêt mosaïque, (2) le raccourcissement des révolutions par une gestion plus dynamique et (3) la production de synthèses sur l'autoécologie des essences. Plus encore, il semble que l'attention des forestiers porte plus particulièrement sur les modalités de renouvellement des peuplements : maintenir les essences actuelles lorsque l'augmentation du stress hydrique n'est pas envisagée ou très limitée et en planter de nouvelles capables de résister au renforcement de la sécheresse édaphique. Cette dernière pratique suppose de disposer d'informations prospectives robustes concernant le diagnostic spatial du bilan hydrique. Il s'agit plus particulièrement de cartographier, à l'échelle locale, les conditions de stress hydrique actuelle et celles estimées à l'horizon 2100. En effet, le degré de résistance à la sécheresse des sols des essences forestières est un facteur essentiel pour la croissance et la survie des arbres.

En Normandie, la question du renouvellement des peuplements relatif au changement climatique occupe une place grandissante dans l'élaboration ou la révision des documents de gestion de la forêt. En effet, des travaux récents (Cloupet et al., 2009) montrent que, quel que soit le scénario envisagé, le type de climat actuel normand tendrait à disparaître d'ici la fin du siècle au bénéfice d'un temps marqué par une évapotranspiration, des températures minimales et maximales ainsi qu'une vitesse du vent et un rayonnement solaire plus élevés. Cette évolution climatique se traduirait donc par une intensification du stress hydrique. Dès lors pour les forestiers, l'accès à des connaissances nouvelles tournées vers l'évaluation prospective et la cartographie fine de la sécheresse des sols devient une véritable nécessité.

Ce travail exploratoire a été mené dans le Calvados à propos des principaux massifs forestiers, ce qui représente une superficie totale de près de 14000 ha. Pour y parvenir, il a fallu préalablement élaborer une cartographie précise des sols sur la base de 254 sondages réalisés à la tarière à main. Le traitement de la base de données pédologiques a rendu possible la conception d'une carte des réserves utiles au 25000ème. Par la suite, la modélisation et la cartographie des conditions évapotranspiratoires locales ainsi que la cartographie départementale des précipitations ont alimenté un algorithme de calcul du bilan hydrique à fine résolution spatiale. L'estimation et la représentation cartographique de la sécheresse des sols forestiers normands (déficit hydrique) pour la période actuelle et pour 2100 selon le scénario A1B a été obtenue alors par requêtes de la base de données pédo-climatique.

Pour la période actuelle, les résultats montrent que la sécheresse des sols forestiers de faible intensité concerne environ 8300 ha soit 59% de la superficie totale des principales forêts du Calvados. Les 5700 ha restants renvoient à une sécheresse édaphique d'intensité moyenne. Les résultats obtenus pour 2100 montrent une accentuation spectaculaire du déficit hydrique. 11000 ha de forêt seraient touchés par une sécheresse des sols de forte à très forte intensité. Cela représenterait près de 79% des principaux massifs forestiers. Ce travail original, transposable dans la plupart des régions françaises, confirme l'urgence de prendre en considération l'impact du changement climatique dans la production de documents de planification forestière en vue d'une gestion durable des forêts.

Mots clés : Agriculture, Normandie, sécheresse, sol, changement climatique

ISDA 2010

QUAND LE GÉOGRAPHE FAIT DU SOL UNE INTERFACE ESSENTIELLE ENTRE AGRICULTURE DURABLE, SOCIÉTÉ ET ENVIRONNEMENT. EXEMPLE DE DEUX ÉTUDES DE CAS TRAITÉES EN BASSE-NORMANDIE (FRANCE)

PATRICK LE GOUÉE, MAXIME MARIE, OLIVIER CANTAT, ABDELKRIM BENSALD

Esplanade de la Paix, 14 032 Caen Cedex. Université de Caen Basse-Normandie, patrick.legouee@unicaen.fr

Résumé – Le sol est une ressource naturelle vitale au même titre que l'eau. Reconnu comme une interface majeure dans l'environnement, il constitue tout à la fois un véritable système écologique, un réservoir de biodiversité, un support passif des activités urbaines et industrielles ainsi qu'un facteur essentiel de productions agricoles et sylvicoles. Pour ces raisons, le sol constitue un patrimoine dont la gestion durable doit s'imposer comme une priorité tant au niveau local, national qu'international. Cette position se justifie aussi par l'accélération et la multiplication des formes de dégradation anthropique des sols depuis une cinquantaine d'années. Dans un contexte actuel de réchauffement climatique perturbant à moyen et long terme les composantes naturelles et les pratiques humaines des milieux, cette position se justifie également dans la mesure où le sol est considéré de plus en plus comme un patrimoine dont la protection permettra de renforcer la résilience des fonctions environnementales et sociétales des territoires. A partir de deux études de cas développées en Basse-Normandie (1) la première abordant la question de l'adéquation des pratiques agricoles actuelles face au changement climatique annoncé, (2) la seconde se positionnant sur les enjeux agri-environnementaux liés à la consommation du foncier agricole par l'étalement urbain, il s'agit de montrer comment le géographe peut s'approprier les connaissances sur les sols pour développer des applications originales, soulignant la nécessité que cette ressource naturelle soit reconnue par les organismes décisionnels locaux et régionaux et par les acteurs économiques comme une interface incontournable entre agriculture durable, société et environnement.

Mots clés : sol, géographie, interface, société, agriculture durable

SCALES: a large-scale assessment model of soil erosion hazard in Basse-Normandie (northern-western France)

P. Le Gouée, D. Delahaye, M. Bermond, M. Marie, J. Douvinet¹, V. Viel, 2010

Earth Surface Processes and Landforms

Volume 35, Issue 8, pages 887–901, 30 June 2010

The cartography of erosion risk is mainly based on the development of models, which evaluate in a qualitative and quantitative manner the physical reproduction of the erosion processes (CORINE, EHU, INRA). These models are mainly semi-quantitative but can be physically based and spatially distributed (the Pan-European Soil Erosion Risk Assessment, PESERA). They are characterized by their simplicity and their applicability potential at large temporal and spatial scales. In developing our model SCALES (Spatialisation de l'Aléa fine de l'ALéa Erosion des Sols/large-scale assessment and mapping model of soil erosion hazard), we had in mind several objectives: (1) to map soil erosion at a regional scale with the guarantee of a large accuracy on the local level, (2) to envisage an applicability of the model in European oceanic areas, (3) to focus the erosion hazard estimation on the level of source areas (on-site erosion), which are the agricultural parcels, (4) to take into account the weight of the temporality of agricultural practices (land-use concept). Because of these objectives, the nature of variables, which characterize the erosion factors and because of its structure, SCALES differs from other models. Tested in Basse-Normandie (Calvados 5500 km²) SCALES reveals a strong predisposition of the study area to the soil erosion which should require to be expressed in a wet year. Apart from an internal validation, we tried an intermediate one by comparing our results with those from INRA and PESERA. It appeared that these models under estimate medium erosion levels and differ in the spatial localization of areas with the highest erosion risks. SCALES underlines here the limitations in the use of pedo-transfer functions and the interpolation of input data with a low resolution.

One must not forget however that these models are mainly focused on an interregional comparative approach. Therefore the comparison of SCALES data with those of the INRA and PESERA models cannot result on a convincing validation of our model. For the moment the validation is based on the opinion of local experts, who agree with the qualitative indications delivered by our cartography. An external validation of SCALES is foreseen, which will be based on a thorough inventory of erosion signals in areas with different hazard levels. Copyright © 2010 John Wiley & Sons, Ltd.

MEMOIRE de fin d'études pour l'obtention du titre d'ingénieur de l'ENITA de Bordeaux.

Influence des changements climatiques sur la gestion territoriale des exploitations de polycultures-élevage.

Léon, Anne-Sophie

Réalisée à l'INRA SAD-Paysage, Institut National de la Recherche Agronomique
2010

Résumé

L'objectif de l'étude est de mesurer les changements de pratiques survenus dans la gestion territoriale des exploitations de polycultures-élevage depuis les 10 dernières années et de déterminer la part des changements climatiques dans les raisonnements des agriculteurs. Ce sont les changements survenus dans l'organisation spatiale de l'utilisation des terres, les itinéraires techniques du blé et du maïs et la gestion des bordures de champs qui ont été étudiés. La méthode choisie est l'enquête en exploitation agricole. Ce sont ainsi 28 enquêtes chez des éleveurs laitiers qui ont été menées dans le Grand Ouest de la France. Les exploitations enquêtées se situent dans les Côtes d'Armor, le Maine-et-Loire et l'Orne. Ces 3 zones ont été choisies pour leur différence de climat, elles sont représentatives des contrastes du Grand Ouest.

Il en résulte que les changements de pratiques liés aux changements climatiques sont peu nombreux en nombre d'occurrences dans les exploitations et sont surtout présents dans les itinéraires techniques du blé et du maïs. Les changements climatiques sont mis en évidence par une avancée des dates de semis et de récolte et le passage à des variétés plus précoces. La principale raison évoquée par les agriculteurs pour justifier les changements de pratiques est la recherche d'une simplification de leur travail.

La diversité des situations des exploitations entre départements, entre exploitations et dans chaque exploitation être prise en compte pour comprendre les changements actuels et sans doute la façon dont les agriculteurs anticiperont les changements futurs.

Mots clés : changement climatique, exploitation agricole, gestion territoriale, enquêtes, régions Grand Ouest

Les zones humides sont des zones de transition qui permettent de maintenir un certain équilibre entre le milieu aquatique et l'environnement terrestre. En effet, elles agissent comme zones tampons en limitant les flux de nutriments, d'éléments métalliques, d'éléments toxiques et de carbone vers les eaux de surface. La qualité des eaux superficielles en est donc directement dépendante. Malheureusement, les zones humides subissent une pression de la part de l'agriculture, l'urbanisation ou encore de la part du changement climatique. Cela tend à réduire l'espace qu'occupent les zones humides dans nos paysages. Ainsi, l'objectif de ce stage est de mettre en évidence la sensibilité des différentes zones humides en Bretagne au changement climatique. Pour cela, nous avons suivi le taux d'humidité de la surface des sols sur une profondeur donnée selon un transect perpendiculaire au cours d'eau en prenant en compte des cours d'eau d'ordre différents pour chaque site.

Suite à l'application de cette méthode sur une période de six mois, on peut remarquer la variation spatio-temporelle du fonctionnement des différentes zones étudiées. En effet, le taux de saturation des sols évolue différemment selon la période de l'année et la position des zones humides dans le bassin versant considéré. Le moteur de ces évolutions de saturation des sols semble être le manque de pluie. On en déduit donc une différence de vulnérabilité des différentes zones humides aux accidents climatiques en fonction de leurs positions dans le bassin versant.

Abstract

Wetlands exist in a transition zone who allows equilibrium between aquatic and terrestrial environment. Indeed, they react like buffer zone in limiting nutrients flux, metallic elements, toxic elements and carbon flux toward surface water. So, surface water quality directly depends of these exchanges. Unfortunately, wetlands are subjected to an agricultural and an urbanization pressure that tend to reduce wetlands areas in our landscape. Climatic change is also a major factor of this phenomenon. So, our objective is to bringing to light the sensitivity of the different wetlands in Bretagne to the climatic change. Thus, we have followed the surface soil humidity on define depth along an orthogonal transect near several watercourse of different Strahler order.

After a six month application of this method, we can see the spatial and the temporal variation of the wetland mechanism. Indeed, the soil saturation rate is function of the seasonal effect and the wetland position in the catchment. The rain scarcity seems to be the driving of the soil saturation evolution.

So we can react to this phenomenon in saying that wetlands react differently to climatic effect in the different locations of the catchment.

Titre : Une analyse rétrospective de l'évolution des teneurs en matières organiques dans les retenues du Frémur (Pont Avet ; Bois Joli) et de la Haute-Rance (Rophemel) : Nouvelles contraintes sur l'évolution dans le temps de la contamination.

Résumé : Les captages d'eau brute superficielle de Bretagne sont caractérisés par un taux de non-conformité très important du point de vue des matières organiques. C'est un problème majeur du fait que ces captages assurent 85% de l'approvisionnement en eau potable de la population bretonne.

L'objectif de cette étude est de déterminer la trajectoire long-terme de la qualité organique des eaux du bassin versant du Frémur (retenues de Pont Avet et Bois Joli) et de celui de la Rance (retenue de Rophemel) en se basant sur les données collectées ces dernières années par différents organismes (exploitant, organisme de contrôle sanitaire, ...). Plusieurs indicateurs de référence ont été utilisés pour exploiter les données: la fréquence de dépassement et son évolution; les concentrations moyennes annuelles).

Cette étude a apporté les résultats suivants :

- 1) Une confirmation de l'état très dégradé des masses d'eau du Frémur et de Rophemel du point de vue de la matière organique ;
- 2) La démonstration que cet état dégradé n'est pas récent mais date d'au moins une quinzaine d'années pour les deux masses d'eau ;
- 3) L'existence pour la retenue de Pont Avet d'une tendance long-terme légèrement à la baisse et d'une tendance stable dans le cas de la retenue de Bois-Joli ; apparemment, la masse d'eau du Frémur a atteint un état d'équilibre du point de vue de la matière organique (voir très légèrement à la baisse) ;
- 4) L'existence à l'inverse d'une tendance à la hausse dans le cas de la masse d'eau de Rophemel ; cette ressource continue donc apparemment de se dégrader sur le paramètre matière organique.

IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA RESSOURCE EN EAU DANS LES AGRO-HYDROSYSTÈMES DU GRAND OUEST : QUESTIONS DE RECHERCHE.

MEROT P.^{1,2}, GASCUEL-ODOUX C.^{1,2}, DELAHAYE D.³, LE GOUËE P.³, GRIMALDI C.^{1,2}, GRUAU G.⁴

¹ INRA, UMR1109 Sol Agro et hydrosystème Spatialisation, CAREN, F-35000 Rennes.

² Agrocampus Ouest, UMR1109, Sol Agro et hydrosystème Spatialisation, CAREN F-35000 Rennes.

³ Géophan - LETG UMR 6554 CNRS, Université de Caen Basse-Normandie, 14032 Caen

⁴ CNRS, Université de Rennes 1, Géosciences Rennes, CAREN, F-35000Rennes

L'impact du changement climatique sur la ressource en eau pose de multiples questions. Nous voudrions ici préciser le cadre et les enjeux qui permettent de définir les questions de recherche sur le problème de l'impact du changement climatique sur la ressource en eau dans les hydrosystèmes sous influence agricole dans le Grand Ouest. Un focus particulier sera fait sur la question de la qualité des eaux dans les bassins nuxus à climat océanique tempéré.

L'objectif de la communication est de définir le cadre dans lequel se pose dans l'ouest la question des ressources en eau face au changement climatique : quelles enjeux ; quels outils (observatoires de l'environnement...) ; quelles méthodes (modélisations, scénarios...) ; et de donner les premiers éléments de notre analyse.

On distingue 8 enjeux, qui sont repris du programme ADAGE, dont l'objectif était d'identifier les enjeux en termes d'adaptation au CC (<https://www1.eclimont.inra.fr/adage/>). Ces enjeux correspondent à des verrous de connaissance et sont donc autant de questions posées à la recherche : *augmentation de la pression sur la ressource en eau, évolution des agro-systèmes ; variabilité variable des écosystèmes ; évolution des fonctions environnementales des sols et de la qualité chimique des ressources en eau ; nécessité d'adaptation des systèmes et des pratiques agricole ; remise en jeu des vocations des territoires (des terroirs...) et d'impact social*

Il ressort de nos premiers travaux 3 points : peu de travaux ont encore été consacrés au rôle des CC sur la ressource en eau à échelon régional : aucune tendance significative ne se dégage à partir des observations actuelles sur la ressource quantitative en eau dans le Grand Ouest ; on constate par contre une évolution significative des indicateurs de qualité des eaux.

Il se dégage ainsi, en terme de méthodes de travail les points suivants :

- Un travail important est à réaliser sur l'observation des changements passés dans le Grand Ouest, sur le long terme.
- Les modélisations, basées sur les prospectives climatiques, elles même basées sur les scénarios du GIEC seront tournées vers l'étude du risque lié à la modification de l'aléa (aléa croît par exemple...) ;
- On proposera l'hypothèse suivantes : les variables de qualité des eaux, du fait d'une sensibilité à des variations tendancielles des pressions (et non pas à des variations événementielles) sont des indicateurs pertinents pour analyser l'influence des CC sur la ressource en eau.
- En terme scientifique, les résultats attendus devraient permettre de hiérarchiser le risque sur la ressource en eau et en sol lié au CC par rapport au risque lié aux pratiques et aux changements agricoles. Le résultat de cet axe de travail sera également de sensibiliser les décideurs et le grand public pour qu'ils se saisissent de cette problématique de façon raisonnée.

Association Internationale de climatologie XXIII congrès, Rennes 2010

Impact du changement climatique sur la qualité des eaux dans les hydrosystèmes sous influence agricole : questions de recherche.

Philippe Merot, UMR SAS, INRA-Agrocampus Ouest, 65 rue de saint Brieu, 35000 Rennes
Chantal Gascuel- Odoux, UMR SAS INRA-Agrocampus Ouest, 65 rue de saint Brieu, 35000 Rennes
Daniel Delahaye, Géophan – LETG UMR 6554 CNRS, Université de Caen Basse-Normandie, Esplanade de la Paix, BP 5186 - 14032 Caen cedex
Patrick Le Gouëe- LETG UMR 6554 CNRS, Université de Caen Basse-Normandie, Esplanade de la Paix, BP 5186 - 14032 Caen cedex
Catherine Grimaldi, UMR SAS INRA-Agrocampus Ouest, 65 rue de saint Brieu, 35000 Rennes

Nous aborderons ici la question des relations entre le changement climatique (CC) et les hydrosystèmes, en mettant un focus particulier sur la question de la qualité des eaux dans les bassins à climat océanique tempéré.

La qualité de l'eau sera vue à travers la qualité physico-chimique, la qualité chimique, la qualité biologique.

Un certain nombre d'exemples tirés de la Loire, de la Seine ou des rivières Bretonnes montre que, alors que la force variabilité interannuelle des régimes hydrologiques masque des évolutions à long terme de ces régimes sous l'effet des CC, on observe sur les variables de qualité de l'eau, des évolutions non contestables que l'on peut lier au CC.

On propose d'avancer l'hypothèse que la qualité des eaux, à l'instar des stades phénologiques en agriculture, est un indicateur intégré des CC, parfois plus visible que l'observation simple de l'évolution des régimes hydrologiques.

On abordera le cas de l'érosion, dont l'aggravation attendue sous l'effet du CC est plus liée à la modification de l'intensité des précipitations qu'aux tendances quantitatives.

On présentera quelques éléments à partir notamment des programmes ADAGE et CLIMASTER, qui posent la question du rôle du sol et de l'agriculture dans les interactions climat-ressource en eau sur le plan quantitatif et qualitatif.

IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA RESSOURCE EN EAU DANS LES AGRO-HYDROSYSTÈMES DU GRAND OUEST: QUESTIONS DE RECHERCHE.

MEROT P.^{1,2}, GASQUEL-ODOUX C.^{1,2}, DELAHAYE D.³, LE GOUÉE P.³, GRIMALDI
C.^{1,2}, GRUAU G.⁴

¹ INRA, UMRI 1069 Sol Agro et hydrosystème Spatialisation, CAREN, F-35000 Rennes.

² Agrocampus Ouest, UMRI 1069, Sol Agro et hydrosystème Spatialisation, CAREN F-35000 Rennes.

³ Géophen – LETG UMR 6554 CNRS, Université de Caen Basse-Normandie, 14032 Caen

⁴ CNRS, Université de Rennes 1, Géosciences Rennes, CAREN, F-35000 Rennes

L'impact du changement climatique sur la ressource en eau pose de multiples questions. Nous voudrions ici préciser le cadre et les enjeux qui permettent de définir les questions de recherche sur le problème de l'impact du changement climatique sur la ressource en eau dans les hydrosystèmes sous influence agricole dans le Grand Ouest. Un focus particulier sera fait sur la question de la qualité des eaux dans les bassins ruraux à climat océanique tempéré.

L'objectif de la communication est de définir le cadre dans lequel se pose dans l'ouest la question des ressources en eau face au changement climatique : quelles enjeux ; quels outils (observatoires de l'environnement...) ; quelles méthodes (modélisations, scénarios...) ; et de donner les premiers éléments de notre analyse.

On distingue 8 enjeux, qui sont repris du programme ADAGE, dont l'objectif était d'identifier les enjeux en termes d'adaptation au CC (<https://www1.diermont.inra.fr/adage/>). Ces enjeux correspondent à des vertus de connaissance et sont donc autant de questions posées à la recherche : *augmentation de la pression sur la ressource en eau, évolution des agro-systèmes ; vulnérabilité variable des écosystèmes ; évolution des fonctions environnementales des sols et de la qualité chimique des ressources en eau ; nécessité d'adaptation des systèmes et des pratiques agricoles ; remise en jeu des vocations des territoires (des terroirs...) et d'impact social*

Il ressort de nos premiers travaux 3 points : peu de travaux ont encore été consacrés au rôle des CC sur la ressource en eau à échelon régional ; aucune tendance significative ne se dégage à partir des observations actuelles sur la ressource quantitative en eau dans le Grand Ouest ; on constate par contre une évolution significative des indicateurs de qualité des eaux.

Il se dégage ainsi, en terme de méthodes de travail les points suivants :

- Un travail important est à réaliser sur l'observation des changements passés dans le Grand Ouest, sur le long terme.
- Les modélisations, basées sur les prospectives climatiques, elles même basées sur les scénarios du GIEC seront tournées vers l'étude du risque lié à la modification de l'aléa (aléa érosif par exemple...).
- On proposera l'hypothèse suivantes : les variables de qualité des eaux, du fait d'une sensibilité à des variations tendancielles des pressions (et non pas à des variations événementielles) sont des indicateurs pertinents pour analyser l'influence des CC sur la ressource en eau.

- En terme scientifique, les résultats attendus devraient permettre de hiérarchiser le risque sur la ressource en eau et en sol lié au CC par rapport aux pratiques et aux changements agricoles. Le résultat de cet axe de travail sera également de sensibiliser les décideurs et le grand public pour qu'ils se saisissent de cette problématique de façon raisonnée.

Problème local / problème global : La prise en compte de la dimension temporelle dans la dualité des problèmes environnementaux

Michel-Guillou, Elisabeth
Université Européenne de Bretagne
Université de Bretagne Occidentale
Centre de Recherches en Psychologie, Cognition et Communication
(CRPCC) – EA 1285
Elisabeth.Michel-Guillou@univ-brest.fr

Proposition de communication dans le cadre du

Second colloque fédérateur de l'Institut des Sciences de l'Homme et de la Société (ISHS-UBO) :
« Penser le présent comme un passé pour demain »
Mercredi 15 et jeudi 16 décembre 2010, UBO-Brest

La communication proposée s'appuiera sur les résultats d'une étude menée, en région Bretagne, auprès de gestionnaires de l'eau (élus, représentants des usagers et représentants de l'Etat) qui ont en charge l'élaboration et la mise en œuvre de Schémas d'Aménagement et de Gestion de l'Eau (SAGE). Il s'agit pour ces acteurs de gérer collectivement des problématiques locales liées à l'eau (algues vertes, inondations, qualité de l'eau potable, sécheresses...). Cette étude a pour objectif d'appréhender la manière dont ces gestionnaires de l'eau se représentent et éventuellement prennent en considération dans leurs décisions les phénomènes liés au changement climatique.

Les rapports scientifiques attestent la relation entre les changements climatiques et l'eau (cf. pour exemple, rapport du GIEC, 2007). Les scientifiques constatent une élévation du niveau de la mer et également une forte augmentation des précipitations dans certains endroits du globe (par exemple le nord de l'Europe) et une diminution dans d'autres endroits (par exemple, en Méditerranée). Au niveau régional, des suivis de longue durée témoignent de la réalité du changement climatique en Bretagne (Dupont et al., 2007), avec par exemple une polarisation de périodes plus pluvieuses en hiver et moins pluvieuses en été, ainsi qu'une augmentation des minima hivernaux de température (Jouan, 2005), ceci allant dans le sens des travaux recueillis par le GIEC qui notent l'évidence du réchauffement du système climatique (GIEC, 2007).

Face à ce constat, nous nous sommes intéressés à la manière dont les gestionnaires de l'eau appréhendent les changements climatiques. Quelles sont leurs connaissances et le sens associés à ce concept ? Les questions de changement climatique sont-elles abordées lors des réunions de travail ? Sont-elles prises en compte dans la gestion des problématiques locales de l'eau ? Et éventuellement de quelle manière et dans quel sens ?

Pour répondre à ces questions, une enquête par entretiens semi-directifs a été menée auprès de 49 gestionnaires de SAGE du Finistère et d'Ille-et-Vilaine (SAGE Bas-Léon, Elorn, Odet, Vilaine). Trois thèmes principaux étaient abordés : les problématiques locales de l'eau telles qu'elles sont perçues par les enquêtés, leur représentation des changements climatiques et du développement durable. Ces entretiens ont fait l'objet d'une retranscription intégrale, avant d'être soumis à une analyse de contenu assistée par ordinateur ainsi qu'à une analyse de contenu manuelle.

Au-delà des résultats ayant trait à la signification que les acteurs de l'eau accordent à la notion de changement climatique, la référence temporelle est omniprésente dans le discours des enquêtés. Elle fait état d'une incompatibilité entre, d'une part, des problèmes locaux, quotidiens, concrets, circonscrits et dont la résolution est inscrite dans un horizon temporel délimité et, d'autre part, des problèmes planétaires, diffus, non perceptibles à l'échelle de temps humain. A travers cet exemple, il s'agira de discuter de cette dualité des problèmes environnementaux (à la fois locaux et planétaires) dans leur dimension spatio-temporelle.

Mots-clés : psychologie sociale et environnementale, représentations sociales, problèmes environnementaux, eau, changement climatique, dimension spatio-temporelle

¹ Document officiel définissant les stratégies et pratiques à mettre en œuvre pour préserver localement la ressource en eau (ex : action de reconquête de la qualité des eaux, prévention contre les inondations...).

Water managers and climate change: what they think about it?

Michel-Guillou, Elisabeth (Assistant professeur)

Université de Bretagne Occidentale, Brest (France)

Centre de Recherches en Psychologie, Cognition et Communication (CRPCC) – EA 1285

Elisabeth.Michel-Guillou@univ-brest.fr

21st IAPS conference: "Vulnerability, Risk and Complexity: Impacts of Global Change on Human Habitats".

Habitats :

Heimholtz Centre for Environmental

Leipzig, Germany

27 June to 2 July 2010.

Abstract:

La présente étude porte sur à la représentation sociale (Moscovici, 1976) du changement climatique. Elle s'insère dans une recherche interdisciplinaire française qui s'intéresse, entre autre, à la manière dont les connaissances liées au changement climatique influent sur les prises de décision et stratégies d'actions des gestionnaires de l'eau. Dans le cadre de cette étude, menée en Région Bretagne (France), les gestionnaires de l'eau sont des acteurs locaux (élus, usagers, Etat) qui ont en charge l'élaboration et la mise en œuvre de Schémas d'Aménagement et de Gestion de l'Eau (SAGE)¹. Il s'agit ainsi de gérer collectivement des problématiques locales liées à l'eau (qualité/quantité de l'eau...).

Les rapports scientifiques attestent la relation entre les changements climatiques et l'eau (cf. pour exemple, rapport du GIEC, 2007) : montée du niveau des eaux, modification des précipitations... Ces phénomènes ont donc un impact direct sur la ressource en eau (crues, inondations, gelées, sécheresses, pollution...).

Face à ce constat, cette étude a pour objectif d'analyser la manière dont les gestionnaires de l'eau appréhendent les changements climatiques. Quelles sont leurs connaissances associées à ce concept ? Quel est, pour eux, le sens de ce concept ? Les questions de changement climatique sont-elles abordées lors des réunions de travail ? Sont-elles prises en compte dans la gestion des problématiques locales de l'eau ? Et éventuellement de quelle manière et dans quel sens ?

La recherche s'étend sur trois ans (2009-2011). La présente communication se propose de présenter les résultats issus des premières enquêtes réalisées auprès de 18 gestionnaires de l'eau. Ces enquêtes ont été menées sous forme d'entretiens semi-directifs au sein desquels quatre principaux thèmes ont été abordés : le SAGE, les problématiques locales de l'eau, le changement climatique et le développement durable. Ces entretiens ont fait l'objet d'une retranscription intégrale, puis ils ont été soumis à une analyse de contenu assistée par ordinateur, à l'aide du logiciel Alceste (Reinert, 1990) ainsi qu'à une analyse de contenu manuelle.

Les résultats mettent en évidence une représentation du changement climatique principalement associée au réchauffement. Cette connaissance découle principalement des médias (télévision, presse écrite...), elle est source d'incertitudes scientifiques, perçue comme abstraite et globale (opposée aux problématiques concrètes et locales de l'eau) et évaluable sur le long voire le très long terme (échelle humaine opposée à l'échelle sur laquelle repose les problématiques de l'eau, gérables sur un temps plus court). Ces caractéristiques conduisent à une non prise en compte, par les gestionnaires de l'eau, des impacts du changement climatique dans leurs décisions liées à la protection de la ressource en eau.

A l'heure actuelle, le changement climatique n'est donc pas une problématique reconnue par ces acteurs. Néanmoins, selon les problématiques locales liées à l'eau, les questions liées au changement climatique peuvent paraître plus ou moins pertinentes. Les premières enquêtes, brièvement décrites ci-dessus, se sont déroulées sur des sites qui rencontrent essentiellement des problèmes de qualité de l'eau. Une deuxième étude est en cours sur un site qui rencontre essentiellement des problèmes de quantité d'eau. L'enquête se déroulera en début d'année 2010. Des premiers résultats concernant cette enquête pourront être évoqués.

References:

Moscovici, S. (1976). *La psychanalyse, son image et son public*. Paris : PUF.

Pachauri, R. K., Reisinger, A. (Eds) (2007). *Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse*. Genève (Suisse) : GIEC, 103 p.

Reinert, M. (1990). Alceste, une méthode d'analyse des données textuelles. Application au texte

« Aurélia » de Gérard de Nerval. *Bulletin de Méthodologie Sociologique*, 26, 25-54.

Keywords:

Climate change, social representation, water manager, water quality/quantity, socio-environmental psychology

¹ Document officiel définissant les stratégies et pratiques à mettre en œuvre pour préserver localement la ressource en eau (ex : action de reconquête de la qualité des eaux, prévention contre les inondations...).

Changement climatique et ressource en eau.

Représentation et évaluation des problématiques environnementales par des questionnaires de l'environnement

Michel-Guillou, Elisabeth

Université de Bretagne Occidentale (UBO)

Centre de Recherches en Psychologie, Cognition et Communication (CRPCC) – EA 1285

20 rue Duquesne – CS 93837

29238 Brest cedex 3

Tél. 02.98.01.63.61 - Fax. 02.98.01.68.00

Elisabeth.Michel-Guillou@univ-brest.fr

Proposition de communication orale

dans le cadre du

4ème Colloque ARPEEnv - L'individu et la société face à l'incertitude environnementale

Lyon-Bron, 8-10 Juin 2011, IFSTTAR

Thème/Mots-clés

Ressource en eau, changement climatique, problèmes environnementaux, représentation sociale, gestion de l'eau, psychologie sociale et environnementale

Résumé

La communication proposée s'appuie sur les résultats d'une étude menée en région Bretagne auprès de gestionnaires de l'eau (élus, représentants d'usagers et représentants de l'État) qui ont en charge l'élaboration et la mise en œuvre de Schémas d'Aménagement et de Gestion de l'Eau (SAGE). À travers un travail d'élaboration collectif, ces acteurs ont pour objectif d'identifier les problématiques locales liées à la ressource en eau (qualité/quantité) et de proposer des actions pour les maîtriser voire les résoudre.

En raison du lien attesté entre les changements climatiques et la ressource en eau (cf. pour exemple, rapport du GIEC, 2007), nous nous sommes intéressés à la manière dont ces décideurs, ayant en charge la gestion de l'eau au niveau local, se représentent les changements climatiques : Quelles sont leurs connaissances du phénomène et quelle signification lui accordent-ils ? Y a-t-il ou non reconnaissance d'une évolution du climat ? Et si oui, quels sont les indicateurs, les causes et les conséquences perçues ? En lien avec la ressource en eau, quels sont les impacts potentiels, directs ou indirects, des changements climatiques sur la ressource en eau ? Ces questions sont-elles débattues lors des réunions, autrement dit, sont-elles prises en compte dans la gestion des problématiques locales de l'eau ? Au final, il s'agit d'identifier comment ces gestionnaires de l'environnement appréhendent la problématique des changements climatiques et comment ils l'évaluent en comparaison à d'autres problèmes environnementaux auxquels ils sont également confrontés (i.e., l'eau).

Pour répondre à ces questions, une enquête par entretiens semi-directifs a été menée auprès de 49 personnes investies dans l'élaboration de SAGE dans le Grand Ouest (SAGE Bas-Léon, Elorn, Odet, Vilaine). Trois thèmes étaient abordés : (i) représentation des problématiques locales de l'eau, (ii) représentation des changements climatiques, (iii) représentation du développement durable. Ces entretiens ont fait l'objet d'une retranscription intégrale avant d'être soumis à une analyse assistée par ordinateur à l'aide d'un logiciel d'analyse de contenu de données textuelles (Alceste), appuyée par une analyse de contenu thématique manuelle.

Les résultats soulignent l'importance de la problématique qualitative en rapport à la ressource en eau. Du point de vue du changement climatique, l'association au réchauffement global est récurrente. Et au-delà du sens, ces représentations mettent en avant deux visions distinctes, pour ne pas dire opposées, de ces problématiques environnementales dont le lien, lorsqu'il est établi, apparaît hypothétique pour ces gestionnaires. Les changements climatiques sont ainsi perçus comme globaux et non perceptibles à l'échelle humaine, ce qui par conséquent les rend difficilement gérables sur le court terme à l'échelle locale. À l'inverse les problèmes liés à l'eau sont définis comme locaux et résolubles sur le court terme, en accord avec l'élaboration des SAGE. Ces résultats montrent toute la difficulté pour ces acteurs à prendre en compte l'articulation des deux problématiques et par conséquent à en tenir compte dans leurs prises de décision concernant la gestion de l'eau.

¹ Document officiel définissant les stratégies et pratiques à mettre en œuvre pour préserver localement la ressource en eau (ex : action de reconquête de la qualité des eaux, prévention contre les inondations...).

This study explores the social representation (Moscovici, on 1976) of climate change. It fits into a French interdisciplinary research, which focuses, among others, on the way the knowledge bounded to climate change influence the decision-making and strategies of actions of the water managers. Within the framework of this study, carried out in Brittany region (France), the water managers are local actors (local representatives, waters users, state agents) who elaborate and implement the *Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux* (SAGE, water management plans)². Thus, it is a question of managing collectively local problems bounded to the water (water quality / quantity).

There is overwhelming scientific evidence that climate change influence water resource (see for example, the report of GIEC, 2007)³, sea level rise, ocean water temperature rise... Thus, these phenomena have an impact on water resource (river floods, droughts, pollution...).

Therefore, this study aims to analyze how water managers grasp climate change. What is their knowledge about this concept? What is, for them, the meaning of this concept? Are the questions of climate change discussed during the working meetings? Are they taken into account in the management of the local problems of water? And possibly how?

The research extends over three years (2009-2011). Our paper presents the results stemming from the first inquiries. Semi-directive interviews on 18 water managers were led, on four main subjects: the SAGE, the local problems of water, climate change and sustainable development. Interviews were recorded and completely edited. They were run to a computer-aided analysis of contents by of the software Alceste (Reinert, 1990), as well as to a manual analysis of contents.

The results highlight a representation of climate change mainly bounded to the global warming. This knowledge is mainly stemmed from media (television, papers...), it is source of scientific uncertainties, perceived as abstract and global (contrary to the concrete and local problems of the water) and assessable on the very long term (human scale, contrary to the scale of water problems, manageable at a shorter time). These characteristics do not lead managers to consider impacts of climate change in their decisions related to the protection of water resource.

Therefore, climate change is not at the moment a problem recognized by these actors. Nevertheless, according to the local problems of water, the questions about climate change can be more or less relevant. The first inquiries took place on sites which have essentially problems of water quality. A second study is in progress on a site which has essentially problems of water quantity. The survey will take place at the beginning of the next year (2010). The first results of this second survey could be evoked and discussed with regard to the results of the first survey.

² Official document which defines the strategies and the practices implemented to protect the local water resource.

³ Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC

MONCHY Anne, Gérard GRJAU, 2010, Pollution des Captages Superficiels d'Eau Brute des Pays de Loire par les Matières Organiques : Variables Spatiales ; Tendances Evolutives, Causes Possibles et Recommandations. Comparaison avec le Cas de la Bretagne.
Rapport final remis à l'Agence Régionale de Santé des Pays de Loire GSEPMD, CAREN

Dans cette étude, les dosages d'oxydabilité et de COT (Carbone Organique Total) effectués dans le cadre du contrôle sanitaire des eaux brutes destinées à la production d'eau potable ont été utilisées pour analyser la pollution des captages superficiels d'eau brute des Pays de Loire par les matières organiques (MO). L'objectif de l'étude est triple: 1) déterminer la variabilité spatiale actuelle de la pollution en distinguant les captages en retenue et les captages en rivière; 2) décrire l'évolution dans le temps de la pollution pour ceux des captages disposant d'un nombre suffisant de données; 3) évaluer les causes possibles de la pollution en relation avec les connaissances acquises dans le cas des captages superficiels d'eau brute de Bretagne et prédire, si possible, son évolution future.

L'image principale qui ressort de l'analyse des données MO acquise sur les captages des Pays de Loire est celle d'une situation très comparable à celle de la Bretagne avec 1) la même forte dégradation de la qualité organique actuelle des captages (50% des captages en retenue et 30% des captages en rivière des Pays de Loire évaluent non-conformes sur le paramètre MO en 2007-2008); 2) la même forte variabilité spatiale de l'intensité actuelle de la pollution, même si un semblant d'organisation semble exister au niveau des Pays de Loire avec une concentration des captages les moins pollués sur la frange est-sud-est de la région; et 3) la même coexistence au sein des deux régions de captages montrant des tendances temporelles à la hausse, stable et à la baisse du point de vue de leur pollution par les MO. Ce dernier résultat est extrêmement important dans la mesure où il confirme que le problème de la pollution des eaux brutes superficielles par les MO ne se résume pas à comprendre et à expliquer pourquoi certaines masses d'eau ont vu leur teneur en MO augmenter ces dernières années, mais doit et bien à expliquer pourquoi des masses d'eau pourraient, situées dans le même contexte pédoclimatique et anthropique (intensification agricole notamment), ont connu dans le passé, récent des évolutions divergentes du point de vue de leur teneur en MO.

Du point de vue des causes, l'examen des relations entre l'intensité de la pollution et la nature du substrat géologique montre que ce dernier pourrait être un facteur de causalité dans le cas des Pays de Loire, mais que cette hypothèse demande à être évaluée dans le détail dans la mesure où elle ne s'applique pas au cas de la Bretagne. L'analyse typologique des retenues des Pays de Loire révèle, quant à elle, une superposition des sources autochtones et allochtones de MO dans une majorité de retenues, suggérant que des mesures de lutte contre l'eutrophisation pourraient être de nature à diminuer l'intensité de la pollution. L'analyse des captages en rivière montrent, en ce qui la concerne, la peu de poids des rejets urbains et industriels sur la pollution. La source de la MO est très clairement le sol des bassins versants, confirmant en cela les résultats apportés par les études conduites en Bretagne.

En conclusion, les résultats obtenus suite à cette étude permettent de dresser un état des lieux de la pollution actuelle et passée des eaux brutes superficielles des Pays de Loire par les MO. La similitude de ce tableau de bord avec celui réalisé en Bretagne permet de renvoyer aux nombreuses études réalisées dans cette région par le Groupe d'étude sur la Pollution des Eaux par les Matières Organiques (GEPMD) études qui ont analysé dans le détail les causes de cette pollution et les mesures à mettre en œuvre pour en diminuer l'intensité. Dans le cas des Pays de Loire, nous ne disposons pas des bases de données nécessaires pour analyser avec précision le rôle du milieu physique, du climat et des activités humaines (agricoles notamment) sur la pollution. Ce manque et l'adaptation des fréquences de mesure à la réalité de la pollution (forte variabilité temporelle des teneurs en MO, notamment dans les rivières) constituent des handicaps importants. Mettre en place des politiques de surveillance et de réconciliation de la qualité des eaux vis-à-vis d'un polluant, ou anticiper sur d'éventuelles dégradations à venir requiert l'existence d'un réseau de mesures intégrant le suivi du polluant concerné, solide, aux techniques adaptées. De ce point de vue, il est clair que le faible nombre de données MO disponibles sur l'ensemble des captages des Pays de Loire ne permet pas de répondre aux enjeux et à la complexité du problème posé. Remédier à cette situation passe forcément par la création de réseaux initiaux de points de suivi haute-fréquences de la teneur en MO des eaux superficielles de cette région.

Note: ce rapport contient également une évaluation de l'impact du changement d'indicateur réglementaire MO (passage de l'oxydabilité au MnO2 au COT en 2007) sur la mesure de la pollution.

Cette étude s'inscrit dans la nécessité actuelle de comprendre l'origine et l'évolution de la pollution organique des eaux brutes destinées à la fabrication d'eau potable, eu égard aux problèmes sanitaires et de traitement que posent cette pollution.

S. Postic (2009). *Représentation sociale du changement climatique auprès des gestionnaires de l'eau*. Mémoire présenté en vue de l'obtention du Master 1 de Psychologie sociale des représentations. Université de Bretagne Occidentale (Brest).

Sous la direction de : Elisabeth Michel-Guilhou

Ce mémoire s'inscrit dans un questionnement sur l'interaction entre la notion de changement climatique et notre société en prise avec une large médiatisation de ce phénomène. Cette étude s'intègre dans le cadre d'un projet de recherche, le projet Climaster qui propose de développer un programme portant sur les interactions entre le changement climatique et le développement régional, pour permettre aux acteurs régionaux une anticipation raisonnée des évolutions à venir et des conséquences en termes de gestion et de pratiques relatives aux activités agricoles et à la gestion des ressources naturelles. Les acteurs concernés par l'étude sont les gestionnaires de l'eau, au travers d'un SAGE (schéma d'aménagement et de gestion des eaux) ils développent une réflexion visant à améliorer la qualité de l'eau. Comment les gestionnaires de l'eau appréhendent les questions liées aux changements climatiques? Comment ils s'approprient ce concept? Et comment les gestionnaires de l'eau font face aux risques engendrés par le changement climatique? Cette problématique socio-environnementale sera analysée sous l'angle de la théorie des représentations sociales de Serge Moscovici (1961). La méthode qui soutiendra mon étude est du type qualitatif, les discours seront recueillis grâce à des entretiens d'enquête.

Mathieu Rouxel.

Mémoire de stage post-doctoral

Encadrant : Gérard Gruau, Patrick Durand, Anne Jaffrezie, Anne-Catherine Pierson-Wickmann

Titre : Modélisation du transport de COD dans les bassins versants sur socle : analyse des mécanismes mis en œuvre et effet du réchauffement climatique.

Résumé : L'essentiel de la matière organique polluante des captages d'eau brute superficielle de Bretagne provient des horizons organiques des sols. L'objectif de ce travail est de déterminer, par l'utilisation de la modélisation, l'origine spatiale exacte des sources ainsi que l'effet du changement climatique sur l'effet des concentrations et des flux à l'horizon 2100. La modélisation, basée sur l'utilisation du modèle hydrologique Topmodel, confirme que la source de la matière organique se situe dans les horizons superficiels des zones plates de fond de vallée. Elle confirme également le rôle très important exercé par l'épaisseur des volumes organiques dans ces zones sur les concentrations en matière organique des eaux de surface. La modélisation démontre enfin que les changements attendus en termes de volume et de répartition dans les temps des précipitations ne devraient pas modifier les concentrations et les flux à l'horizon 2100.

CNFG 2008

IDENTIFICATION ET SPATIALISATION DES BIOCLIMATS BAS-NORMANDS A PARTIR D'UN INVENTAIRE DE LA FLORE VASCULAIRE REGIONALE

Edwige SAVOURET, Olivier CANTAT

GEOPHEN, Université de Caen Basse-Normandie, UMR 6554 CNRS, Esplanade de la Paix, BP 5186, 14032 Caen Cedex 5

Résumé – Par-delà son image uniforme de terres humides et verdoyantes, la Basse-Normandie présente une réelle diversité des contextes climatiques dont témoignent les plantes par leur aire de prédilection, en relation avec leurs exigences spécifiques. C'est à partir d'une approche naturaliste, fondée sur l'observation de la répartition des espèces végétales, qu'ont été entreprises dans cet article une identification et une spatialisation des grandes aires bioclimatiques qui caractérisent cette région du nord-ouest de la France. En association avec les données climatiques, cette démarche souligne l'importance des conditions édaphiques pour expliquer à méso-échelle la diversité des milieux biogéographiques.

Mots-clés : végétation, bioclimat, approche naturaliste, cartographie, Basse-Normandie

Analysis of suspended sediment concentration and discharge relations to identify particle origins in small agricultural watersheds

A. VONGVIXAY^{1,2,3}, C. GRIMALDI^{1,2*}, C. GASQUEL-ODOUX^{1,2}, P. LAGUIONIE³, M. FAUCHEUX^{1,2}, N. GILLET^{1,2} & M. MAYET^{1,2}

¹ INRA, URH1069, Soil Agro and HydroSystem, F-33000 Rennes, France

² Azyrenanqup Ouert, URH1069, Soil Agro and HydroSystem, F-33000 Rennes, France

^{*} Address for correspondence: INRA, URH1069, SAS, 65 rue de Saint-Brieuc, F-35042 Rennes cedex, France
sallescane.stimaldi@rennes.inra.fr

³ INSA, CCU, Génie Civil et Urban, F-33000 Rennes, France

Abstract. The relationship between suspended sediment concentration (SSC) and discharge often is highly variable in headwater streams, which highlights the temporal changes in particle origin and availability in small catchments. This paper analyses this variability to identify suspended sediment (SS) origins in two small agricultural catchments in northwestern France. Turbidity and discharge were monitored at high frequencies at the outlets. Annual and monthly SS fluxes were very different in the two streams. At the flood scale, various methods were tested to trace sediment origins and to quantify their specific fluxes: SSC-discharge pattern interpretation, SS flux modelling, temporal variations in specific turbidity (turbidity/SSC ratio), or phosphorus content. The high SS fluxes in one stream mainly were due to the mobilisation of instream sediment or to bank erosion. SS fluxes in the other stream mainly were due to slope erosion caused by intensive farming; however, input to this stream was limited because of naturally-occurring tree-lined banks.

Key words: suspended sediment; stream bank erosion; hysteresis; flood; turbidity; discharge; particle availability; modelling

ANNEXES du rapport final du projet CLIMASTER

Ces annexes sont à destination des instances d'évaluation et ne doivent pas être diffusées sans l'accord préalable écrit de leurs auteurs.

Ces annexes constituent une extraction de la version V0 de l'ouvrage en cours de rédaction « Le climat change dans le Grand Ouest, Tendances, Impacts, Perceptions » ; éditeurs Ph. Merot, V. Dubreuil, D. Delahaye, Ph. Desnos.

Les 4 annexes présentent de façon détaillée les résultats obtenus dans chaque volet de recherche de CLIMASTER.

Annexe 1. Le climat

Le changement climatique dans la France de l'ouest : observations et tendances
L'évolution des types de circulation sur la France de l'Ouest et leur impact climatique
Les « types de temps » et leur évolution dans le Grand Ouest de la France
Changement climatique et viticulture : le cas du Val de Loire

Annexe 2. Les ressources environnementales : Sol, eau, biodiversité

Introduction
La question de l'eau et des zones humides sous contrainte climatique
Étude des effets du changement climatique sur la réserve en eau des sols et les phénomènes de sécheresse
Nitrates
Carbone organique dissous, MO des sols.
Matières en suspensions.
Conséquences du changement climatique sur l'aléa érosion des sols.
La biodiversité: Les écosystèmes aquatiques
Encart la question de l'effet CO2 sur la demande climatique

Annexe 3. Les systèmes agricoles

Observation des changements de pratiques agricoles (occupation du sol et pratiques culturales) par télédétection dans le GO
Analyse agronomique et sociologique des changements de pratiques agricoles dans les exploitations laitières du GO
Impact du changement climatique sur la productivité et/ou qualité des cultures du GO : la vigne dans le Grand Ouest
Impact du changement climatique sur l'organisation du travail dans les exploitations agricoles : une analyse au travers de la notion de jour disponible.

Annexe 4. Une prospective sur le changement climatique

La perception du changement climatique par les acteurs de l'eau
Les perspectives climatiques discutées dans les groupes d'agriculteurs
Modalités et conséquences pour les agriculteurs des changements climatiques. Une analyse prospective de CLIMASTER (AScA).

Ces annexes sont à destination des instances d'évaluation et ne doivent pas être diffusées sans l'accord préalable écrit de leurs auteurs.

Le changement climatique dans la France de l'ouest : observations et tendances

Vincent Dubreuil, Olivier Planchon, Chloé Lamy, Valérie Bonnardot, Hervé Quenol

Points marquants

Les régions de la France de l'Ouest bénéficient de climats réputés doux et humides aux contrastes saisonniers peu marqués en moyenne. Ceci est lié à leur situation géographique : en façade ouest du continent européen et à des latitudes moyennes, ces régions sont exposées au flux dominant d'ouest ayant survolé des eaux océaniques chaudes pour la latitude (dérive nord-atlantique) et sans obstacle topographique majeur. Cependant, les sautes d'humeur du climat ne sont pas inconnues et coups de froids, vagues de chaleur, tempêtes, sécheresses et inondations ont marqué la mémoire de leurs habitants. Mais, s'intéresser au changement climatique suppose de s'abstraire de cette variabilité naturelle du climat pour n'en retenir que les tendances « lourdes » sur le long terme. Une année ou deux années chaudes consécutives ne font pas le réchauffement climatique !

Le recours aux observations climatiques sur le long terme (environ une cinquantaine d'années, parfois plus) montre que le réchauffement climatique est une réalité et d'une grande homogénéité sur la France de l'Ouest. Environ un degré a été « gagné » en moyenne sur les cinquante dernières années, ce qui vaudrait, en moyenne en plaine à un déplacement d'une centaine de kilomètres vers le sud ! La tendance est plus marquée l'été que l'hiver mais plus prononcée pour les minimales que les maximales.

Il est plus difficile d'observer des tendances d'évolution du climat pour les précipitations car celles-ci présentent une plus forte variabilité que les températures. En moyenne annuelle aucune tendance n'est significative malgré une légère augmentation. Par contre on note des tendances saisonnières contradictoires avec une augmentation des précipitations l'hiver et une diminution l'été, surtout au nord. Il faut noter que cette légère accentuation du contraste saisonnier moyen observable dans le Grand Ouest est également visible dans d'autres régions de l'Europe du Nord-Ouest.

Les travaux des climatologues montrent que l'état actuel du climat ne constitue qu'un état transitoire entre des climats plus ou moins chauds observés dans le passé (glaciations quaternaires) et le climat, globalement plus chaud, attendu pour la fin du 21^e siècle. La publication du quatrième rapport du GIEC (2007) et l'attribution du prix Nobel de la Paix aux experts de ce même groupe en 2007 ont à nouveau permis de souligner les changements profonds à l'œuvre sur notre environnement. Un large consensus est désormais établi dans la communauté des climatologues (Dubreuil *et al.*, 2010), non seulement pour constater l'amplitude du changement, mais aussi pour affirmer que les activités anthropiques sont désormais (et contrairement aux changements antérieurs) la cause majeure de ce changement global.

Comment une région comme le Grand Ouest s'inscrit-elle dans ce contexte ? Quelles sont les manifestations déjà décelables à cette échelle ? Sur quelle diversité climatique actuelle ou passée peut-on s'appuyer pour esquisser un futur possible du climat de ces régions d'ici la fin du siècle ? A la lumière des mesures des principaux paramètres climatiques disponibles et en s'appuyant sur les observations disponibles, il s'agit dans ce chapitre de montrer comment se manifeste déjà le changement climatique dans le Grand Ouest (températures, puis précipitations) avant de voir les tendances et incertitudes qui s'offrent à la région pour le 21^e siècle. Ce tableau ne peut être brossé qu'après avoir rappelé les grandes caractéristiques générales du climat et sa diversité locale et régionale à l'échelle de la France de l'Ouest.

Originalité et personnalité des climats de la France de l'Ouest

Des climats tempérés océaniques « doux et humides »

Les régions de la France de l'Ouest appartiennent au domaine climatique dit tempéré océanique. Dans les latitudes moyennes (dans ce cas, entre 45° et 51° de latitude nord) les régions des façades ouest des continents sont exposées au flux dominant d'ouest, apportant aux régions proches de l'océan des masses d'air et des types de temps fortement marqués par la douceur et l'humidité. On a coutume de dire que les hivers sont doux et les étés frais (ce qui entraîne une faible amplitude thermique moyenne annuelle) et les précipitations présentes en toute saison bien qu'accusant un léger creux printanier ou estival. Faible nombre de jours de gel par an, mais aussi faible nombre de jours chauds, nombre élevé de jours de pluie par an sans pour autant connaître des totaux pluviométriques élevés, sont autant de propriétés bien connues de ces types de climats. Les vents de secteur ouest et sud-ouest dominants, très marqués sur les côtes notamment au passage des grandes dépressions atlantiques, restent soutenus dans les terres et transportent les effluves océaniques loin vers l'intérieur. L'enchaînement rapide des types de circulation atmosphérique (dépressionnaire ou anticyclonique) quelque soit la saison, lié à la diversité des types de temps associés, provoque la sensation d'un climat très variable où les longues périodes de temps similaires sont assez rares.

Ces régions tirent également leurs caractéristiques climatiques de la modeste des reliefs : contrairement aux autres régions de ce domaine tempéré océanique (en Amérique par exemple), aucun relief majeur ne vient gêner l'avancée des flux océaniques dans les terres. Une assez grande homogénéité climatique règne donc sur ces régions et, à l'échelle infrarégionale, on parlera davantage de nuances que de véritables contrastes climatiques. Ces nuances s'organisent en fonction d'un triple gradient littoral-intérieur, topographique et latitudinal.

- L'éloignement par rapport à la mer s'accompagne d'une augmentation des contrastes thermiques saisonniers : hivers plus froids et nombre de jours de gel plus élevé d'une part et, d'autre part, chaleur estivale plus marquée ; près des côtes, les gradients thermiques terre-mer contribuent à générer des brises qui atténuent encore les contrastes thermiques.

- Les reliefs, même modestes, suffisent à diminuer les températures moyennes et faire augmenter sensiblement la pluviométrie. Localement, des effets d'abri peuvent générer des climats généralement plus chauds et moins arrosés mais aussi, lors de situations radiatives printanières, des conditions propices à l'accumulation d'air froid.

- L'été, enfin, un gradient latitudinal est observé, faisant bénéficier, lors de situations anticycloniques en flux de sud ou d'est, aux régions les plus méridionales de conditions plus chaudes et plus ensoleillées.

Des gradients multiples et de nombreuses nuances régionales et locales

De ce qui précède, on peut proposer une typologie des principaux faciès climatiques du grand ouest français (figure 1).

- Les littoraux septentrionaux, du sud Finistère à la Normandie, où le gel et les fortes chaleurs sont rares, la pluviométrie modeste mais très uniformément répartie sur l'année. Les brouillards sont fréquents, surtout le long des côtes bordées de courants marins froids.

- Les littoraux méridionaux, du Morbihan aux Charentes où chaleur et ensoleillement sont plus généreux au point de voir apparaître un voire deux mois secs au cœur de l'été. Les brises de mer, fréquentes au printemps et l'été, favorisent une plus grande luminosité du temps.

- Les reliefs, au dessus de 200 mètres environ, offrent une nuance franchement fraîche et nettement plus arrosée. La neige comme le gel n'y sont pas rares en hiver.

- Le reste de la région bénéficie de situations intermédiaires où s'expriment avec subtilité les effets croisés de la topographie, de la latitude et de l'éloignement à la mer.

Cette approche régionale, qui s'appuie sur les observations des stations synoptiques du réseau Météo-France, ne doit pas occulter les phénomènes climatiques locaux. Ainsi, les phénomènes d'exposition sur les versants, sans atteindre les dissymétries bien connues des vallées de montagne, existent et permettent localement des adaptations d'espèces méridionales (Cantat...). Les effets de la topographie peuvent favoriser les phénomènes d'inversion thermique et d'accumulation de l'air froid en bas de pente, créant des situations de gel préjudiciables aux cultures délicates (cf chapitre viticulture Val de Loire). Les effets d'exposition des plages par rapport aux houles et vents dominants créent des situations plus ou moins abritées où les effets de l'érosion peuvent être variables. Enfin, le climat local, résultant du bilan de l'énergie local, est aussi fonction de l'occupation du sol : globalement plus frais et plus humide en forêt et plus chaud en ville (cf chapitre climat urbain).

Variation et variabilité : comprendre les mots du changement climatique

Vouloir observer le changement climatique suppose au préalable de disposer de séries d'observations standardisées, contrôlées et fiables sur une longue période. La période instrumentale de référence commence ainsi généralement dans le courant du 19^e siècle lorsque les différents services nationaux de météorologie sont créés, souvent pour des raisons militaires et stratégiques. La France, de ce point de vue, dispose d'assez peu de très longues séries d'observations comme l'Angleterre (Kew Gardens depuis 1697) ou l'Allemagne (Berlin depuis 1701).

Disposant de longues séries de données, le climatologue doit ensuite faire la part entre deux types de comportement statistiques de ces séries : la variabilité et, éventuellement la variation. Ces deux notions sont souvent confondues alors qu'elles expriment deux choses assez différentes.

- La variabilité correspond au fait qu'un paramètre climatique donné peut plus ou moins fluctuer autour d'une valeur centrale de référence (une « normale » climatique calculée généralement sur une période de 30 ans). Cette variabilité du climat va donc simplement correspondre au fait que l'on peut observer des années plus ou moins chaudes ou plus moins sèches, par exemple ; il s'agit d'une composante majeure du climat à laquelle les sociétés se sont, peu ou prou, adaptées. Dans les climats tempérés océaniques de la France de l'ouest, par exemple, la variabilité interannuelle des précipitations est moins forte qu'elle ne l'est dans le domaine méditerranéen. Elle est tout de même importante comme l'illustrent les températures de Rennes et Brest de 1950 à 2010 (figure 2).

- La notion de variation renvoie à une modification progressive et durable du climat qui, décennie après décennie devient plus froid ou, dans le cas qui nous concerne, plus chaud. Ce n'est donc pas l'observation d'une ou deux années, fussent elles consécutives, qui permet d'affirmer que l'on observe ce type de tendance mais des observations sur une longue période, de l'ordre du demi-siècle. Cette évolution progressive n'est donc pas forcément perceptible par l'homme, contrairement aux impacts de la variabilité qui, du fait des années exceptionnelles, marquent généralement les esprits. Dans le cadre du « changement global », passé ou futur, c'est à ce type de changement que l'on s'est intéressé dans le cadre du projet CLIMASTER. Dans la pratique, variation et variabilité peuvent, ou non, évoluer dans le même sens (figure 3).

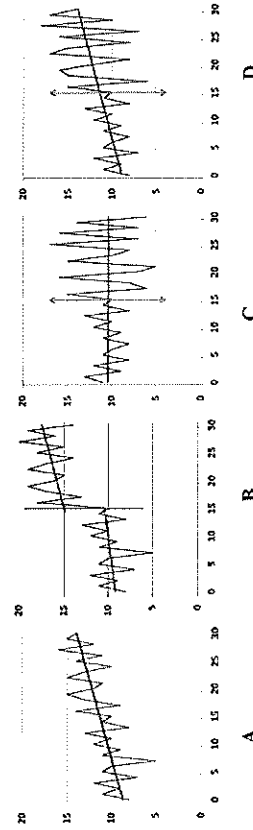


Figure 3. Schémas théoriques des types de variation et de variabilité climatique (le temps est en abscisse).
A : variation du signal (augmentation) sans changement de variabilité ; B : série discontinue (rupture d'homogénéité) ; C : changement de variabilité sans modification du signal climatique ; D : variation du paramètre accompagnée d'une rupture de variabilité

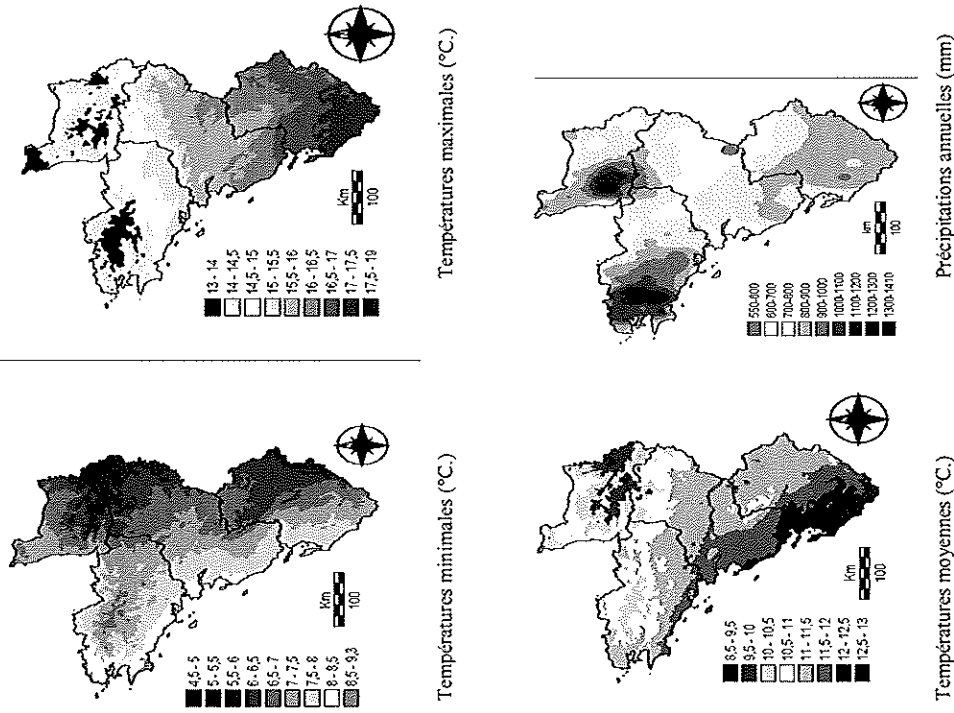


Figure 1. Spatialisation des températures et précipitations moyennes dans la France de l'ouest.

Les températures minimales sont interpolées en fonction de la longitude ($r=-0.62$) et du relief ($r=-0.51$). Les maximales en fonction de la latitude ($r=-0.84$) et du relief ($r=-0.25$) et les températures moyennes en fonction de l'altitude ($r=-0.63$), de la latitude ($r=-0.64$) et de la longitude ($r=-0.23$). Les précipitations ne sont que peu corrélées avec le relief ($r=0.49$) et encore moins avec les autres paramètres et sont donc spatialisées par simple interpolation en fonction de la distance aux 123 postes de mesure.

Valuers moyennes 1961-1990. Source des données : Météo-France. Réalisation Vincent Dubreuil

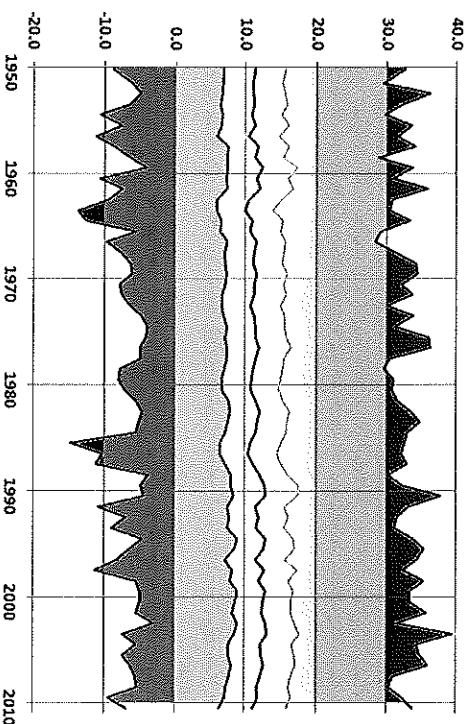


Figure 2 : Variabilité des températures (en °C) à Rennes (en haut) et Brest (en bas) de 1950 à 2010. Pour chaque année, sont indiqués le maximum absolu (courbe rouge), le minimum absolu (courbe bleue), la moyenne des maxima (courbe orange), la moyenne des minima (courbe bleu clair) et la moyenne annuelle (courbe verte). Noter la plus faible variabilité à Brest : moins de fortes mais aussi moins de faibles températures qu'à Rennes.

Source des données : Climatique, Météo-France. Réalisation : Vincent Dubreuil, COSTEL, Rennes 2

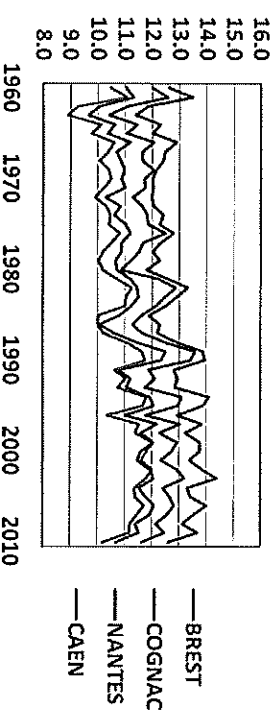


Figure 4 : Evolution des températures moyennes annuelles (°C) pour 4 stations de la France de l'Ouest.

Source : Météo-France (climatique), Réalisation : Vincent Dubreuil, COSTEL, Rennes 2

Les températures : un réchauffement généralisé, plus ou moins marqué selon les mois

Toutes les stations principales de la France de l'Ouest ont enregistré une tendance sensible à l'augmentation des températures depuis un demi-siècle. Précisons d'emblée que cette évolution s'observe aussi bien pour des sites à proximité des agglomérations (Rennes, Nantes, Caen, Angers) que des sites restés plus ruraux (Brest-Guipavas, Dinard-Pleurtuit, Rostrenem, Cognac,...). Il semble donc que l'effet de l'îlot de chaleur urbain, même s'il n'est pas négligeable, ne soit pas le facteur explicatif prépondérant dans ce cas.

L'observation des températures depuis le milieu du 20^{ème} siècle révèle l'amorce du changement climatique à travers une augmentation progressive des températures sur tout le Grand Ouest de l'ordre d'un degré. Après une première légère augmentation dans la première moitié du XX^e siècle et un léger creux ou une stagnation dans les années 1950-1960, toutes les stations montrent une augmentation sensible à partir des années 1980 (figure 4). Si l'on compare les moyennes tenennaires, c'est-à-dire les « normales » climatiques des périodes 1951-1980 et 1981-2010 (figure 5), l'augmentation varie de 0,5°C à Angers à 1,2°C au Mans, la plupart des stations ayant gagné 0,9°C environ. En Bretagne, Normandie, Pays de Loire l'augmentation des minimales est plus sensible (+ 1,1°C) que les maximales (+0,7°C) mais c'est plutôt l'inverse en Poitou-Charentes.

Au-delà de ces moyennes, il faut noter la récurrence des années chaudes sur la dernière période : ainsi, pour toutes les stations, les dix années les plus chaudes depuis 1946 sont toutes postérieures à 1989 (Moisselin *et al.*, 2002). Par ailleurs, ce réchauffement se remarque également à travers le nombre de jours chauds qui a partout augmenté entre la première moitié et la deuxième moitié du 20^{ème} siècle. A Rennes le nombre de jours où la température dépasse les 25°C est passé de treize dans les années 1940 à quarante actuellement.

La répartition saisonnière des tendances des températures montre également une assez bonne homogénéité (figure 5), avec une augmentation globalement plus sensible pendant les mois d'été (+1 à +1,7°C, en juillet et/ou août selon les stations) que pendant les mois d'hiver (+0,1 à +0,5°C en décembre, +0,1 à +0,8°C en février). Pendant les intersaisons, les résultats sont plus nuancés : au printemps, la température augmente plus rapidement en mai qu'en avril, tandis qu'en automne le mois d'octobre se réchauffe plus vite que celui de septembre (surtout en Poitou-Charentes). De manière générale, l'amplitude thermique moyenne annuelle (différence entre le mois le plus chaud et le mois le plus froid) a donc légèrement augmenté de quelques dixièmes de degrés.

Les précipitations : des tendances annuelles moins significatives mais contrastées

Les précipitations varient beaucoup plus fortement dans le temps et l'espace que les températures. Les totaux pluviométriques moyens annuels varient du simple au double en quelques dizaines de kilomètres (entre Granville et les collines du Bocage Normand ou entre Saint-Brieuc et les hauteurs du Mené, par exemple). Les régimes purement océaniques, observés sur le littoral, sont ainsi caractérisés par des pluies plus abondantes durant l'automne et l'hiver, avec un minimum à la fin de l'été et un maximum au début de l'hiver. A l'intérieur des terres, le régime océanique cède la place à un régime plus soutenu mais souvent moins net, où tous les mois connaissent des précipitations moyennes voisines. Ces tendances qui peuvent s'expliquer par une dégradation du climat océanique vers des tendances plus continentales, illustrent principalement une spécificité du régime océanique du Grand Ouest. D'après Péguy (1970), les précipitations tendent à s'uniformiser lorsque l'arrière-pays est moins élevé, ce qui est le cas de la région Ouest de la France, entraînant ainsi une évolution du climat océanique pur en un régime océanique confus.

Si l'augmentation des températures est un phénomène général, l'évolution des précipitations, elle, montre des évolutions moins spectaculaires et plus contrastées. Ainsi la pluviométrie annuelle ne présente pas d'évolution sensible à la hausse ou à la baisse (figure 6). La plupart des stations enregistrent une stabilité (Nantes, Cognac, Caen) ou une légère augmentation (Rennes ou Angers) des précipitations moyennes annuelles ; cette augmentation dépasse rarement quelques pourcent sur les cinquante dernières années et n'est donc jamais statistiquement significative. Cependant, cette relative stagnation des totaux pluviométriques annuels moyens cache des disparités saisonnières et mensuelles importantes.

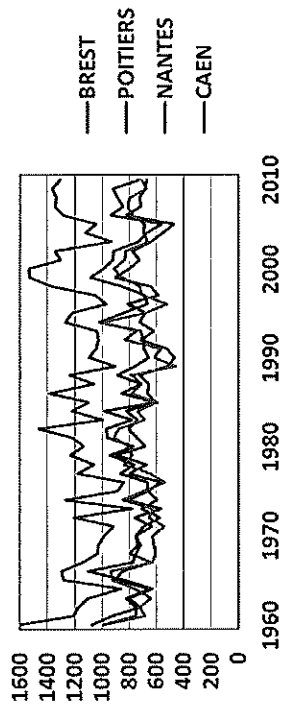


Figure 6 : Evolution des précipitations moyennes annuelles pour quelques stations de la France de l'Ouest.
Source : Météo-France (climatique). Réalisation : Vincent Dubreuil, COSTEL, Rennes 2

Ainsi, la diminution des pluies d'été se concentre sur le mois d'août pour la plupart des stations de la France de l'Ouest (Dubreuil *et al.*, 1998) : ceci distingue ces régions des îles Britanniques où l'on a montré que la diminution estivale concernait principalement le mois de juillet (Mayes, 1996). En revanche, comme sur une grande partie de l'Europe de l'Ouest (Plançon, 2005), les précipitations ont augmenté partout au printemps, surtout en mai (figure 7). Le mois d'octobre connaît aussi une hausse importante qui contraste avec la baisse ou la relative stabilité des mois de septembre et novembre. Selon les régions, le creux estival s'accuse donc légèrement (Bretagne, Normandie, Pays de Loire) tandis que l'hiver semble désormais plus arrosé au Nord et avec une tendance à la baisse au sud (Poitou-Charentes). Globalement l'observation d'étés plus secs et d'hivers plus arrosés donne l'impression d'un renforcement des régimes océaniques.

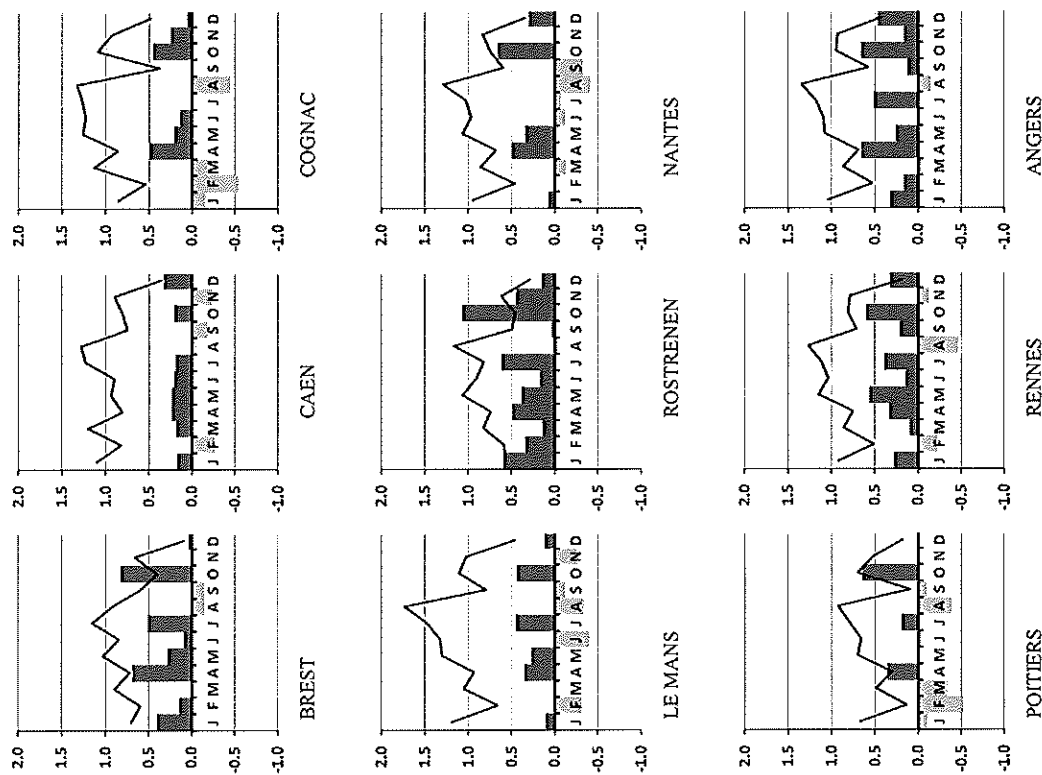


Figure 5 : Evolution des températures moyennes mensuelles (en rouge) et précipitations moyennes mensuelles (en bleu) : différences entre les normales 1951-1980 et les normales 1981-2010.
Source : Météo-France (climatique). Réalisation : Vincent Dubreuil, COSTEL, Rennes 2

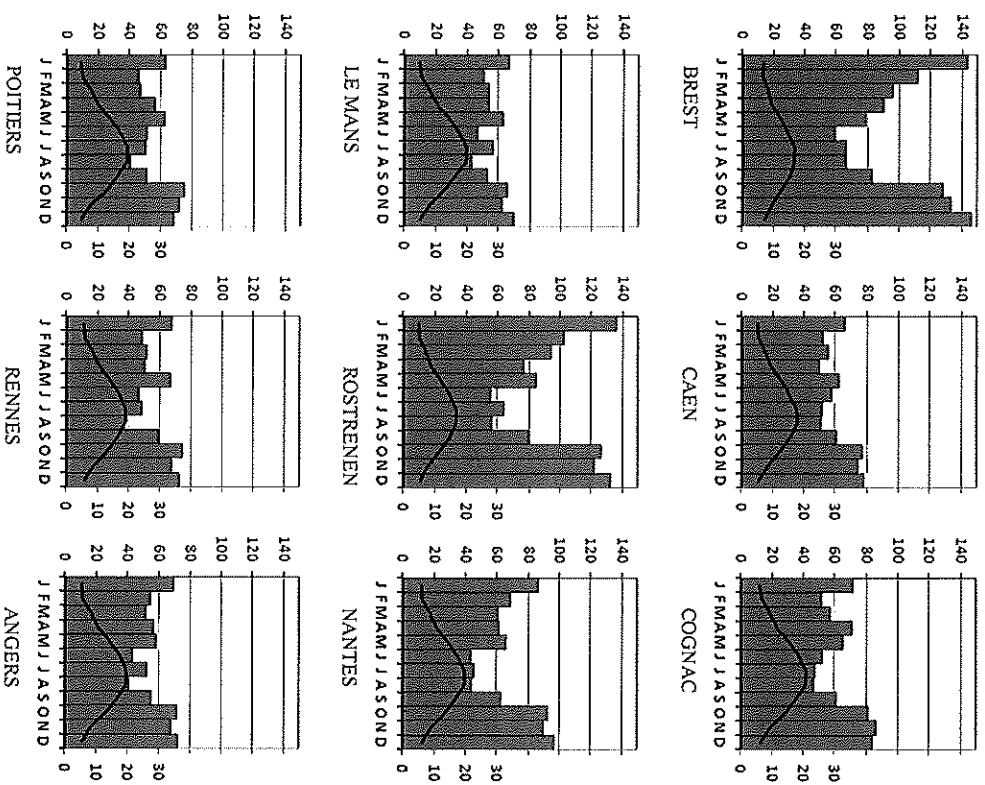


Figure 7 : La diversité des régimes pluviométriques moyens pour quelques stations de la France de l'Ouest. Moyennes 1981-2010 : précipitations en bleu (en millimètres) et températures en rouge (en degrés).
Source : Météo-France (climatique), Réalisation : Vincent Dubreuil, COSTEL, Rennes 2

Conclusion

Très peu d'études avaient été consacrées au changement climatique dans la France de l'Ouest jusqu'au début des années 2000. Les travaux précurseurs de Mounier *et al.* (1998), Dubreuil *et al.* (1997, 1998) avaient cependant déjà attiré l'attention sur ce phénomène, bien marqué dans ces régions comme dans le reste de la France (Moissein *et al.*, 2002). Il est vrai qu'ici comme ailleurs, les facteurs de vulnérabilité des sociétés au climat restent avant tout marqués par la variabilité ce celui-ci : chaleurs et sécheresses de 2003, 1989 ou 1976, vagues de froid des années 1985-1987, inondations des années 1995, 1999 ou 2001, tempêtes de 1987 et 1999, pour ne retenir que les phénomènes les plus marquants. Pourtant, l'élévation des températures est générale et remarquable, particulièrement pendant l'été, d'environ un degré en cinquante ans. Rappelons qu'un degré tous les 100 kilomètres représente, en plaine, le gradient nord-sud moyen en France, ce qui montre déjà l'ampleur du phénomène.

Les précipitations, comme les autres paramètres comme le vent par exemple, montrent des tendances beaucoup moins significatives. L'augmentation des précipitations moyennes annuelles dépasse rarement quelques pour cent sur les cinquante dernières années et cache des disparités saisonnières et mensuelles importantes : forte augmentation en octobre mais forte diminution en août, pour la plupart des stations. Selon les régions, le creux estival s'accuse légèrement (Bretagne, Normandie, Pays de la Loire) tandis que l'hiver semble désormais plus arrosé au Nord et avec une tendance à la baisse au sud (Poitou-Charentes). Globalement l'observation d'étés plus chauds et plus secs et d'hivers plus doux et plus arrosés donne l'impression d'un renforcement des contrastes saisonniers été-hiver, impression en partie occultée par les changements importants qui s'opèrent pendant les intersaisons. Il s'agit donc d'analyser maintenant plus en détails les types de temps réellement ressentis avant d'analyser si ces tendances peuvent être mis en relation avec des modifications dans les grands régimes de circulation.

Bibliographie

- Dubreuil V., Lejeune C., Mounier J., 1997. Changements climatiques régionaux dans la France de l'Ouest : *Publication de l'Association Internationale de Climatologie*, 9, 437-445
- Dubreuil V., Mounier J., 1998. Recent evolution of spatial fluctuations of monthly rainfall in western part of France : in *Conference meeting of the commission on climatology of the International Geographical Union « Climate and environmental change »*, Evora Portugal, août 1998
- Dubreuil V., Mounier J., Lejeune C., 1998. L'accentuation récente du déficit estival dans la France océanique : *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 11, 151-157
- Dubreuil V., Quénot H., Planchon O., Bonnardot V., 2010. Risques et changement climatique : *Actes du colloque du 23e colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Rennes, septembre 2010, 698 pages ;
- GIEC, 2007. *Climate change 2007. The physical science basis*. Cambridge University Press, 996 p.
- Moissein J.-M., Schneider M., Canellas C., Mestre O., 2002. Les changements climatiques en France au 20^{ème} siècle. *La Météorologie*, 38, 45-56.

Mounier J., Dubreuil V., Lejeune C., 1998: Variabilité interannuelle et variations actuelles du climat dans le domaine océanique : *Memorie della societa geografica italiana*, 55, 121-131

Pagny P., 1988. *Climats et cours d'eau de France*. Masson, Paris, 166 p.

Pédelaborde P., 1957. *Le climat du Bassin Parisien*. Génin, Paris, 539 p.

Péguy C-P., 1970. Précis de Climatologie, Masson, Paris, 468 p.

Planchon O., 2005 : Les printemps pluvieux des années 1980 : retour sur une particularité météorologique et climatique de la fin du vingtième siècle en Europe occidentale.

Actes du 18^e colloque de l'A/C, Gênes (Italie), 349-352.

Quénol H., Planchon O., Wahl L., 2008 : Méthodes d'identification des climats viticoles.

Bulletin de la Société Géographique de Liège, 51, 127-137.

Regnaud H., Dubreuil V., 1998: L'élévation récente du niveau marin dans l'ouest français : signification climatique et conséquences morphologiques ; *Annales de géographie*, 600, 117-138

Climatèque, Météo France, <http://climatque.meteo.fr/okapi/accueil/okapiWeb/index.jsp>
Bulletins mensuels de l'office national météorologique de France, bibliothèque climatologie du laboratoire COSTEL, UMR 6354, CNRS, Université Rennes 2

L'évolution des types de circulation sur la France de l'Ouest et leur impact climatique

Olivier Planchon et Valérie Bomardot

Points marquants :

L'étude de la variabilité des types de circulations atmosphériques, sur la période totale disponible (1850-2009) fait ressortir quelques tendances statistiquement significatives au pas de temps saisonnier. Certaines tendances ont été décelées très tôt dans la série des types de circulations, ce qui montre la nécessité d'étudier les séries de données climatiques les plus longues. Les tendances ont été observées aussi bien sur des situations faiblement que fortement représentées et peuvent donc avoir des impacts différents. D'autre part, des oscillations irrégulières dans l'évolution de la fréquence des types de circulations permettent d'identifier des groupes d'années avec des caractéristiques particulières.

Une analyse des impacts thermiques et pluviométriques des types de circulations atmosphériques a été effectuée sur trois types (ou groupe de types) de circulations pour lesquels les analyses statistiques ont permis de détecter les tendances les plus significatives. Si certains types de circulations influent différemment sur certains éléments climatiques entre le début et la fin du XX^{ème} siècle, les évolutions ne sont pas toujours significatives. L'analyse des impacts pluviométriques des types de circulations retenus montre, sur l'ensemble des stations en seconde partie du XX^e siècle, une homogénéité des impacts, tandis que l'analyse des impacts thermiques fait davantage ressortir certains facteurs géographiques locaux.

Pour évaluer les risques climatiques régionaux (sécheresses, excès d'eau -pluie-crues-inondations, et gelées) dans le grand Ouest français, liés aux changements en cours dans la dynamique des masses d'air sur l'Europe Occidentale, la variabilité de la dynamique atmosphérique depuis 1850 a été mise en relation avec les anomalies climatiques enregistrées en surface dans la région. La variabilité et les tendances dans la fréquence d'occurrence de chaque type de circulation (GWT et GWL) ont été étudiées aux échelles annuelle et saisonnière. Les impacts thermiques ont été étudiés en fonction de l'intensité des anomalies.

Les données climatiques mensuelles & quotidiennes proviennent de Météo-France (*Climatologie*) et de EC&AD (*European Climate Assessment & Dataset* / <http://eca.knmi.nl/>). Les types de circulations atmosphériques sont ceux de Hess-Brezowsky (James, 2007 ; <http://www.cesr233.org/>). Le catalogue quotidien depuis 1850, reposant sur la distribution du champ de pression au niveau de la mer et à environ 5000 m d'altitude au-dessus de l'Océan Atlantique Nord et de l'Europe, identifie 29 types de circulations (*Gross-Wetter-Lagen*), regroupés en 5 grands types (*Gross-Wetter-Typen*) (Hess et Brezowsky, 1952 ; Gerstengarbe et Werner, 2005 ; Kysej et Huth, 2006 ; James, 2007 ; Werner et Gerstengarbe, 2010 / <http://www.pik-potsdam.de/research/publications/mkreports/files/pik119.pdf>).

1. Tendances de la circulation atmosphérique sur l'Europe et l'Atlantique Nord

Aucune tendance à l'échelle annuelle n'est à reporter sur les GWT. Les circulations d'Ouest, Sud et Nord-Ouest à Nord prédominent à l'échelle annuelle, entre 20 et 30% environ, conformément aux résultats du PIK présentés par Gerstengarbe et Werner (2005) sur la chronologie 1881-2004. En revanche, au pas de temps saisonnier, on observe une diminution significative de la fréquence des circulations de Sud en hiver et une diminution des circulations de NE et E associée à une augmentation des situations à centre d'action sur l'Europe Centrale au printemps.

Si on analyse les 29 GWL, au pas de temps saisonnier, on observe :

- une tendance à la baisse du type « WW » en hiver. Parmi les plus fréquents en cette saison (8,3% du total saisonnier en moyenne pour les 158 ans), il passe de 9,7% pendant la période 1850-1946 à seulement 6,1% pendant la période 1947-2008.
- une tendance à la baisse du type « HNFZ » au printemps. Ce type est le plus fréquent des types NE et E à cette saison (4,1%) : il est réduit de presque la moitié si on compare la moyenne 1850-1946 (5,4%) à la moyenne 1943-2009 (2,7%).
- une tendance à la baisse, en été, du type « NA » qui représente 3,8% du total saisonnier en moyenne pour la période 1850-2009. Le pourcentage d'occurrence de ce type de circulation est réduit de plus de la moitié si on compare la moyenne 1850-1918 (5,8%) à la moyenne 1919-2009 (2,4%). La moyenne pour la période 1946-2009 n'est que de 2,2%.

Les tendances sont observées aussi bien sur des situations faiblement que fortement représentées et peuvent donc avoir des impacts différents. Des oscillations irrégulières mettent en évidence des groupes d'années avec des caractéristiques particulières. Cependant, un même type de circulation n'engendre peut-être pas le même impact thermique et/ou pluviométrique en fonction des périodes, ou peut-être l'intensité d'un type d'impact climatique donné a-t-elle pu varier.

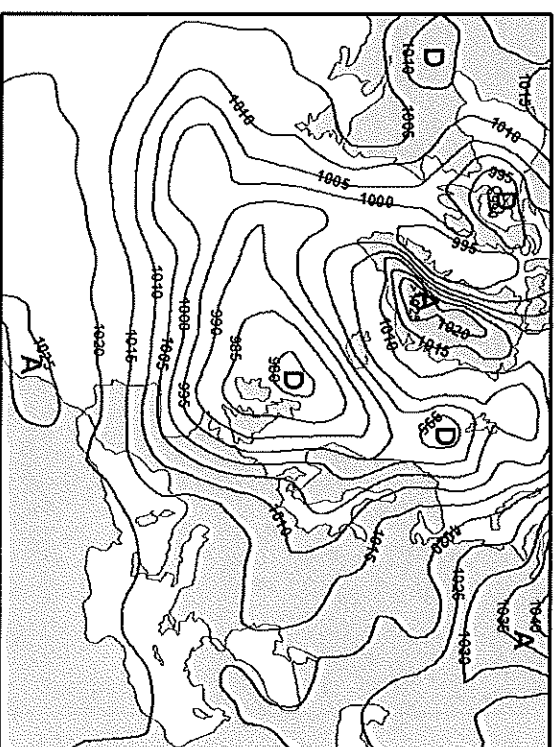
2. Impacts thermiques et pluviométriques sur le Grand Ouest

L'analyse des impacts thermiques et pluviométriques des types de circulations atmosphériques a été effectuée sur le groupe de types de circulations (GWT) de Sud et sur les trois types de circulations individuels (GWL), pour lesquels les analyses statistiques ont

permis de détecter des tendances significatives, avec des dates de rupture statistique permettant la comparaison de stations pour lesquelles des longues séries de données quotidiennes de températures minimales (TN), de températures maximales (TX) et de précipitations ont été disponibles. La station de Rennes a été retenue en raison de sa position centrale dans l'Ouest de la France, et bénéficiant d'une série de données quotidiennes relativement longue (précipitations depuis 1927 ; TN et TX depuis 1925). D'autre part, afin d'avoir une idée de la spatialisation des impacts dans le Centre-Ouest de la France, quatre autres stations ont été étudiées : Angers, Nantes, Romorantin et Saumur. Les données n'ont été obtenues que depuis 1950, c'est-à-dire une date postérieure aux dates de rupture, ce qui n'a pas permis une étude de tendance, mais a permis de comparer les impacts thermiques et pluviométriques d'une station à l'autre.

2.1 Impacts des circulations de SUD en hiver

Les circulations de Sud constituent, avec les circulations d'Ouest, le groupe de types de circulations atmosphériques le plus pluvigène sur l'Europe de l'Ouest (exemple de la situation du 4 janvier 2001 : Fig. 1).



est en hausse. La baisse du total pluviométrique généré par les circulations de sud est donc largement compensée par les précipitations liées aux autres types de circulations.

Une validation de ces résultats avec un plus grand nombre de stations n'a pas été possible, car d'autres longues séries de données n'ont pas été disponibles. Cependant, une comparaison des impacts pluviométriques et thermiques a été possible avec quelques stations du Centre-Ouest de la France pour la période 1950-2009 (Tab. 1).

Tableau 1. Impacts pluviométriques et thermiques moyens de la circulation de Sud en hiver (a, en moyenne ; b, en anomalies par rapport aux autres types de circulation) à Rennes et dans les stations du Val de Loire.

a) Stations (Période)	Total (mm)		Nb)		Nb)		Total (% saisonnier)		Nb)		Nb)		Anomalies	
	avec pluie	sans pluie	avec pluie	sans pluie	avec pluie	sans pluie	avec pluie	sans pluie	avec pluie	sans pluie	avec pluie	sans pluie	TN (°C)	TX (°C)
Rennes (1950-2009)	62	13	6	3,4	9,5	32	27	14	+1,2	+1,3				
Nantes (1950-2009)	77	13	6	4,2	10,7	32	27	14	+1,8	+1,9				
Angers (1950-2009)	52	12	7	3,9	10,1	29	26	15	+1,9	+2,0				
Saumur (1950-2009)	42	11	8	3,8	10,3	26	25	16	+1,8	+2,1				
Romorantin (1952-2009)	42	11	7	2,5	10,2	25	25	16	+2,2	+2,6				

En circulation de Sud, Nantes enregistre des précipitations plus abondantes et des températures plus élevées, caractères liés à son climat maritime (Planchon, 1997). L'homogénéité pluviométrique et thermique des stations du bassin de la Loire moyenne reflète son homogénéité topographique d'ensemble (bas plateaux). Seule la station de Romorantin se distingue par des températures minimales plus basses, liées au rayonnement amplifié par le sol sableux de la région (Bonnefoy *et al.*, 2010). De plus, l'affaiblissement du vent sur un espace à dominante forestière (la Sologne dans ce cas), et donc à forte rugosité, aggrave les possibilités de basses températures minimales et les gélées de rayonnement (Oke, 1978 ; Escourrou, 1981 ; Pinty *et al.*, 1989). Cependant en termes d'anomalies (Tableau 3b) les anomalies positives de température engendrées par les flux de Sud sont plus fortes à Romorantin que dans les autres stations. Cette particularité illustre les contrastes thermiques quotidiens auxquels est soumise cette station, en relation directe avec des facteurs géographiques locaux (topoclimatiques, avec forte influence du substratum et de l'occupation du sol).

2.2 Impacts des circulations d'OUEST de type « WW » en hiver

Les circulations d'Ouest de type « WW » sont caractérisées, en hiver, par un fort contraste de masses d'air entre l'Ouest de l'Europe, sous l'influence de systèmes perturbés d'origine atlantique (basses pressions de surface à proximité de l'Islande), et l'Europe orientale sous l'influence de hautes pressions de surface sur la Russie (par exemple le 24 janvier 1988 : Fig. 2). Ce contraste de masses d'air se traduit par des températures légèrement excédentaires sur l'Europe occidentale baignée par l'air océanique humide et anormalement basses sur l'Est de l'Europe (Russie surtout) dominé par les conditions anticycloniques.

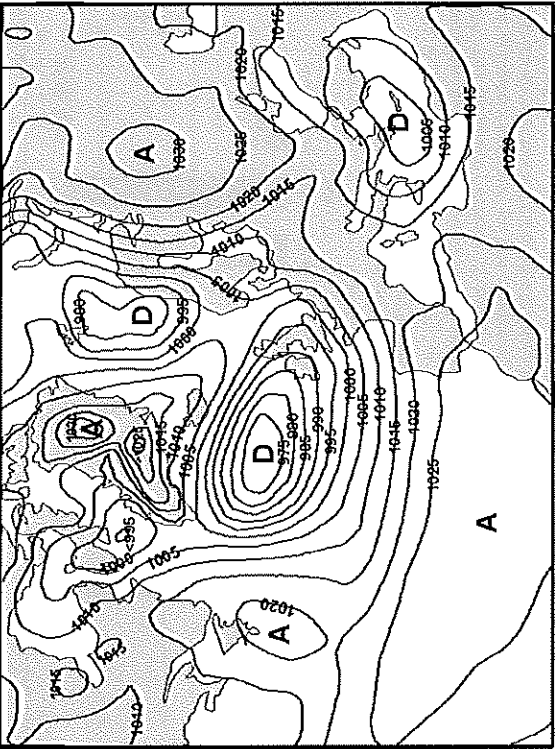


Figure 2 : Champ de pression (valeurs en hPa) au niveau de la mer, sur l'Océan Atlantique Nord et l'Europe, le 24 janvier 1988. D'après : <http://www.wetterzentrale.de/>

Les circulations de type WW se manifestent aussi notamment par de fortes différences pluviométriques entre l'Ouest de l'Europe (anomalies positives) et l'Est (anomalies négatives). La fréquence de ce type de circulation a diminué de 8,3 % en hiver de 1850 à 2009, avec une rupture significative en 1946. Compte tenu de la faible proportion de ce type de circulation (et, de surcroît, en baisse au cours du XX^e siècle), la part des précipitations associées est faible. En revanche, la hausse des températures liées au type WW durant la période succédant à la rupture statistique de 1946 mérite une attention particulière.

Les impacts thermiques ont été étudiés en fonction de l'intensité des anomalies. Les valeurs entre +/- 1 σ représentent une distribution normale ; de -1 à -2 σ et de +1 à +2 σ représentent les cas d'anomalies négatives/positives ; les valeurs <-2 ou >+2 σ représentent les extrêmes. A Rennes, comme dans l'ensemble des régions de l'ouest de la France, la persistance des masses d'air d'origine océanique contribue à atténuer les variations de température et rendent ainsi plus rares les fortes anomalies (Fig. 3). La fréquence plus élevée de journées à anomalies thermiques positives (TN et TX) traduit l'importance de l'impact thermique de l'air d'origine océanique relativement chaud (ou « tède », en hiver). Le découpage de la période étudiée en deux sous-périodes divisées par la rupture statistique de 1946, tendrait même à montrer que cet impact « adoucissant » s'est renforcé à Rennes dans la deuxième moitié du XX^e siècle.

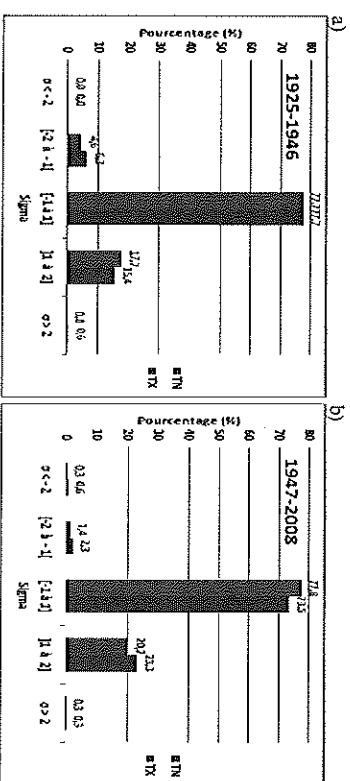


Figure 3. Impact du type de circulation « WW » sur les températures minimales (TN) et maximales (TX) quotidiennes d'hiver à Rennes (a : 1925-1946 ; b : 1947-2008).

A Rennes, de 1925 à 2008 (Fig. 3), on constate une augmentation de la fréquence des températures anormalement élevées en hiver (surtout les maximales) par circulation de type WW. Les anomalies extrêmes ne sont pas affectées, mais ces résultats permettent d'affirmer que la douceur hivernale qui accompagne à l'occasion les situations de type WW se fait sentir de façon un peu plus insistante vers la fin du XX^e siècle.

La comparaison des impacts pluviométriques et thermiques sur la période récente (1950-2009) et pour l'ensemble des stations sélectionnées, incluant celles des pays de la Loire, fait à nouveau ressortir le climat maritime de Nantes, dans ce cas fortement influencé (du moins en quantité de pluie reçue) par les événements hivernaux associés aux circulations de type WW (Tab. 2a). Toutes les autres stations diffèrent peu entre elles. Les impacts thermiques font ressortir l'homogénéité des stations du Centre-Ouest de la France, à l'exception (déjà montrée avec les circulations de Sud) de Romorantin (Tab. 2b).

Tableau 2. Impacts pluviométriques et thermiques des circulations « WW » en hiver. a) moyennes ; b) anomalies : à Rennes et dans les stations du Val de Loire.

a)				b)			
Stations (Période)	Total (mm)	NbJ avec pluie	NbJ sans pluie	TN (°C)	TX (°C)	Total (%) saisonnier	NbJ avec pluie (saison)
Rennes (1950-2009)	35	7	1	4,5	11,0	18	14
Nantes (1950-2009)	50	7	1	4,7	11,2	20	15
Angers (1950-2009)	34	7	2	4,4	10,7	19	14
Saumur (1950-2009)	30	6	2	4,1	10,8	19	14
Romorantin (1952-2009)	30	6	2	2,6	9,8	18	14

2.3. Impacts des circulations de NORD-EST et d'EST de type « HNFZ » au printemps

Les circulations de Nord-Est et d'Est de type « HNFZ », anticycloniques sur le Nord de l'Europe et perturbées sur le centre et le Sud du continent (par exemple le 4 avril 1989 : Fig. 4), sont caractérisées, sur la France, surtout par des anomalies thermiques négatives (fortement négatives en saison froide), ce qui peut poser des problèmes quant aux risques de gel printanier.

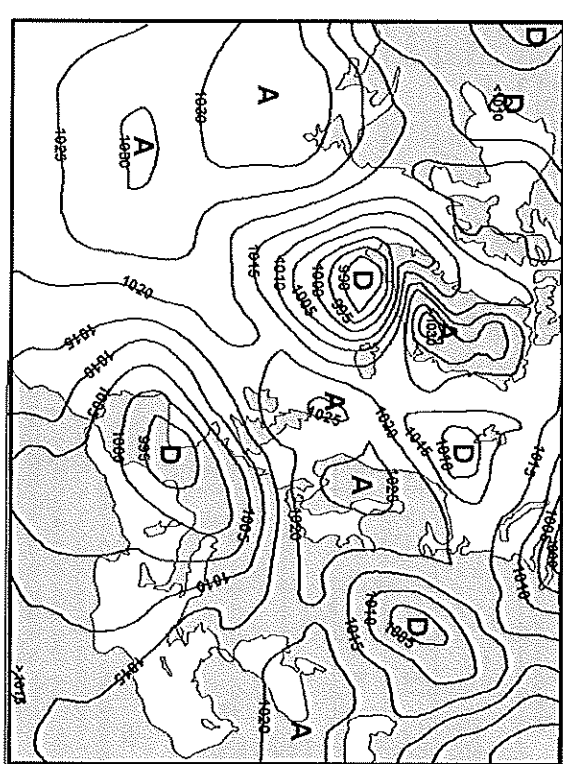


Figure 4 : Champ de pression (valeurs en hPa) au niveau de la mer, sur l'Océan Atlantique Nord et l'Europe, le 4 avril 1989. D'après : <http://www.meteo.fr/central/de/>

Les précipitations sont en moyenne légèrement excédentaires en saison chaude, surtout à l'Est (seulement dans la partie sud en saison froide). La fréquence de ce type de circulation a diminué de 4 % au printemps de 1850 à 2009, avec une rupture significative en 1942.

Les circulations de type HNFZ, dirigeant des masses d'air continental sur l'Europe moyenne aboutissent à de fréquentes anomalies thermiques négatives (plus élevées sur les TX).

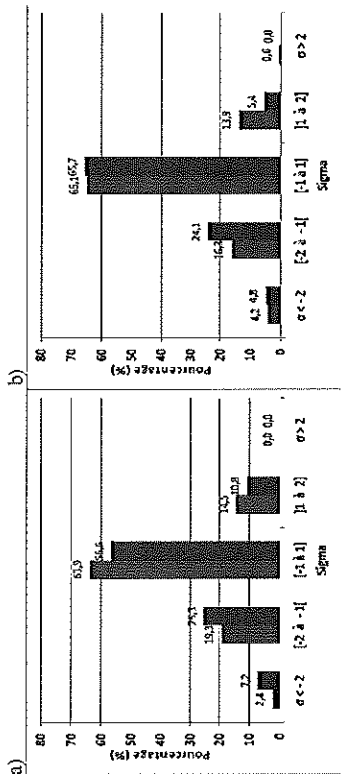


Figure 5. Impact du type de circulation « HNFZ » sur les températures minimales (TN) et maximales (TX) quotidiennes de printemps à Rennes (a : 1925-1942 ; b : 1943-2009). Voir légende Fig. 3.

La station de Rennes, de 1925 à 2009, montre une atténuation générale des contrastes thermiques au printemps par circulation HNFZ (Fig. 5), mais aussi une augmentation de la fréquence des températures minimales extrêmes (2,4 à 4,2% de TN entre les deux périodes). Cette augmentation qui affecte de faibles pourcentages n'est pas à négliger, puisque le risque de gel printanier est une contrainte forte pour certaines cultures sensibles.

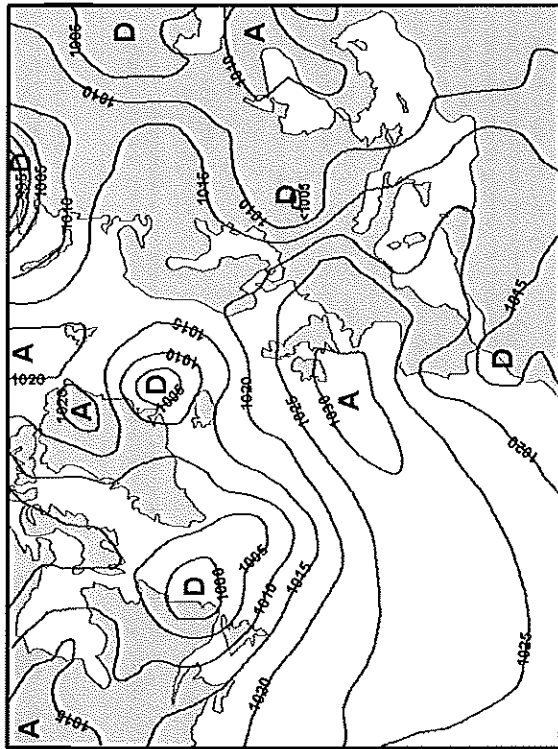
La comparaison des impacts pluviométriques et thermiques sur la période récente (1950-2009) et pour l'ensemble des stations sélectionnées, incluant celles des pays de la Loire, isole une fois de plus Nantes des autres stations, cette fois à l'abri des précipitations liées aux « retours d'Est » (Tab. 3). Les températures ne montrent pas, en valeur absolue, de différences significatives entre les stations. Les TX plus élevées à Saumur reflètent un caractère climatique local dont bénéficie cette station, en bordure d'un plateau crayeux, en position de cuvette abritée au centre du bassin de la Loire moyenne et inférieure (Quéhol *et al.*, 2008 ; Bonnefoy *et al.*, 2010) et à l'intérieur du cadre régional déjà favorisé du Val de Loire (Pédelaborde, 1957). Les anomalies thermiques négatives affectent surtout les températures maximales, dans une moindre mesure les TN.

Tableau 3. Impacts pluviométriques et thermiques en circulation de type « HNFZ » (a : moyennes et b) anomalies) à Rennes et dans les stations du Val de Loire.

a)	Stations (période)	Total (mm)	NbJ avec pluie		NbJ sans pluie		TX (°C)	TN (°C)	TX (°C)	Anomalies TX (°C)
b)	Stations (période)	Total (%) saisonnier)	NbJ avec pluie (% saison)	NbJ sans pluie (% saison)	Anomalies TN (°C)	Anomalies TX (°C)				
	Rennes (1950- 2009)	11	8	5	-0,3	-1,2				
	Nantes (1950- 2009)	9	8	4	-0,3	-1,3				
	Angers (1950- 2009)	11	8	4	-0,2	-1,4				
	Saumur (1950- 2009)	12	9	4	+0,4	-1,3				
	Romorantin (1952- 2009)	11	9	4	+0,5	-1,4				

2.4. Impacts des circulations de NORD-OUEST et NORD de type « NA » en été

Les circulations de Nord-Ouest et d'Ouest de type « NA », anticycloniques sur le Nord-Ouest de l'Europe et perturbées sur l'Est (par exemple le 7 juillet 1997 : Fig. 6), sont caractérisées, en saison chaude, par des températures voisines des normales saisonnières sur l'Europe de l'Ouest, mais inférieures aux normales sur l'Europe centrale et orientale, et des précipitations déficitaires sur une grande partie occidentale de l'Europe. La fréquence de ce type de circulation a diminué de 4 % en été de 1850 à 2009, avec une rupture significative en 1945.



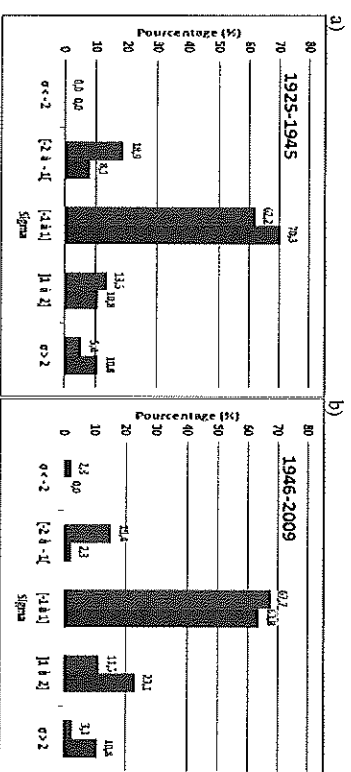


Figure 7. Impact du type de circulation « NA » sur les températures minimales (TN) et maximales (TX) quotidiennes d'été à Rennes (a : 1925-1945 ; b : 1946-2009). Voir légende Fig. 3.

Le cas de la fréquence des TX extrêmes ($> 2 \sigma$) peut être précisé dans cette analyse des impacts thermiques des circulations de type NA, car les journées concernées incluent l'événement exceptionnellement chaud d'août 2003. Sur l'ensemble de la période 1946-2009, la station de Rennes a dénombré 14 cas « extrêmes » (19,2 %), qui correspondent à des séquences chaudes remarquables en particulier durant les étés 1949, 1990, 2001 et 2003). L'année 2003 n'est pas unique en terme d'occurrence de journées à TX « extrêmes », mais ces résultats d'une analyse fréquentielle, sans remettre en cause l'intensité exceptionnelle de la vague de chaleur de l'été 2003, montrent que les TX extrêmes de l'été 2003 s'ajoutent à celles mesurées au cours de plusieurs autres étés précédents pour expliquer l'augmentation de la fréquence des TX extrêmes entre le début et la fin du XX^e siècle. Compte tenu de la présence de hautes pressions de surface sur la moitié ouest de l'Europe, les précipitations sont négligeables sur toutes les stations de référence. En revanche, l'impact des circulations de type NA fait ressortir quelques disparités caractéristiques entre certaines stations. Dans le Centre-Ouest de la France, en raison de la combinaison de facteurs régionaux et locaux exposés précédemment eux aussi, la station de Saumur se distingue par ses TX plus élevées que les autres stations (Tab. 4).

Tableau 4. Impacts pluviométriques et thermiques en circulations « NA » en été (a. moyennes ; b. anomalies) à Rennes et dans les stations du Val de Loire.

a)	Total Stations (période)	NbJ avec pluie	NbJ sans pluie	TN (°C)	TX (°C)
Rennes (1950-2009)	1	6	11,5	24,2	
Nantes (1950-2009)	5	6	12,9	24,9	
Angers (1950-2009)	4	1	11,7	24,8	
Saumur (1950-2009)	4	1	6	12,3	25,8
Romorantin (1952-2009)	7	1	5	9,2	24,6

b)	Total (%) Stations (période)	NbJ avec pluie (stations)	NbJ sans pluie (%) (stations)	Anomalies TN (°C)	Anomalies TX (°C)
Rennes (1950-2009)	1	3	9	-1,1	-1,2
Nantes (1950-2009)	3	3	10	-0,2	-1,3
Angers (1950-2009)	3	2	10	-1,1	-0,9
Saumur (1950-2009)	3	3	8	-1,0	-0,9
Romorantin (1952-2009)	4	4	9	-2,1	-0,2

Par circulation de type NA, la température minimale quotidienne est partout inférieure à la moyenne de chaque station, l'anomalie thermique négative étant plus accentuée sur le site particulier de Romorantin.

Conclusion

L'analyse des impacts pluviométriques des types de circulations retenus montre, d'une part, sur l'ensemble des stations en seconde partie du XX^e siècle, une homogénéité des impacts à l'exception de la station de Nantes dont le caractère climatique maritime la singularise durant les séquences de circulations perturbées. D'autre part, à Rennes au cours du XX^e siècle, les anomalies pluviométriques hivernales négatives (non significatives) observées par circulation de sud en fin de période sont compensées par les précipitations liées aux autres types de circulations.

L'analyse des impacts thermiques fait davantage ressortir certains facteurs géographiques locaux. Ainsi, la variabilité des températures au pas de temps quotidien donne l'avantage aux anomalies positives ou négatives (TN ou TX) selon le type de circulation concerné. Dans le Centre-Ouest de la France, malgré l'homogénéité topographique d'ensemble, certaines particularités locales sont mises en évidence, par exemple les TX élevées à Saumur et les TN remarquablement basses à Romorantin. Ces résultats montrent que, malgré l'échelle spatiale large (synoptique) prise en compte par les GWL, la différentiation des impacts fait ressortir certains caractères climatiques locaux, dont les éléments explicatifs incluent le rôle des états de surface (topographie, occupation du sol, nature du substratum...) et leurs interactions complexes avec la couche limite atmosphérique.

Bibliographie

- Bonnefoy, C., Quenol, H., Planchon, O., Barbeau, G., 2010 : Températures et indices bioclimatiques dans le vignoble du Val de Loire dans un contexte de changement climatique. *EchoGéo*, 14, 13 p. Accès en ligne sur http://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=fr&user=12146
- Escourrou, G., 1981 : *Climat et environnement. Les facteurs locaux du climat*. Paris : Masson, 184 p.
- Gerstengarbe, F.W., Werner, P.C., 2005 : Katalog der Grosswetterlagen Europas (1881-2004). *PfK Report n°100*, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, 153 p.
- Hess, P., Brezowsky, H., 1952 : Katalog der Grosswetterlagen Europas. *Bibliothek des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone*, 33, 39 p.
- James, P.M., 2007 : An objective classification for Hess and Brezowsky Grosswetterlagen over Europe. *Theoretical and Applied Climatology*, 88, 17-42.
- Kyselý, J. et Huth, R., 2006 : Changes in atmospheric circulation over Europe detected by objective and subjective methods. *Theoretical and Applied Climatology*, 85, 19-36.
- Oke, T.R., 1978 : *Boundary Layer Climates*. London : Methuen & Co. Ltd, 372 p.
- Pédclaborde, P., 1957 : *Le climat du Bassin Parisien*. Paris, Gém, 539 p.
- Pinty, J.P., Mascart, P., Richard, E., Rossot, R., 1989 : An investigation of mesoscale flows induced by vegetation inhomogeneities using an evapotranspiration model calibrated against HAPEX-MOBILHY data. *Journal of Applied Meteorology*, 28, 976-992.
- Planchon, O., 1997 : *Les climats maritimes dans le Monde*. Thèse de Doctorat, Presses Universitaires du Septentrion, Villeneuve d'Ascq, 233 p.

Quénol, H., Planchon, O., Wahl, L., 2008 : Méthodes d'identification des climats viticoles. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 51, 127-137.

Werner, P.C., Gerstengarbe, F.W., 2010 : Katalog der Grosswetterlagen Europas (1881-2009). *PIK Report n° 119*, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, 140 p.
<http://www.pik-potsdam.de/research/publications/pikreports/files/pr119.pdf>

Les « types de temps » et leur évolution dans le Grand Ouest de la France

Olivier Carnat¹, Edwige Savouret², Abdelkrim Bensaid¹

¹ laboratoire GEOPHEN, UMR 6554 LETG CNRS, Université de Caen Basse-Normandie
² laboratoire CEGUM, EA 1105, Université de Metz

Points marquants

Dans ce chapitre, l'évolution du climat dans le Grand Ouest de la France est appréhendée à partir d'une étude des *types de temps* qui se sont succédés au cours des quarante dernières années (1971/2010). Cette entrée a été privilégiée car elle offre une approche très synthétique des différents états de l'atmosphère, « réalité vivante faite tout entière de combinaisons ». De plus, la connaissance des *types de temps* permet d'envisager les conséquences de cette dynamique de l'atmosphère en mesurant les potentialités et les risques d'origine météorologique pour divers secteurs d'activités tels que l'agriculture, le tourisme, les transports ou la santé, par exemple. A cette double fin, une chronique des séquences météorologiques a été établie à partir de trois paramètres « sensibles » du climat : l'état du ciel, la température et les précipitations. Il en résulte une analyse illustrée par des cartes et des tableaux de synthèse.

Au total, cette étude fait clairement ressortir le poids majeur des influences atlantiques (dominance des conditions nuageuses, tempérées et souvent arrosées) mais également les disparités géographiques entre le nord et le sud de la région. Plus localement, on constate des particularités climatiques liées aux situations littorales. Seconde caractéristique observée, la variabilité interannuelle marquée des *types de temps*, ce qui occasionne parfois des risques importants tant pour la société que pour l'environnement. Enfin, si de grandes fluctuations pluriannuelles apparaissent dans la fréquence des *types de temps*, cette approche synthétique du climat souligne aussi l'amorce de nouvelles tendances que les prochaines décennies se chargeront ou non de confirmer...

Les « types de temps », pour une approche globale des composantes du climat

Dans le cadre du programme Climaster, une reconstitution des *types de temps* a été entreprise sur le Grand Ouest de la France. En termes plus précis, il s'est agi d'établir une chronique des séquences plus ou moins durables – de quelques heures à plusieurs jours – d'éléments atmosphériques sensiblement identiques sur un espace d'échelle régionale à locale.

Le choix des paramètres et des stations météorologiques de référence

Pour rendre cette étude de climatologie dynamique plus concrète et applicable dans différents domaines, ont été privilégiés des paramètres météorologiques dont l'action conditionne en partie le fonctionnement des milieux naturels et le comportement des êtres qui y sont soumis. Le choix s'est ainsi porté sur des éléments « sensibles » du temps : les précipitations, la température et la fraction d'insolation (pourcentage d'ensoleillement).

La sélection des stations servant de référence a reposé sur trois critères : i) la disponibilité des données sur plusieurs décennies ; ii) la représentativité climatique des stations à l'échelle du Grand Ouest de la France ; iii) la stabilité paysagère aux alentours des stations météorologiques et à proximité immédiate de leurs capteurs afin de garantir l'homogénéité des séries de mesures.

Au total, l'évolution sur plusieurs décennies des multiples séquences qui animent l'atmosphère est caractérisée à partir d'un jeu de 6 stations représentatives du Grand Ouest, analysées au pas de temps quotidien sur la période 1971-2010 (figure 1). Une approche plus fine de la diversité spatiale des types de temps en relation avec la variété des contextes géographiques – est proposée grâce à une base de données plus dense (12 stations) mais en contrepartie disponible sur une durée plus courte (1991-2010).

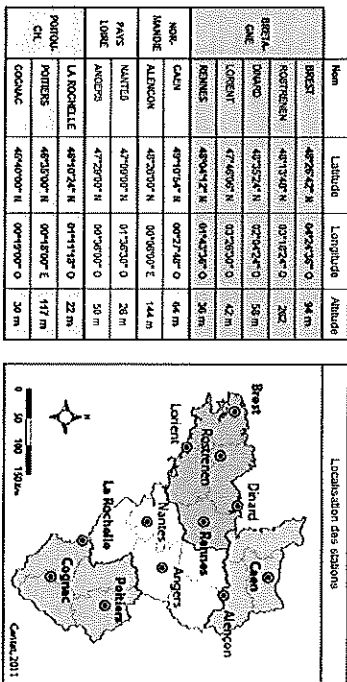


Figure 1. Localisation des stations météorologiques de référence. Stations analysées sur la période 1971-2010, avec en gras celles analysées sur la période 1991-2010 (données Météo France)

La méthode de détermination des « types de temps » : 48 combinaisons possibles

Les différents types de temps présentés dans ce chapitre résultent de la juxtaposition de trois qualificatifs exprimant chacun l'état journalier des paramètres météorologiques de base (successivement : fraction d'insolation, température et précipitations). Cette nomenclature provient de la discrétisation de ces trois séries de données selon des seuils facilement interprétables, relatifs au climat tempéré des latitudes moyennes (voir les classes dans la figure 2). Concrètement, l'état du ciel a été segmenté en quatre ambiances illustrant respectivement un temps « gris », « nuageux », « variable » ou « beau ». Pour la température, la valeur moyenne journalière se décompose également en quatre niveaux possibles : « froid », « frais », « doux » ou « chaud ». Enfin, trois degrés d'intensités distinguent les précipitations : « très arrosé », « arrosé » et « sans pluie significative ». Par conséquent, en croisant ces différentes classes, l'étude porte sur l'analyse de 48 combinaisons (4x4x3).

¹ Cette dernière occurrence est remplacée dans la nomenclature par un espace vide pour simplifier la lecture. Le code du type de temps se limite alors aux deux qualificatifs exprimant l'état du ciel et la température.

Les « types de temps » dans le Grand Ouest de la France

Au fil des saisons et au gré des masses d'air d'origines variées qui affectent à tour de rôle ce secteur géographique, la clarté du ciel, le niveau des températures et les probabilités de précipitations se combinent pour former une multitude d'ambiances climatiques. Pour matérialiser cette diversité des états de l'atmosphère, la figure 2 présente la fréquence de l'ensemble des 48 combinaisons possibles calculées sur la période 1991-2010.

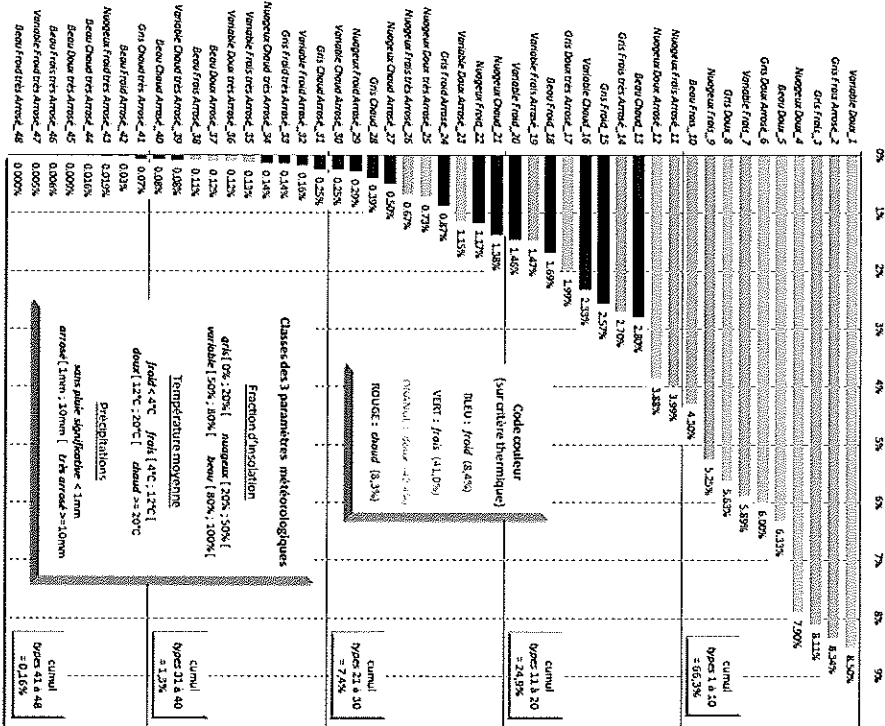


Figure 2. Fréquence des 48 types de temps sur le Grand Ouest de la France (1991-2010)

Les « types de temps » dominants dans le Grand Ouest de la France

Le contexte tempéré et très changeant des états de l'atmosphère apparaît immédiatement à travers les caractères et la proportion équilibrée des quatre *types de temps* les plus fréquents : « variable et doux » (8,5%), « gris, frais et arrosé » (8,3%), « gris et frais » (8,1%) et « nuageux et doux » (7,9%). Ces qualificatifs traduisent une région soumise préférentiellement aux advections océaniques porteuses d'air chargé d'humidité et sans qualité thermique bien tranchée³. Ces éléments sont toujours fortement présents même en intégrant des *types de temps* moins fréquents puisque, dans les quinze premières combinaisons du classement, l'état du ciel est « gris » ou « nuageux » à 66,7%, les températures « fraîches » ou « douces » à 86,7% et les précipitations sont présentes dans un tiers des cas.

La diversité spatiale des « types de temps » dominants et assez fréquents

Les cartes de la figure 3 permettent de discerner des entités géographiques, opposant schématiquement la fraîcheur humide et nébuleuse des régions bretonne et normande, aux accents plus doux et lumineux du sud de la Loire. Mais, à l'intérieur de ces deux grands ensembles, des nuances plus ou moins prononcées apparaissent, notamment sur la Bretagne en raison de ses multiples facettes paysagères. On différencie ainsi les hauteurs exposées de l'Ouest (Rostrenen) aux bassins intérieurs abrités (Rennes) et, réciproquement, on oppose la fraîcheur des côtes sud (Lorient) à la rigueur plus marquée des côtes nord (Dinard). De même, le littoral favorisé par l'ensoleillement et la douceur contraste avec l'intérieur des terres où la continentalité infrochit les températures vers le froid en hiver et la chaleur en été, alors que les reliefs retiennent davantage les nuages.

Les différences spatiales s'accroissent encore plus nettement lorsque des conditions météorologiques calmes et claires favorisent l'expression climatique des facteurs géographiques (situations anticycloniques généralement). Cette configuration météorologique n'est certes pas dominante dans le Grand Ouest de la France mais elle s'observe cependant chaque année sur des séquences plus ou moins longues. En été, cela se traduit par l'établissement du temps « beau et chaud » (15^{ème} rang sur 48, avec 2,8% ; soit environ 10 fois par an). Cette moyenne régionale se décompose en fait en moins de 1% des cas sur le nord et les hauteurs bretonnes (2 à 3 jours) contre plus de 2% sur le littoral sud et le bassin rennais (7 à 9 jours) ; on atteint entre 3 et 4% au niveau de la Loire (12 à 15 jours) et on dépasse 6% du littoral sud-ouest et charentais à la Champagne cognacaise (22 à 24 jours). Lors de conditions synoptiques similaires en hiver, après une période de temps « beau et froid » (18^{ème} rang), la condensation dans les basses couches conduit fréquemment à un temps « gris et froid » (15^{ème} rang). Les stations « continentales » sont alors les plus concernées par ce caractère hivernal désagréable (fréquence supérieure à 4% à Poitiers et Alençon, soit environ 15 jours par an), contrairement aux littoraux exposés sud-ouest qui bénéficient plus facilement de la douceur océane et du brassage de l'air (entre 1 et 2% à Brest, Lorient et La Rochelle, soit 3 à 6 jours par an).

A titre de comparaison, dans la région de Marseille, le *type de temps* « beau et chaud » apparaît en premier et rassemble à lui seul 18,9% des combinaisons : il est suivi par le *type de temps* « beau et doux » avec 13,8%. Ces valeurs expriment comparativement la plus forte luminosité et la plus grande stabilité du climat méditerranéen, particulièrement au printemps et en été, dans un contexte naturellement plus chaud.

Si certains *types de temps* apparaissent de façon récurrente, d'autres présentent en revanche un caractère beaucoup plus « aléatoire ». Les dix premiers *types de temps* du classement regroupent à eux seuls le tiers de la distribution. Inversement, les dix combinaisons les plus rares n'atteignent pas 0,5% du total ! Mais ces cas très rares n'en sont pas moins sur l'Homme et son environnement.

Le tableau 1 précise ces résultats pour les douze stations de référence. Pour chaque type de temps des différences de fréquences plus ou moins prononcées apparaissent, matérialisant des nuances climatiques intra régionales (par exemple, sur la deuxième ligne du tableau : la catégorie « gris, frais et arrosé » avec plus de 10% en Bretagne ouest et moins de 7% dans le sud du Grand Ouest, à La Rochelle et Cognac).

Tableau 1. Fréquence des 10 types de temps les plus fréquents et des 10 types de temps les moins fréquents dans le Grand Ouest de la France entre 1991 et 2010 (tableau extrait des 48 combinaisons possibles)

Description	BETAILLAGE										NORMANDIE	PAYS LOIRE		POITOU-CHARENTES	
	breuil	reistre	fin	disant	fortier	terres	caen	paries	argens	la		petiters	coquet		
1 Variable Dour	7.7%	7.5%	9.5%	10.1%	8.6%	8.0%	8.8%	8.0%	8.4%	8.1%	10.0%	7.7%	7.7%		
2 Grs frais Anosé	10.1%	11.7%	8.7%	7.7%	7.5%	6.5%	6.5%	7.5%	7.5%	7.5%	6.8%	8.2%	7.0%		
3 Grs frais	8.1%	8.2%	9.5%	8.5%	9.5%	8.3%	8.7%	9.5%	7.6%	8.2%	6.3%	8.3%	8.0%		
4 Nungueux Dour	8.3%	7.7%	8.3%	7.2%	9.0%	8.0%	8.3%	8.2%	8.0%	8.0%	6.7%	7.5%	6.8%		
5 Beau Dour	5.4%	4.9%	5.8%	7.0%	5.4%	6.0%	5.9%	6.0%	6.3%	8.7%	7.6%	7.6%	7.0%		
6 Grs Dour Anosé	7.6%	6.5%	6.9%	6.1%	6.1%	5.7%	5.4%	6.1%	5.7%	5.0%	4.8%	6.1%	6.2%		
7 Variable Frais	3.8%	5.5%	6.4%	6.7%	5.8%	6.7%	5.7%	6.2%	5.7%	5.6%	5.6%	5.2%	5.2%		
8 Grs Dour	6.7%	5.7%	6.8%	6.8%	7.0%	6.2%	5.8%	5.9%	6.2%	4.7%	4.7%	4.2%	4.2%		
9 Nungueux Frais	5.3%	5.4%	5.3%	5.1%	5.3%	6.5%	5.6%	5.5%	5.3%	4.6%	5.2%	4.7%	4.4%		
10 Beau Frais	3.8%	3.7%	3.9%	4.7%	3.9%	3.9%	3.9%	4.0%	4.2%	4.0%	3.9%	4.6%	5.5%		

37	Beau Dour Anosé	0.115%	0.05%	0.08%	0.35%	0.08%	0.10%	0.14%	0.08%	0.08%	0.08%	0.18%	0.24%	0.14%
38	Beau Frais Anosé	0.108%	0.12%	0.05%	0.08%	0.27%	0.10%	0.03%	0.03%	0.12%	0.08%	0.16%	0.12%	0.12%
39	Variable Chaud très Anosé	0.084%	0.02%	0.01%	0.03%	0.02%	0.05%	0.10%	0.10%	0.04%	0.14%	0.11%	0.15%	0.27%
40	Beau Chaud Anosé	0.075%	0%	0.03%	0.03%	0.03%	0.04%	0.04%	0.07%	0.04%	0.07%	0.22%	0.19%	0.15%
41	Grs Chaud très Anosé	0.073%	0.03%	0.05%	0.04%	0.05%	0.08%	0.10%	0.07%	0.07%	0.11%	0.12%	0.07%	0.14%
42	Beau Froid Anosé	0.059%	0.01%	0.05%	0.04%	0.04%	0.04%	0.03%	0.03%	0.04%	0%	0%	0%	0%
43	Nungueux Froid très Anosé	0.054%	0.05%	0.03%	0%	0.03%	0.01%	0.02%	0.04%	0%	0.01%	0%	0.05%	0%
44	Beau Froid très Anosé	0.016%	0%	0%	0%	0%	0%	0.02%	0.02%	0.02%	0%	0.01%	0.05%	0.08%
45	Beau Dour très Anosé	0.009%	0.03%	0%	0.01%	0.01%	0.01%	0%	0.01%	0%	0%	0%	0%	0.01%
46	Beau Frais très Anosé	0.006%	0.02%	0%	0.02%	0.05%	0%	0%	0%	0%	0%	0.01%	0%	0%
47	Variable Froid très Anosé	0.005%	0%	0%	0.01%	0.01%	0%	0%	0%	0%	0%	0.01%	0%	0.01%
48	Beau Froid très Anosé	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Fraction Classification: grs [0%, 20%] | nungueux [20%; 50%] | variable [50%; 80%] | beau [80%; 100%]
Température maxima: froid < 4°C | frais [4%; 12°C] | chaud > 12°C, 20°C | chaud > 20°C
Précipitations: sans pluie significative < 1mm | arrosage [11mm; 10mm] | ards arrosage > 10mm

² La période d'analyse 1991-2010 représente une série de 7305 jours consécutifs. Une fréquence de 1% correspond donc à environ 73 jours en 20 ans, soit une occurrence de 3 à 4 fois par an. Les valeurs notées 0,01% (arrondis de 0,013%) signifient que la combinaison ne s'est produite qu'une fois entre 1991 et 2010.

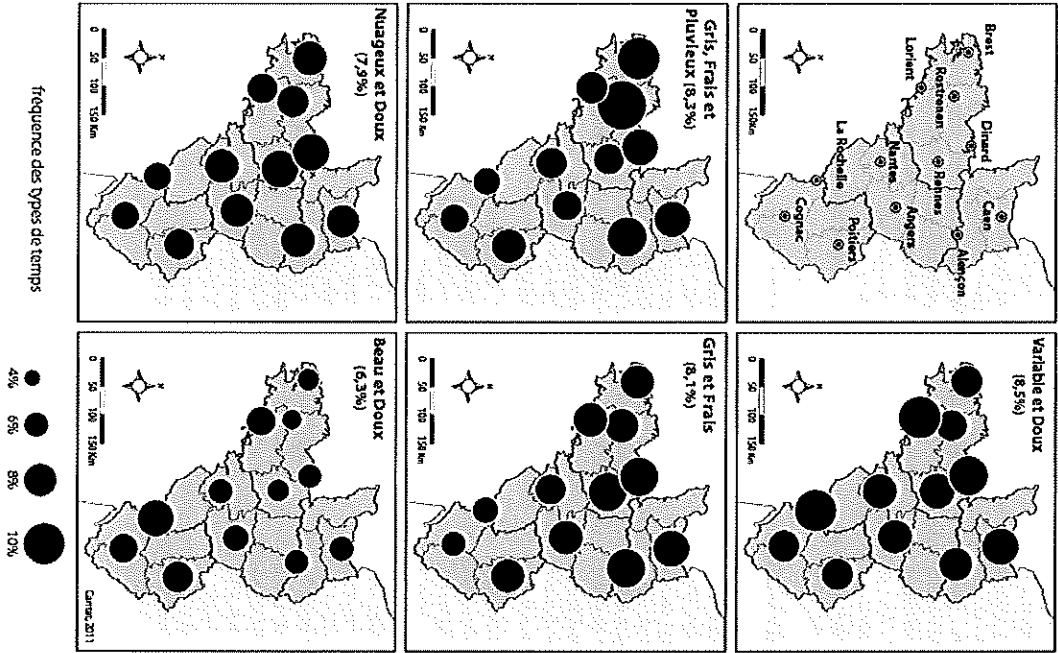


Figure 3. Diversité spatiale des 5 types de temps les plus fréquents dans le Grand Ouest de la France (moyenne sur la période 1991-2010)

L'évolution des « types de temps » dominants

A partir de cette classification des types de temps, la base de données disponible sur quarante ans pour les six stations retenues permet d'apprécier l'évolution du climat. Pour plus de lisibilité, et sans perdre d'informations majeures, ces stations ont été regroupées en deux ensembles (« Nord » et « Sud »), les moyennes quinquennales matérialisant la tendance générale.

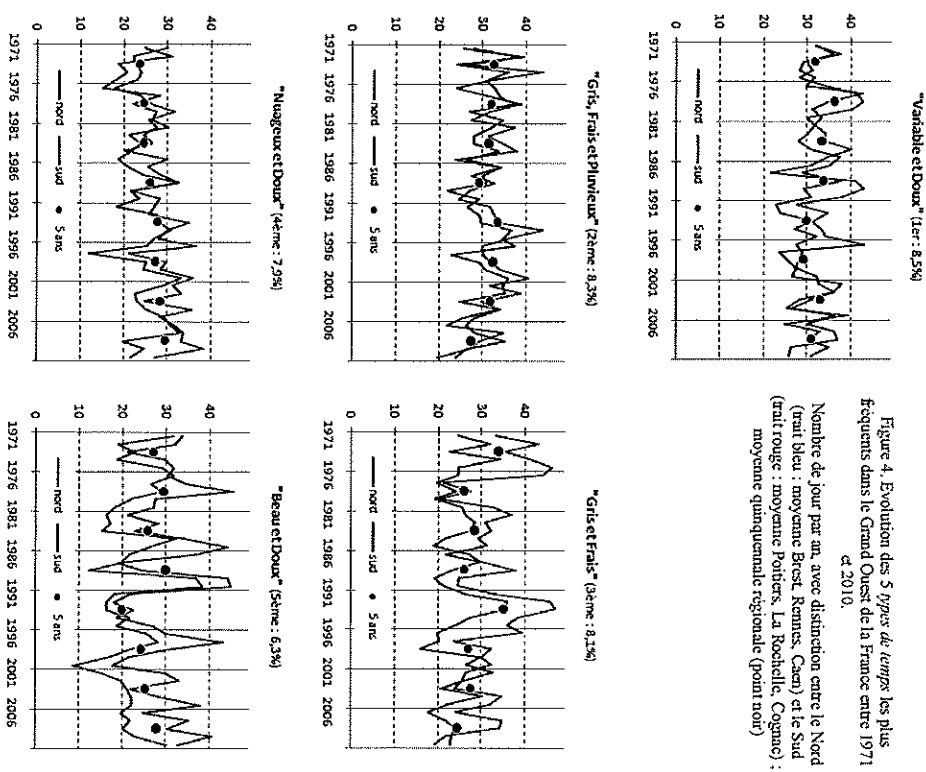


Figure 4. Evolution des 5 types de temps les plus fréquents dans le Grand Ouest de la France entre 1971 et 2010.
Nombre de jour par an, avec distinction entre le Nord (trait bleu : moyenne Brest, Rennes, Caen) et le Sud (trait rouge : moyenne Poitiers, La Rochelle, Cognac) : moyenne quinquennale régionale (point noir)

Ces graphiques traduisent en premier lieu la variabilité interannuelle des *types de temps* dans le Grand Ouest de la France, en accord avec les fluctuations habituelles de la circulation générale de l'atmosphère aux latitudes moyennes. Cependant, il est possible de discerner trois types présentant une variabilité modérée et généralement de faibles écarts entre le sud et le nord de la région : « variable et doux », « gris, frais et pluvieux » et « nuageux et doux » (colonne de gauche de la figure 4). Entre 1971 et 2010, les deux premiers semblent en très légère réduction, à l'inverse du troisième qui croît lui régulièrement.

Ces trois catégories s'opposent aux temps « gris et frais » et « beau et doux » qui sont beaucoup plus changeants et évoluent logiquement de façon antagoniste (colonne de droite de la figure 4). Ces *types de temps* présentent par ailleurs une nette dichotomie géographique entre le Nord et le Sud. Quant aux « sautes » importantes d'une année à l'autre, elles rendent délicate la mise en évidence d'une tendance générale, si ce n'est toutefois à partir de la décennie 1990 avec une croissance des temps « beau et doux » et inversement une réduction corrélative des temps « gris et frais ».

Les « types de temps » à risques dans le Grand Ouest de la France

Sur les 48 combinaisons possibles, certaines sont peu, voire très peu fréquentes sur le Grand Ouest de la France mais elles méritent néanmoins une attention particulière en raison des risques potentiels qu'elles engendrent. Globalement, ces *types de temps* présentent une variabilité interannuelle importante en raison de la non reproductibilité systématique des situations synoptiques qui les déterminent chaque année.

Pour illustrer ces cas, voici l'exemple des *types de temps* « froid et arrosé » – à l'origine notamment des risques de phénomènes glissants durant la saison froide – et celui des *types de temps* « beau et chaud », parfois générateurs de sécheresses, voire de canicules en été (tableau 2 et figure 5).

Tableau 2. Fréquence de *types de temps* à risques dans le Grand Ouest de la France entre 1991 et 2010. Exemples des temps « beau et chaud » et « gris, froid et arrosé » (tableau extrait des 48 combinaisons possibles)

Description	Fréquence régionale	BRETAGNE						NORMANDIE						PAYS LOIRE						POTOU-CHARENTES					
		Brest	renn	gran	lor	ren	caen	stap	ren	ag	la roche	po	co	Brest	renn	gran	lor	ren	caen	stap	ren	ag	la roche	po	co
13 Beau Chaud	2.8%	0.66%	1.01%	0.86%	2.05%	2.38%	1.10%	2.08%	3.59%	3.76%	6.04%	3.65%	6.42%	0.66%	1.01%	0.86%	2.05%	2.38%	1.10%	2.08%	3.59%	3.76%	6.04%	3.65%	6.42%
24 Gris Froid Arrosé	0.87%	0.77%	1.45%	0.78%	0.41%	0.79%	1.19%	1.48%	0.67%	0.81%	0.40%	0.94%	0.66%	0.77%	1.45%	0.78%	0.41%	0.79%	1.19%	1.48%	0.67%	0.81%	0.40%	0.94%	0.66%
29 Nuageux Froid Arrosé	0.39%	0.40%	0.67%	0.23%	0.21%	0.23%	0.44%	0.38%	0.15%	0.16%	0.12%	0.25%	0.21%	0.40%	0.67%	0.23%	0.21%	0.23%	0.44%	0.38%	0.15%	0.16%	0.12%	0.25%	0.21%
32 Variable Froid Arrosé	0.10%	0.26%	0.29%	0.12%	0.11%	0.14%	0.25%	0.27%	0.07%	0.04%	0.10%	0.23%	0.10%	0.26%	0.29%	0.12%	0.11%	0.14%	0.25%	0.27%	0.07%	0.04%	0.10%	0.23%	0.10%
33 Gris Froid très Arrosé	0.24%	0.08%	0.21%	0.12%	0.07%	0.08%	0.21%	0.31%	0.15%	0.15%	0.08%	0.12%	0.07%	0.08%	0.21%	0.12%	0.07%	0.08%	0.21%	0.31%	0.15%	0.15%	0.08%	0.12%	0.07%
42 Beau Froid Arrosé	0.03%	0.01%	0.05%	0.04%	0.04%	0.04%	0.04%	0.03%	0.05%	0.04%	0%	0%	0%	0.01%	0.05%	0.04%	0.04%	0.04%	0.04%	0.03%	0.05%	0.04%	0%	0%	0%
43 Nuageux Froid très Arrosé	0.02%	0.05%	0.03%	0%	0.05%	0.05%	0.05%	0.04%	0%	0%	0%	0.03%	0%	0.05%	0.03%	0%	0.05%	0.05%	0.05%	0.04%	0%	0%	0.03%	0%	0%
47 Variable Froid très Arrosé	0.005%	0%	0%	0.01%	0.01%	0%	0%	0%	0%	0%	0.01%	0%	0.01%	0%	0%	0.01%	0.01%	0%	0%	0%	0%	0.01%	0%	0.01%	0%
Total "froid et arrosé"	3.5%	1.6%	2.7%	1.3%	0.9%	1.2%	2.4%	2.7%	1.1%	1.1%	0.7%	1.6%	1.0%	1.6%	2.7%	1.3%	0.9%	1.2%	2.4%	2.7%	1.1%	1.1%	0.7%	1.6%	1.0%

Diversité spatiale et évolution des « types de temps froid et arrosé »

L'association des conditions de froid et de précipitations se retrouve préférentiellement sur le nord de la région (2 à 3% en Normandie et sur les hauteurs du centre Bretagne), alors que les côtes atlantiques sont presque totalement épargnées (moins de 1%). De fait, l'origine polaire des flux expose davantage le nord de la région⁴.

En précisant l'état du ciel et l'intensité des précipitations, il est possible de déterminer les causes synoptiques de chaque épisode froid et humide. Evoquons ici deux cas singuliers :

- le type « gris, froid et très arrosé » (0,14%) – synonyme par endroits de risques de blocages par la neige et de carambolages en série sur les routes s'expliquerait par des « retours d'est » (occlusion prononcée au sein d'une masse d'air très froid) ;
- le type « beau, froid et arrosé » (0,03%), *a priori* très paradoxal – car associant un ciel globalement très clair et des précipitations – résulterait soit des dernières averses d'une traîne active avant éclaircissement total du ciel, soit de l'arrivée brutale d'un front après une belle journée froide d'hiver.

La fréquence de ces temps « froids et arrosés » est généralement réduite sur le Grand Ouest (5 à 10 jours par an) mais il arrive que certaines années se démarquent de la fraîcheur humide coutumière de la mauvaise saison. Ces « Grands hivers » laissent des souvenirs d'autant plus forts que la neige et le verglas entraînent souvent des dégâts importants pour l'Homme et la végétation, peu ou pas préparés à ce genre de calamités. Sur la figure 5, n'apparaissent que les « Grands hivers » postérieurs à 1971, tels 1979, 1985 et 2010, mais il est fort probable que les plus anciens d'entre nous se souviennent davantage du long hiver 1962-1963...

L'évolution depuis quarante ans montre une nette réduction de ces *types de temps* entre le milieu des années 1980 et le début des années 2000. Cette tendance qui semblait s'affirmer est actuellement remise en cause par le retour d'épisodes hivernaux marqués au cours de ces cinq dernières années. Rappelons-nous de 2005 et surtout de 2010, avec un mois de décembre exceptionnel par la fréquence des chutes de neige, surtout sur le Nord de la région (14 jours à Alençon et 13 jours à Caen, alors que la moyenne est de 2,1 jours).

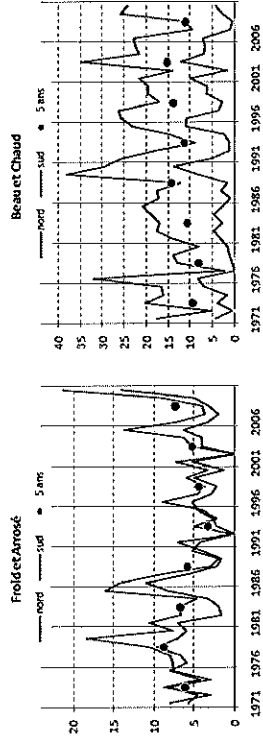


Figure 5. Evolution de deux types de temps à risques dans le Grand Ouest de la France entre 1971 et 2010. Nombre de jour par an, avec distinction entre le Nord (moyenne Brest, Rennes, Caen) et le Sud (moyenne Poitiers, La Rochelle, Cognac) ; moyenne quinquennale régionale (point noir)

⁴ Notons que par flux de nord-est sec et glacial, il se produit parfois des chutes de neige massives mais uniquement sur les côtes de la Manche en raison du contact entre l'air froid et les eaux tièdes (de 20 cm à plus de 60 cm localement, notamment sur le Cotentin).

Diversité spatiale et évolution des « types de temps beau et chaud »

Certaines années enregistrèrent la remontée précocée et durable des anticyclones subtropicaux, entraînant une fréquence remarquable du « beau temps chaud », particulièrement dans la moitié sud de la région (1976, 1989, 1990, 2003). La stabilité de l'air à tous les étages de l'atmosphère conduit fréquemment à la sécheresse des sols puis à celle des rivières, quelquefois à la création d'épisodes caniculaires. Dans le Grand Ouest, ces conditions « méditerranéennes » alternent souvent avec des « temps anglais », autrement qualifiés d'« étés pourris » par les météorologistes (1977, 1993, 2007). Des trains de perturbations atlantiques se succèdent alors dans un flux d'ouest bien établi, circulant à des latitudes anormalement basses pour la saison.

Les moyennes quinquennales écartent l'influence des *pics* et des *creux* et laissent apparaître une fréquence légèrement plus importante du type de temps « beau et chaud » depuis le milieu des années 1980 (cf. figure 5, droite).

Les séquences sèches et pluvieuses dans le Grand Ouest de la France

Parmi les trois paramètres composant les *types de temps*, les précipitations occupent une place particulière car elles peuvent se manifester « souloisement » par leur effet cumulatif. De fait, elles génèrent parfois des dommages importants, même sans intensité remarquable associée à des *types de temps* « exceptionnels ». C'est le cas en hiver, quand la consommation d'eau par les phénomènes évapotranspiratoires n'intervient plus et que des épisodes pluvieux perdurent assez longtemps (ruissellement, inondations...). Inversement, l'absence prolongée des précipitations engendre aussi des problèmes (sécheresses printanière et/ou estivale néfastes à l'agriculture ; sécheresses automnale et/ou hivernale préjudiciables pour la recharge des nappes phréatiques).

L'exemple des séquences sèches et pluvieuses en Bretagne (figure 6) illustre les aspects temporels et spatiaux du problème : d'une part, la diversité possible des situations d'une année à l'autre (longs épisodes secs en 1996 et pluviosité récurrente en 2000) et, d'autre part, les différences locales liées principalement au contexte topographique (exposition pour Brest et abri pour Rennes).

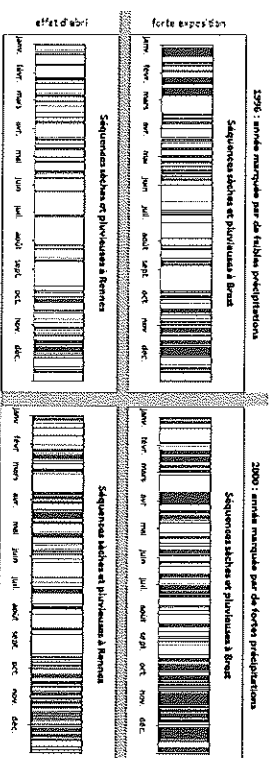


Figure 6. Séquences sèches (en jaune) et pluvieuses (en bleu) en Bretagne durant les années 1996 et 2000. Comparaison de Brest et de Rennes.

Pour représenter de façon plus globale ces risques liés aux excès ou à la pénurie d'eau générés par la répétition de conditions non nécessairement exceptionnelles, les plus longues séquences sèches et pluvieuses ont été calculées pour les six stations à partir du seuil de 1 mm par jour (figure 7).

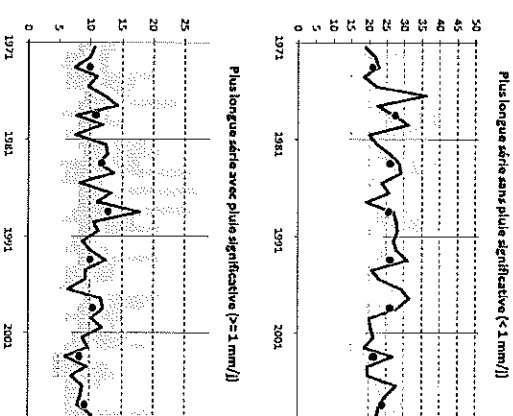


Figure 7. Evolution des plus longues séquences sèches et pluvieuses dans le Grand Ouest de la France entre 1971 et 2010. Nombre de jour par an : moyenne régionale (trait) ; valeurs minimale et maximale de l'une des six stations de référence (haut et bas des bâtons) ; moyenne quinquennale régionale (point noir)

Diversité spatiale et évolution des séquences sèches

Sur le Grand Ouest, la durée moyenne des plus longues séquences de dessèchement présente une assez grande régularité au pas de temps quinquennal – de l'ordre de 20 à 25 jours par an – avec une très légère réduction au cours de ces dix dernières années (figure 7, en haut).

Les valeurs-plancher sont constamment voisines de 15 à 20 jours, alors que les valeurs-plafond révèlent des oscillations plus marquées, avec des extrêmes parfois supérieurs à 40 jours. Certaines années offrent peu d'écart entre les stations, traduisant une certaine homogénéité des *types de temps* à l'échelle régionale (cf 2004, amplitude de 4 jours, de 18 à 22 jours). D'autres années sont au contraire beaucoup plus tranchées géographiquement (cf. 1979, durée record de 49 jours consécutifs à Rennes entre le 11 juin et le 29 juillet, mais seulement 24 jours maximum à Poitiers, 25 à Cognac et 26 à La Rochelle cette même année).

Plus globalement, les plus longues séquences sèches s'enregistrent indifféremment, selon les années, aussi bien à Rennes qu'à Cognac, Poitiers ou La Rochelle. Les moyennes décennales traduisent la faiblesse des écarts à l'intérieur du Grand Ouest (tableau 3, à

gauche). La sécheresse apparaît donc généralement plutôt comme un phénomène d'échelle supra régionale (en lien avec l'extension massive, précoce et durable vers le nord des hautes pressions mentionnée précédemment⁵).

Tableau 3. Durée moyenne décennale des plus longues séquences sèches et pluvieuses dans le Grand Ouest de la France entre 1971 et 2010

	Plus longue séquence sans pluies significatives					Plus longue séquence avec pluies significatives						
	Brest	Cen	Rennes	Poitiers	La Rochelle	Cognac	Brest	Cen	Rennes	Poitiers	La Rochelle	Cognac
1971-1980	20.3	24.5	26.6	23.9	26.1	23.3	14.7	9.7	7.4	8.3	11.4	10.3
1981-1990	21.3	23.8	29.9	26.4	28.8	24.4	19.9	11.4	8.3	8.8	12.0	13.3
1991-2000	22.2	24.4	27.1	27.2	27.2	27.4	14.2	9.3	7.1	9.3	11.3	10.1
2001-2010	20.3	20.1	25.3	25.4	23.8	22.4	13.5	8.5	7.8	7.0	7.8	7.2
1971-2010	21.0	23.2	27.2	26.2	26.5	24.4	15.6	9.7	7.7	8.4	10.6	10.2

Diversité spatiale et évolution des séquences pluvieuses

La situation est différente pour les plus longues séquences avec des précipitations significatives (figure 7 en bas et tableau 3, à droite). Contrairement aux sécheresses dont les causes paraissent liées à une configuration synoptique commune (exagération d'influences subtropicales sèches ou/et blocage des flux d'ouest), les épisodes pluvieux peuvent être d'origines plus variées et donc présenter une géographie plus contrastée. Les perturbations balayant en effet soit l'ensemble du Grand Ouest, soit de façon plus ciblée la partie nord du pays (cas fréquent en marge du mauvais temps circulant sur l'Angleterre, avec la Loire comme « frontière »), ou plus rarement uniquement la partie sud (lors de remontées d'air chaud, humide et instable par le Golfe de Gascogne notamment). A ces considérations liées à la dynamique générale de l'atmosphère, viennent se greffer les facteurs géographiques qui jouent alors un rôle essentiel pour expliquer des différences remarquables pour des sites peu éloignés. Ainsi, l'exposition directe de Brest aux flux d'ouest explique la persistance des épisodes pluvieux (durée maximale moyenne de 15,6 jours par an), contrairement à Rennes qui bénéficie de sa position d'abri topographique (7,7 jours par an).

Comme pour les sécheresses, les valeurs-plancher sont assez régulières (voisines de 5 à 8 jours par an), alors que les valeurs-plafond présentent une évolution plus complexe. A ce propos, les années 1980 apparaissent très chaotiques, avec notamment une succession tout en contraste entre 1984 et 1988 : 26-12-27-15-26 ! Les records datent de cette même période : 27 jours consécutifs à Brest, entre le 4 et le 30 janvier 1986, tandis que Rennes n'enregistrait que 4 jours de suite durant le même mois, rappelant ainsi le poids des facteurs géographiques lors des épisodes pluvieux. Depuis les années 1980, la variabilité interannuelle a globalement diminué et parallèlement la durée des plus longs épisodes pluvieux semble à la baisse.

⁵ Des sécheresses automnales et hivernales peuvent également se produire par blocage des flux d'ouest mais leurs effets immédiats sont plus limités (durée généralement moindre et surtout demande en eau de l'écosystème très faible). En hiver, cela peut correspondre à l'installation sur le nord de l'Europe d'un système de hautes pressions qui rejette les perturbations atlantiques plus au sud et draine vers nous des masses d'air continental froid et sec en provenance de Russie et/ou de Scandinavie. Le « barrage » provient parfois aussi d'une dorsale anticyclonique s'étendant des Açores jusqu'aux confins du Groenland.

Conclusion

Du nord de l'estuaire de la Garonne au sud de l'embouchure de la Seine, la position géographique avancée du Grand Ouest de la France et l'absence de relief marqué laissent le plus souvent libre cours à l'expression des influences océaniques. La dominante tempérée du climat qui en découle est cependant quelquefois entrecoupée par des épisodes atypiques, liés à l'intrusion de masses d'air tropical ou polaire aux caractères plus contrastés (sécheresse, canicule / vague de froid, neige et verglas, etc.). Derrière ces traits communs, le Grand Ouest présente toutefois une variété climatique réelle que l'on retrouve en toute logique à travers la diversité spatiale et temporelle de ses types de temps.

Au total, ce chapitre a présenté les contours actuels des types de temps et leur évolution au cours des quarante dernières années. Si les modifications d'ensemble apparaissent lentes, parfois même incertaines en raison du manque de recul historique dont nous disposons, *contrairement* l'analyse fait clairement ressortir une grande variabilité interannuelle, marquée notamment par des effets de persistance à fort impact environnemental et sociétal. Mais les enseignements que l'on peut en tirer aujourd'hui pour une meilleure adaptation de l'Homme à son climat risquent d'évoluer rapidement. En effet, le Changement climatique prévu dans les décennies à venir devrait entraîner des modifications plus profondes dans la fréquence et la succession des types de temps. En application des simulations climatiques synthétisées par le GIEC, on devrait notamment assister à un renforcement de la catégorie « gris, frais et pluvieux », en lien avec des précipitations plus abondantes en hiver (plus de ruissellements et d'inondations ?), et surtout à une croissance spectaculaire de la combinaison « beau et chaud » en raison d'une influence plus marquée des conditions subtropicales en été (plus de sécheresses et de canicules ?). Cette dernière hypothèse aux conséquences socio-économiques majeures est corroborée par les résultats du projet ClimSec publiés tout récemment par Météo France...

Bibliographie

Atmosphériques, 2005 : *Climat. Quel avenir ?* 26, 39 p.

CNRS, 2010 : *Dossier scientifique : le changement climatique*. 54, juin 2010. Website : <http://www.rayonnementducnrs.com/bulletin/654/>

GIEC, 2007 : *Climate change 2007: the physical science basis*, summary for policymakers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Website: <http://ipcc.ch/>

Jan J., Baraer F., 2004 : Episodes climatiques marquants sur le nord-ouest de la France. *Actes du 1^{er} colloque de l'AJC*. Caen, 17, 177-184.

METEO FRANCE, 2010 : *Projet ClimSec. Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol*. Météo France, Direction de la Climatologie. Website : <http://www.cnrm-game.fr/spip.php?article605>

Moisselin J.-M., Schneider M., Canellas C. et Mestre O., 2002 : Les changements climatiques en France au 20^{ème} siècle. Etude des longues séries de données homogénéisées de précipitations et températures. *La Météorologie*, 38, 45-56.

Mounier J., 1977 : Le type de temps un choix pour le géographe : climatologie synoptique ou climatologie compréhensive. *Cahiers du Centre de Climatologie de Dijon*, 7, 99-117.

Norris, 2004 : *Numéro spécial « les types de temps »*, Presses Universitaires de Rennes, 191, 145p.

Vigneau J.-P., 1997 : Le climat océanisé de la façade atlantique médiane de l'Europe. *Le climat, l'eau et les hommes*. Ouvrage en l'honneur de Jean Mounier, 227-244.

CHANGEMENT CLIMATIQUE ET VITICULTURE : LE CAS DU VAL DE LOIRE

C. Bonnetoy, H. Quénel, G. Barbeau, M. Madelin

Points marquants

Dans le cadre de cette étude des températures dans le vignoble du Val de Loire, une analyse comparative des températures issues du réseau Météo France est effectuée à l'échelle régionale, afin de caractériser le climat de la région et les premiers effets de ce réchauffement sur l'évolution des températures depuis le milieu du XXème siècle. La tendance est bien au réchauffement partout, surtout depuis les années 1980.

Cependant, le climat de la région du Val de Loire ne se présente pas comme un seul ensemble climatique puisque les différences d'un secteur à l'autre peuvent être marquées. A l'échelle des terroirs, le comportement des températures est directement lié à la topographie et à l'environnement des stations (pente, exposition, altitude, distance aux rivières et fleuves...). Enfin, il existe également d'importantes variations climatiques à l'échelle d'une simple parcelle, notamment en situation anticyclonique où les bas de coteau sont plus exposés au gel, ce que montrent bien les indices bioclimatiques de la vigne. L'imbriication des échelles est une étape importante en climatologie et permet de rendre compte de la complexité du climat avec une variabilité spatiale et temporelle importante des températures.

Le réchauffement climatique, déjà observé par les stations de référence, pourrait ainsi modifier la variabilité spatiale de certains paramètres climatiques au sein des vignobles et avoir un impact direct sur la typicité de certains vins produits.



Paysage des coteaux du Layon (Cyril Bonnetoy, septembre 2010)

Le réchauffement climatique planétaire, avéré par le GIEC (IPCC, 2007) ne se manifeste pas de la même façon partout (Pielke et al., 2002). Il est donc nécessaire de conduire des études à des échelles locales pour comprendre comment se traduisent ces changements. Cependant, aux échelles fines, les conditions climatiques au niveau de la couche limite (De Parcevaux, 2007) sont tributaires des conditions de surface. La végétation, l'occupation et la nature du sol ainsi que la topographie vont jouer sur la variabilité des températures dans l'espace (Dumas et al., 1997; Guyot, 1997; Bonnardot et al., 2001). Les réseaux de stations automatiques nationaux deviennent donc rapidement insuffisants à des échelles telles que celle du terroir viticole.

Il est alors nécessaire, pour espérer caractériser le climat d'un terroir, d'installer un réseau de stations adapté aux échelles fines. C'est la raison pour laquelle un dispositif de mesures météorologiques à échelles fines a été installé dans le Val de Loire, dans le cadre du projet ANR-TERVCLIM. Des stations météorologiques complètes ont été réparties au sein des différents vignobles de l'Anjou et du Saumurois ainsi que des capteurs de températures, enregistrant la température sous abri, dans l'appellation Coteau du Layon.

Le Val de Loire est une région à tradition viticole. Après avoir en grande partie disparu suite à la crise du phylloxera à la fin du XIX^{ème} siècle, les vignobles ont été réimplantés à l'aide de porte greffes américains. Aujourd'hui, les vignobles du Val de Loire se composent d'ouest en est des vins de Nantes, d'Anjou et de Saumur, de Touraine et du Centre (Figure 1). Ces vignobles se rapprochent de la limite septentrionale de la culture de la vigne (Gallet, 2000).

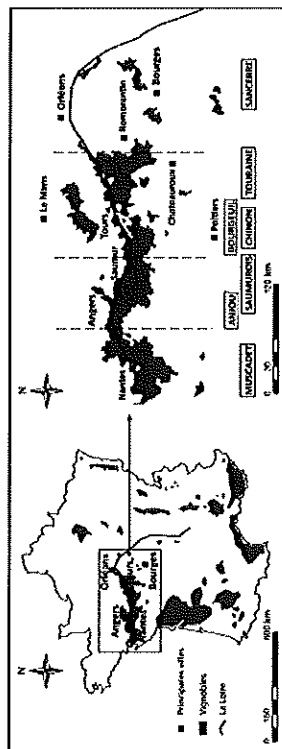


Figure 1. Localisation de la Vallée de la Loire, de ses vignobles et des stations météo (Météo-France)

Cette région viticole est soumise à un climat océanique à tendance septentrionale (Jacquet et al., 1998). Le pays Nantais bénéficie ainsi d'une influence océanique marquée mais qui se dégrade vers l'intérieur des terres avec cette fois-ci une influence plus continentale. Le relief, certes peu marqué en comparaison avec d'autres régions viticoles, contribue cependant dans certains secteurs à complexifier un peu plus la répartition des températures. Egalement, la Loire ou certaines autres rivières comme le Layon, influent directement sur les paramètres climatiques du secteur. Après un rappel sur les définitions des indices bioclimatiques en viticulture, il s'agit dans cette étude d'insister sur les différents niveaux d'échelles (du régional jusqu'à la parcelle) pertinents pour l'analyse climatique des terroirs viticoles.

1. Les indices bioclimatiques en viticulture

Dans le cadre d'études sur les relations climat et vigne, une importance toute particulière est très souvent apportée aux différents indices bioclimatiques. Ces indices peuvent être mis

très facilement en relation avec le fonctionnement de la vigne et la composition des raisins. Nous présenterons dans cette étude trois indices : l'indice des degrés jours de Winkler, l'indice héliothermique d'Huglin et l'indice de fraîcheur des nuits.

Indice de Winkler (Winkler et al., 1974) : correspond à la somme des températures moyennes journalières à partir de la base de 10°C qui est effectuée du 1^{er} avril au 31 octobre :

$$\text{Degrés-jours} = \sum T_j - 10 \quad (\text{avec } T_j > 10)$$

Cet indice, aussi appelé indice des degrés jours est particulièrement intéressant pour étudier les besoins en chaleur des différentes phases du cycle végétatif de la vigne (débourrement, floraison, véraison et maturité)

Indice héliothermique d'Huglin (Huglin et Schneider, 1998) : pour une station correspond à la valeur cumulée de l'indice à la date du 30 septembre, le cumul se faisant depuis le 1^{er} avril.

$$\text{Indice d'Huglin} = \sum [(T_m - 10) + (T_x - 10)/2]^n \cdot k$$

où, T_m = Température moyenne, T_x = Température maximale et k le coefficient de longueur du jour variant de 1,02 à 1,06 entre 40 et 50 degrés de latitude.

L'indice d'Huglin est intéressant à étudier pour la mise en relation avec la composition des grappes notamment lors de la maturité (taux de sucre et d'acidité).

Indice de fraîcheur des nuits (Tonietto, 1999) : correspond à la température minimale moyenne du mois de septembre dans l'hémisphère nord et du mois de mars dans l'hémisphère sud.

L'indice de fraîcheur des nuits est un indicateur important de la quantité des températures fraîches apportée à la plante puisque cette phase est notamment primordiale pour une bonne maturité des raisins et la bonne synthèse de certains composants nécessaires pour garantir la typicité des vins.

Ces trois indices, initialement développés pour classer les climats viticoles à une échelle régionale (tableau 1), seront souvent utilisés dans ce chapitre pour étudier la variabilité spatio-temporelle du climat à différentes échelles.

Tableau 1. Indices bioclimatiques de la vigne

Région	Indice de Winkler °C	Indice de Huglin		Indice de fraîcheur des nuits	
		Caractéristiques	Valeurs	Caractéristiques	Valeurs
V	>2205	Très Chaud	IH > 3000	Nuits Chaudes	IF ₁ IF > 18°C
IV	1927 to 2205	Chaud	IH+2 2400 ≤ IH ≤ 3000	Nuits Tempérées	IF ₂ 16°C ≤ IF < 18°C
III	1650 to 1926	Tempéré Chaud	IH+1 2100 ≤ IH ≤ 2400	Nuits Fraîches	IF ₃ 14°C ≤ IF < 16°C
II	1371 to 1649	Tempéré	IH-1 1800 ≤ IH ≤ 2100	Nuits très Fraîches	IF ₄ 12°C ≤ IF < 14°C
I	<1371	Frais	IH-2 1500 ≤ IH ≤ 1800	Nuits froides	IF ₅ IF < 12°C

Source : adapté de Tardieu, 2003 et Tonietto et Carbonneau, 2003

DOI:10.5517/10

2. Analyse régionale de l'évolution des conditions thermiques

Les données issues du réseau régional de Météo-France ont été utilisées afin de mettre en évidence les tendances et éventuelles ruptures statistiques dans les séries de données. Ainsi, un diagnostic climatique a été effectué sur la période 1951-2010 pour dix stations du Centre

Ouest français. Les tendances et ruptures ont été calculées pour les températures minimales et maximales mensuelles. Enfin, l'évolution d'indices bioclimatiques (indices de Winkler et d'Huglin) a été analysée à partir des données journalières de quatre stations : Nantes, Angers, Saumur et Tours.

2.1. Evolution des températures dans le Centre-Ouest français depuis le milieu du XX^{ème} siècle

Depuis le milieu du XX^{ème} siècle la tendance des températures est à la hausse dans le Centre-Ouest français, surtout à partir de la fin des années 1980. La figure 2 illustre cette hausse mais montre aussi une période particulièrement douce dans l'après-guerre suivie d'une période beaucoup plus fraîche dans les années 1960-70.

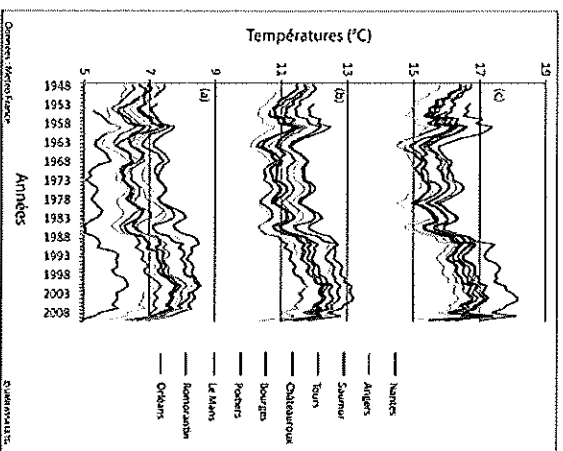


Figure 2. Evolution des températures moyennes annuelles (minimales (a), moyennes (b) et maximales (c)) pour 10 stations du Centre-Ouest français

Le test statistique de Pettit (Pettit, 1979) met en évidence une rupture climatique commune à toutes les stations météorologiques en 1987 pour les températures maximales. Cette rupture est un peu plus variable pour les températures minimales, variant de 1980 à Nantes, Angers, Le Mans à 1991 à Romorantin ou même 1993 pour Poitiers. Ce qui est ici important à signaler, c'est cette tendance significative au réchauffement à partir de la fin des années 1980 ou début des années 1990, tendance que l'on retrouve à l'échelle nationale dans l'ensemble du réseau Météo-France et même à échelle plus large en Europe de l'Ouest. La hausse des températures minimales entre la période pré- et post-rupture varie de 0,6°C à 1,2°C et de 0,8°C à 1,3°C pour les températures maximales.

2.2. Evolution des indices bioclimatiques depuis le milieu du XX^{ème} siècle

Dans le cadre d'une étude d'impact sur la vigne, il est aussi intéressant d'étudier certains indices bioclimatiques. Nous présentons ici l'évolution de deux de ces indices couramment utilisés dans la viticulture : l'indice de Winkler et l'indice de Huglin. Assez logiquement, en conséquence de la hausse des températures depuis les années 1950, les indices bioclimatiques ont progressé vers des catégories de climats viticoles plus chauds. La figure 3 présente la courbe du cumul moyen des degrés jours de Winkler sur deux périodes de 23 années avant et après l'année 1987.

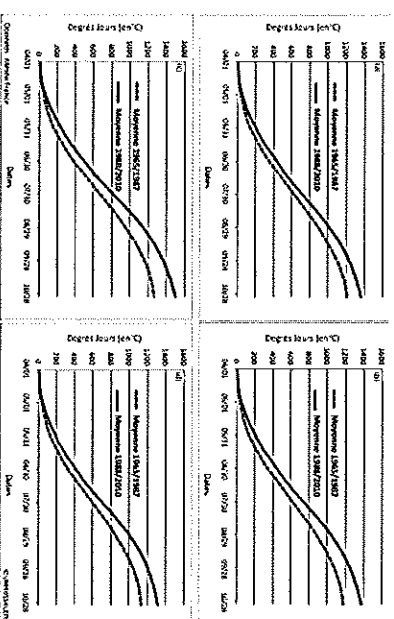


Figure 3. Evolution de l'indice des degrés jours de Winkler pour les stations de Nantes (a), Angers (b), Saumur (c) et Tours (d)

Les degrés jours de Winkler ont augmenté d'environ 190 unités en moyenne pour les quatre stations. Le climat de la station qui semble s'être le plus réchauffé est celui de Saumur avec une hausse de 233 unités entre les deux périodes. Cette station qui à la base est déjà dans l'un des secteurs les plus privilégiés en terme de température (Bonnefoy et al., 2010), comme le montre la figure 2, semble aussi avoir bénéficié d'une hausse plus rapide de la température au cours des 60 dernières années. Ainsi, si Nantes, Angers et Tours restent entre les deux périodes dans la région climatique de rang 1 (la plus fraîche selon Winkler), Saumur est passé désormais dans la région climatique de rang 2 avec un cumul moyen des degrés jours au 31 octobre de 1500 contre 1270 sur la période 1965/1987.

L'étude de l'indice de Huglin montre également une évolution vers des classes climatiques plus chaudes. La figure 4 illustre ce changement pour les quatre stations avec surtout une augmentation de l'indice après la fin des années 80.

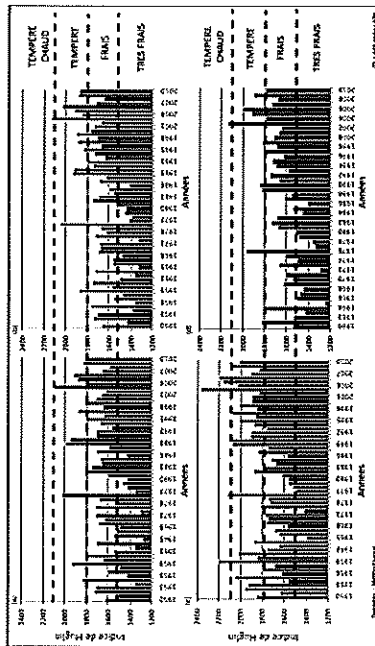


Figure 4. Evolution de l'indice héliothermique d'Huglin pour les stations de Nantes (a), Angers (b), Saumur (c) et Tours (d)

Ainsi, les stations de Nantes, Angers et Tours qui connaissent dans les années 1960-70 des caractéristiques climatiques plutôt fraîches, se retrouvent dans les années 1990 puis 2000 avec un climat plutôt classé dans le niveau tempéré de l'indice de Huglin. La station de Saumur, dans une région au départ plus chaude, montre une évolution de conditions climatiques fraîches à tempérées vers des conditions climatiques équivalentes au climat viticole tempéré chaud de l'indice de Huglin. Ceci signifie que la région de Saumur connaît désormais des conditions climatiques équivalentes à celles d'il y a 20 ou 30 ans dans la région de Montpellier.

3. Analyse topoclimatique des températures dans l'Anjou et le Saumurois

Un réseau de stations météorologiques complètes a été installé à partir de l'année 2008 dans la région de l'Anjou et du Saumurois grâce au programme Terviclim et l'Institut National de Recherche Agronomique. Ce réseau doit aider dans un premier temps à comprendre la variabilité spatiale du climat dans les terroirs viticoles, afin de mieux appréhender les évolutions futures de ces climats viticoles et les adaptations possibles pour les viticulteurs face à ces changements.

3.1. Variabilité spatiale des températures

Les données de températures de l'année 2010 ont été étudiées et la figure 5 présente le réseau de stations utilisé.

Les stations de Beaulieu, Faye d'Anjou et Cléré sont situées sur des plateaux dominant la vallée du Layon alors que la station de Chaumes est la seule des stations située au fond de cette vallée près de la rivière du Layon. Les stations de Haute-Perche, La Marre Lalande et Brissac sont localisées au sud de la ville d'Angers à proximité de la Loire sur des parcelles avec très peu de pentes. Enfin les stations de Saint-Cyr-en-Bourg et Souzay se trouvent dans la région du Saumurois. Le tableau 2 présente les températures minimales et maximales moyennes de chaque mois au cours de la saison végétative 2010.

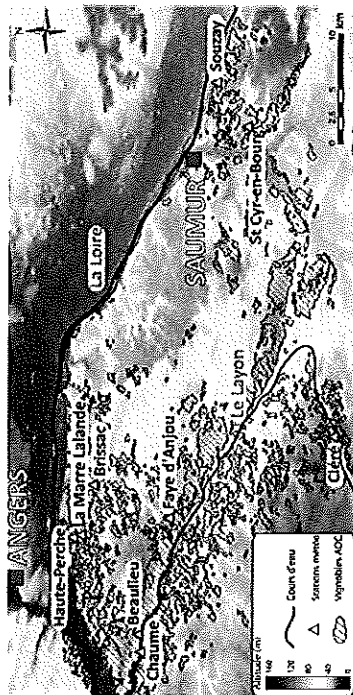


Figure 5. Le réseau Terviclim/INRA de stations complètes en Anjou et Saumurois (sources : BD carto/GN)

L'analyse des températures minimales au cours de la saison végétative montre des nuits relativement fraîches tout au long du cycle végétatif de la vigne puisque les moyennes mensuelles ne dépassent pas 15°C. Cependant, la station de Chaumes (bas de coteau dans la vallée du Layon) ressort comme celle avec les nuits les plus fraîches notamment au printemps (4,3°C au mois d'Avril). En effet, cette station, en raison de la mise en place de nombreuses nuits avec inversions thermiques, est particulièrement soumise au risque de gel tardif au printemps, ce gel pouvant entraîner des pertes importantes sur les bourgeons. Les stations connaissant les températures minimales les plus élevées sont situées à proximité de la Loire, fleuve qui tempère la baisse de la température durant la nuit, ou encore dans le Saumurois.

Tableau 2. Températures minimales (a) et maximales (b) moyennes de l'année 2010 pour les stations du réseau Terviclim/INRA

	AVRIL	MAI	JUN	JUILLET	AOÛT	SEPTEMBRE	SAISON
a							
Beaulieu	5,2	7,7	12,3	14,0	12,6	9,4	10,2
Brissac	5,8	8,3	12,6	14,4	13,1	9,6	10,6
Chaumes	4,3	7,3	11,8	13,2	11,8	8,1	9,4
St Cyr-en-Bourg	5,9	8,7	12,8	14,3	13,0	9,2	10,6
Souzay	6,0	8,7	13,2	14,8	13,4	9,9	11,0
Cléré	5,3	8,0	12,2	13,9	12,9	9,5	10,3
Faye d'Anjou	5,5	8,1	12,4	14,1	12,9	9,7	10,5
Haute-Perche	6,6	8,5	12,9	14,8	13,5	10,0	11,0
La Marre Lalande	6,0	8,6	12,6	14,5	13,3	9,7	10,8
	0 - 4,9°C	5 - 9,9°C	10 - 14,9°C				
b							
Beaulieu	17,5	18,2	23,9	27,4	24,8	22,3	22,3
Brissac	17,3	18,2	23,8	27,5	24,7	21,9	22,1
Chaumes	19,0	19,6	25,3	28,7	26,1	23,5	23,7
St Cyr-en-Bourg	18,9	19,7	25,4	28,6	26,5	23,5	23,7
Souzay	18,7	19,6	24,7	28,2	25,7	23,3	23,4
Cléré	17,3	18,3	23,7	27,4	25,5	22,6	22,5
Faye d'Anjou	17,2	17,8	23,5	27,0	24,2	21,7	21,9
Haute-Perche	18,2	18,4	23,9	27,9	24,7	22,3	22,5
La Marre Lalande	17,6	18,6	24,1	27,7	24,7	22,3	22,5
	15 - 19,9°C	20 - 24,9°C	25 - 29,9°C				

Données : Terviclim/INRA

Concernant les températures maximales, nous pouvons voir que la période chaude (température $\geq 25^{\circ}\text{C}$) dure en général un ou deux mois (juillet-Août) pour la plupart des stations mais trois mois pour les stations de Chaume et St-Cyr-en-Bourg. La station de Chaume bénéficie cette fois-ci de sa position d'abri en fond de vallée et connaît donc des températures maximales relativement élevées. La station de Saint-Cyr-en-Bourg, quant à elle, confirme les conditions climatiques plus favorables du secteur de Saumur.

3.2. Variabilité spatiale des indices bioclimatiques

Cette variabilité spatiale des températures s'observe également avec les indices de Winkler et d'Huglin, faisant notamment ressortir différentes catégories de climats viticoles pour la région (tableau 3). Considérant la précoïté des stades phénologiques observée dans le Val de Loire (Barbeau, 2007), l'indice de fraîcheur des nuits a été calculé sur la période du 15 août au 15 septembre.

Tableau 3. Indices bioclimatiques de l'année 2010 calculés pour les stations du réseau Tervelim/INRA

	INDICE WINKLER	INDICE HUGLIN	FN
Beaulieu		1792.8	12.0
Brissac	1274.1	1773.0	12.3
Chaumes	1317.5	1581.4	11.2
St-Cyr-en-Bourg	1492.7	2014.7	12.3
Souzay	1421.6	1976.3	12.6
Cléré		1816.5	12.2
Faye d'Anjou	1250.4	1746.2	12.4
Haute-Perche	1339.9	1835.5	12.7
La Motte Lalande	1334.2	1811.8	12.4

INDICE DE WINKLER

INDICE DE HUGLIN

INDICE DE FRAÎCHEUR DES NUITS

REGION I

REGION II

FRAIS

NUITS TRES FRAICHES

Données : Tervelim/INRA

© UMR 6554 UFRG

L'indice de Winkler fait ressortir deux types différents de climats viticoles, les climats des régions I et II. Ainsi, l'ensemble des stations sont classées en région I, hormis les stations du Saumurois, Saint-Cyr-en-Bourg et Souzay qui sont classées cette année-là en région II. L'indice de Huglin de la même manière, met en évidence deux classes climatiques viticoles. Les stations de Beaulieu, Brissac et Faye d'Anjou sont classées en région fraîche, alors que les autres stations sont en région tempérée. Enfin l'indice de fraîcheur des nuits montre que les nuits fraîches, favorables à une bonne maturation des grappes de raisin, sont assurées avec toutes les stations en catégorie « nuits fraîches » et Chaumes seule en catégorie « nuit très fraîches ».

4. Analyse à échelle fine des températures : exemple des Coteaux du Layon

Les vignobles de l'appellation « Coteaux du Layon » situés au sud d'Angers et à flanc de coteau dans le bassin du Layon ont été classés en AOC depuis 1950. Les vins de ces terroirs sont issus de vendanges tardives où l'on récolte le raisin en sur-maturité après tri (Blouin, 2007). C'est ainsi grâce au développement d'une pourriture noble (*Botrytis cinerea*) que la production de vin liquoreux est réalisée. La formation de ce champignon est en grande partie due à un climat spécifique.

Toujours au sein du même projet Tervelim, des capteurs de températures ont été installés à 60 cm du sol dans les coteaux du Layon. Ces 22 capteurs (figure 6) sont placés dans des abris météorologiques bien ventilés et nous fournissent une donnée de température toutes les 15 minutes. Ces données sont ensuite utilisées pour mettre en évidence des variations micro-locales du climat au sein même d'une parcelle et pour définir en particulier les secteurs les plus favorables au développement de la pourriture noble ou encore ceux susceptibles d'être plus soumis au gel que d'autres. Les capteurs ont ainsi été placés sur des versants opposés en haut de coteau, à mi-coteau et en bas de coteau et en fonction des différents types de sols.

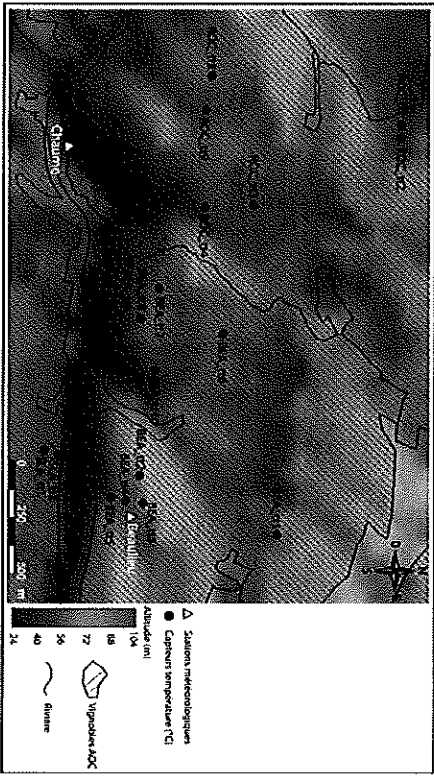


Figure 6. Le réseau (Tervelim) des capteurs de températures dans les coteaux du Layon (sources : BD carthoIGN)

4.1. Variabilité spatiale des températures

La figure 7 montre l'évolution des températures minimales et maximales moyennes pour l'année 2009 et pour cinq des 22 capteurs qui connaissent les plus grandes différences de températures. Nous pouvons notamment voir pour les températures minimales que le capteur BEA_t19 situé en bas de coteau et le capteur SLA_t11 en versant nord connaissent les températures minimales les plus basses, alors que les capteurs BEA_t13 (haut de coteau), ROC_t16 (haut de coteau sur la parcelle) et BEA_t11 (plateau) connaissent les températures minimales les plus élevées.

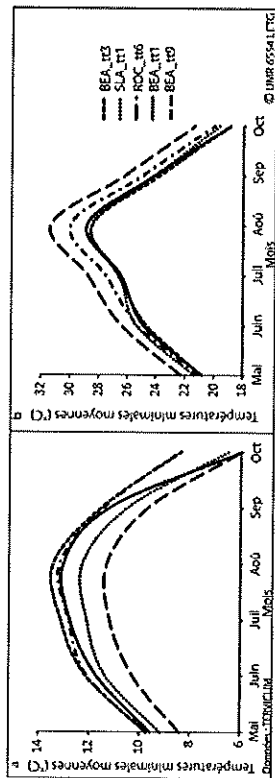


Figure 7. Evolution des températures moyennes mensuelles pour cinq capteurs de température dans les coteaux du Layon pour la saison végétative 2009.

Les températures maximales les plus élevées sont enregistrées à l'inverse en bas de coteau par les capteurs BEA_t19 ou encore ROC_t16. Les maximales les plus basses se trouvent sur les plateaux (BEA_t11), en haut de coteau (BEA_t13) et en exposition nord (SLA_t11).

La variabilité spatiale des températures s'explique donc par la position des capteurs sur les coteaux viticoles. En effet, les températures nocturnes semblent plus basses dans les bas de coteau près de la rivière du Layon alors que les nuits sont plus douces sur les plateaux. A l'inverse, en journée, les températures les plus élevées sont enregistrées dans les bas de coteau et les plus basses en haut de coteau. Ainsi, les amplitudes thermiques diurnes les plus marquées se trouvent dans les fonds de parcelles et ces fortes amplitudes diurnes conjuguées à une importante humidité engendrée par la proximité du Layon sont propices au développement de la pourriture noble.

4.2. Variabilité spatiale des indices bioclimatiques

Les indices bioclimatiques des degrés jours de Winkler et d'Huglin, à l'origine développés pour une échelle plus régionale, ont été utilisés à l'échelle fine des coteaux du Layon. Ils permettent à ce niveau d'échelle parcellaire de mettre en évidence la très forte variabilité spatiale du climat au sein de ces terroirs viticoles. La figure 8 présente l'indice des degrés jours calculés sur la saison végétative d'avril à septembre 2011 et l'indice d'Huglin pour tous les capteurs n'ayant pas subi de perte de données cette année-là.

Les indices des degrés jours mettent clairement en évidence la ceinture chaude de mi-coteau, bien connue en viticulture, alors que les indices les plus faibles se retrouvent sur les plateaux (ROC_t12, ROC_t13, BEA_t11, BEA_t16) et en bas de coteau (ROC_t15, ROC_t16, ROC_t17, SLA_t12). Concernant l'indice de Huglin, qui donne un poids plus important aux températures maximales, les indices les plus élevés se retrouvent plutôt sur les bas de coteaux (ROC_t16, SLA_t11, BEA_t15) et certains sur les mi-coteaux aux pentes plus importantes (BEA_t13, BEA_t14, BEA_t17, BEA_t10).

L'analyse des indices bioclimatiques confirme donc cette grande variabilité spatiale des conditions climatiques dans le vignoble des coteaux du Layon. L'indice de Huglin indique que deux classes climatiques (tempéré et tempéré chaud) sont présentes dans le site d'étude qui ne représente pourtant qu'une superficie de 600 ha. Différents facteurs sont à l'origine de cette variabilité : il sera donc nécessaire de réaliser une expertise plus poussée, comme la modélisation multicritères, pour bien mettre en évidence les facteurs influençant le climat dans ces terroirs.

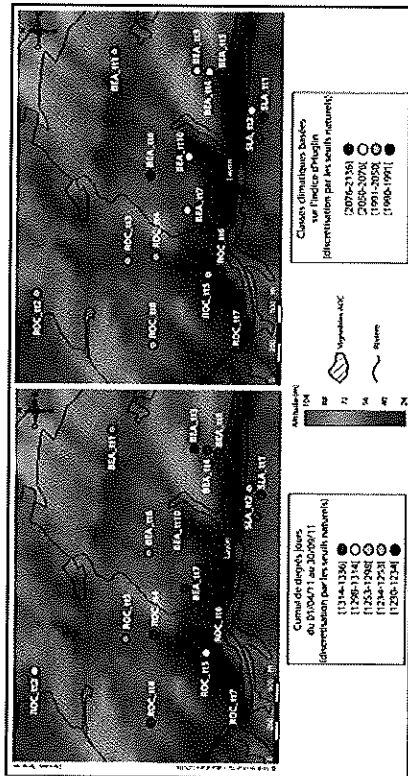


Figure 8. Les indices bioclimatiques de l'année 2011 calculés à l'échelle des coteaux du Layon pour 16 capteurs

Conclusion

L'imbrication des échelles est une étape importante en climatologie fine et permet de se rendre compte de la complexité du climat à diverses échelles avec une variabilité spatiale et temporelle importante des températures. Le climat de la région du Val de Loire ne se présente pas comme un seul ensemble climatique puisque les différences d'un secteur à l'autre peuvent être marquées. Cependant la tendance est bien au réchauffement partout, surtout depuis les années 1980. A l'échelle des terroirs, le comportement des températures est directement lié à la topographie et à l'environnement des stations (pente, exposition, altitude, distance aux rivières et fleuves...). Enfin, il existe également d'importantes variations climatiques à l'échelle d'une simple parcelle, notamment en situation anticyclonique où les bas de coteau sont plus exposés au gel. Le réchauffement climatique, déjà observé par les stations de référence, pourrait ainsi modifier la variabilité spatiale de certains paramètres climatiques au sein des vignobles et ainsi avoir un impact direct sur la typicité de certains vins produits. Le programme de recherche Terviclim sur l'observation et la modélisation spatiale du climat à l'échelle du terroir a donc pour objectif d'affiner la résolution des observations et de la modélisation dans un contexte de changement climatique afin de fournir aux professionnels viticoles des scénarios adaptés à l'échelle des vignobles.

Bibliographie

- Blouin J., 2007 : *Le dictionnaire de la vigne et du vin*, Dunod, 351p
- Barbeau G., 2007 : Climat et vigne en moyenne vallée de la Loire, France. *Congrès sur le climat et la viticulture*, Saragosse, Espagne, 10-14 avril, seconde session "climat et terroir", 96-101.
- Bonardot V., Carey V., Planchon O., Cautenet S., 2001 : Sea breeze mechanism and observations of its effects in the Stellenbosch wine producing area, *Wynboer* 10-14, Wineand, 107-113.

- Bonnefoy C., Quénoï H., Planchon O., Barbeau G., 2010 : Températures et indices bioclimatiques dans le vignoble du Val de Loire dans un contexte de changement climatique. *EchoGéo* [Online], 14: 13p. URL : <http://echogeo.revues.org/12146>
- De Parcevaux S., Hubert L., 2007 : *Bioclimatologie, concepts et applications*, éditions Quae, 324 p
- Dumas V., Lebon E., Morlat R., 1997 : Différenciations mésoclimatiques au sein du vignoble alsacien. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 31(1), 1-9.
- Galet P., 2000 : *Précis de viticulture*, 602 p
- Guyot G., 1997 : *Climatologie de l'Environnement*, Masson, 505 p
- Huglin P., Schneider C., 1998 : *Biologie et écologie de la vigne*, Paris, Lavoisier, 370p.
- IPCC, 2007 : *Rapport du groupe de travail I du GIEC : Bilan 2007 des changements climatiques les bases scientifiques physiques*, Cambridge Univ. Press: Cambridge, U.K.
- Jacquet A., Morlat R., 1998 : Caractérisation de la variabilité climatique des terroirs viticoles en Val de Loire: Influence du paysage et des facteurs physiques du milieu. *Agronomie*, 17, 465-480
- Petit A.-N., 1979: A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics* 28(2).
- Pielke SR, R.A. Stohlgren, T., Schell, L., Patton, W., Doesken, N., Redmond, K., Money, J., Meeker, T., Kittel, T.G.F., 2002, Problems in evaluating regional and local trends in temperature : an example from the Eastern Colorado, USA. *International Journal of Climatology*, 22, 421-434
- Tonietto J., 1999 : *Les macroclimats viticoles mondiaux et l'influence du mesoclimat sur la typicité de la Syrah et du Muscat de Hambourg dans le sud de la France : méthodologie de caractérisation*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomique : Montpellier.
- Winkler A.J., Cook J.A., Kislwer W.M., Lider L.A., 1974 : *General viticulture*, Berkeley, University of California, 710p.

Ces annexes sont à destination des instances d'évaluation et ne doivent pas être diffusées sans l'accord préalable écrit de leurs auteurs.

Ressources environnementales et changement climatique

D. Delahaye, C. Gascuel-Odoux,

Introduction

Les ressources environnementales, que ce soit le sol, l'air, la biodiversité, l'eau, sont impactées par le climat. Cet impact est tout d'abord direct et quasi synchrone : l'augmentation des températures de l'air induit une augmentation des températures de l'eau. Il est aussi le plus souvent indirect, donc retardé, et se manifestant par de effets multiples. L'augmentation des températures de l'air, donc du sol, induit une minéralisation plus forte de l'azote du sol, mais aussi une dénitification plus forte. Les conditions pluviométriques, donc l'humidité du sol, agissent aussi. Au final il nous est difficile de dire par une analyse simple et a priori dans quel sens et avec quelle amplitude le changement climatique peut impacter la concentration et les flux de nitrate des eaux. Cet exemple illustre la difficulté à identifier le rôle du climat sur les ressources environnementales.

Les principales composantes du climat qui jouent sur les ressources environnementales sont l'augmentation tendancielle des températures, en particulier des minima et des moyennes, la modification du régime des précipitations, avec des hivers plus pluvieux, des étés plus secs, la modification de variables qui en dépendent (évapotranspiration, humidité de l'air...) et l'apparition d'événements extrêmes plus importants. Les canicules sont considérées comme une des conséquences majeures des changements climatiques (Easterling et al., 2000).

Le changement climatique induit des effets à différentes échelles de temps, par le biais de différentes variables de forçage. La première échelle est celle de l'événement climatique, avec le questionnement suivant : quel peut être l'impact d'une fréquence plus grande d'événements atypiques, extrêmes ? Les crues, les inondations, les phénomènes érosifs intenses peuvent-ils perturber la qualité des sols et des eaux, à l'échelle de cet événement, ou en induisant des changements profonds de l'environnement ? On montre par exemple que les concentrations en nitrates dans les rivières ont augmenté de manière tangible en 1976, année de grande sécheresse, alors même que l'intensification de l'agriculture était en cours depuis une ou deux décennies. La seconde échelle est celle de l'année, en prenant en compte notamment sa saisonnalité, avec le questionnement suivant : les alternances de saisons plus marquées, voire la fréquence plus importante de saisons atypiques peuvent-elles modifier la qualité des sols et des eaux ? Les deux échelles suivantes portent sur la variabilité interannuelle dont on sait qu'elle sera plus grande, et sur les évolutions tendancielle du climat.

Peu de travaux ont encore été faits sur l'impact du changement climatique sur l'environnement, notamment dans le Grand Ouest, et nous en sommes encore au questionnement. Deux grandes approches sont développées : regarder les données anciennes, et analyser en quoi le climat a modifié les ressources ; utiliser les modèles et les scénarios climatiques pour porter des projections sur l'état futur des ressources. Dans la première approche, il faut disposer d'un très bon corpus de données. Ces données peuvent provenir de deux sources, les Observatoires de Recherche en Environnement mis en place sur des petits bassins versants très instrumentés, qui disposent alors de chroniques longues et riches, et les réseaux opérationnels de surveillance, par exemple ceux concernant la qualité des eaux. Ces deux types de données anciennes ont été mobilisées. Dans la seconde approche qui concerne les projections, il faut disposer de modèles qui représentent bien les réalités physiques, chimiques et biologiques de l'environnement, pour les utiliser dans des conditions

climatiques, pour lesquelles, par nature, ils n'ont pas été calibrés. Dans ce second cas, il faudra bien sûr disposer de données de qualité pour élaborer et tester ces modèles, mais ces modèles devraient nous permettre d'identifier des risques et opportunités pour le futur. Quoiqu'il en soit, les incertitudes sur les scénarios climatiques, les imprécisions inhérentes à tout recours à une modélisation, amènent des incertitudes fortes sur le diagnostic porté sur l'évolution des ressources dans le contexte du changement climatique. Ces deux approches ou postures sont utilisées dans ce chapitre, distinctement, ou de manière complémentaire.

Les questions liées à l'effet de la variabilité et du changement climatique sur l'environnement, doivent nous interroger sur le potentiel d'adaptation de ces ressources, sur les risques et opportunités qu'elles permettent, sur la variabilité de cette adaptation au sein d'une grande région comme le Grand Ouest de la France.

Le cycle de l'eau dans les bassins versants ; débits et zones humides

Philippe Merot, Alice Aubert, Jim Josse, Etienne Le Paven,

Les points marquants

La forte variabilité inter annuelle intrinsèque des débits des rivières, ainsi que la perturbation des régimes liés à l'utilisation de l'eau et aux aménagements empêchent d'observer un effet quelconque du changement climatique sur les débits. Cela est particulièrement vrai en régime océanique, et le sera moins en régime glaciaire ou nival.

La simulation des débits à l'aide de modèles hydrologiques adaptés au contexte géomorphologique et climatique du Grand Ouest a été réalisée jusqu'en 2100, en appliquant les séries climatiques du scénario Alb, en Bretagne et Pays de Loire. En Bretagne la baisse des débits rapportée au passé récent est de l'ordre de 20 à 25% que l'on soit en futur proche ou en futur lointain. Elle est plus importante en Pays de Loire et peut atteindre plus de 40% en futur lointain.

Alors que le pic de débit se situe toujours centrés sur le mois de mars, l'étiage s'accroît et se décale des mois de septembre Octobre aux mois de Octobre Novembre et la reprise des débits est plus lente.

Ces tous premiers résultats, qui ne permettent pas de mesurer l'incertitude sur ces valeurs, sont cependant corroborés par les résultats obtenus avec d'autres modèles sur d'autres bassins du Nord de la France (la Seine notamment), (voir également le chapitre sur la qualité des eaux).

L'extension des zones humides est également modifiée par le changement climatique. Un modèle adapté à la simulation de l'extension des zones humides, développé par les équipes rennaises, a été appliqué avec le même scénario. Il montrerait une vulnérabilité des zones humides de tête de bassin assez forte, avec une diminution de leur surface de 10 à 20% entre le futur proche et le futur lointain rapporté au passé récent. Les zones humides aval (plaines d'inondation ...) seraient, dans le futur, moins sensibles et ne subiraient une rétraction que de quelques pour cent.

Le débit des cours d'eau face au changement climatique

La modification du régime des eaux et des ressources en eau devrait être, aux yeux de tout un chacun une conséquence première et logique du changement climatique, puisqu'il affecte les fonctions d'entrée (la hauteur, fréquence et intensité des pluies, la fonte de la neige et des glaciers), les fonctions de consommation (l'évapotranspiration), les conditions internes au bassin versant (état de surface, capacité de stockage, humidité des sols, extension des zones humides), et finalement l'usage des sols (irrigation par exemple) (Anderson et al., 2008). Sa mise en évidence sur les chroniques passées est paradoxalement difficile voir contradictoire, sauf pour certains cas très spécifiques tels que :

- Les fleuves et rivières influencés par un régime nivo-glaciaire, qui ne concernent cependant pas le Grand-Ouest. La caractéristique marquante du grand Ouest est justement que les ressources sont endogènes, sans ressources extérieures à la région, de régime clairement océanique, avec des débits forts en hiver et faibles en été, sans ressources profondes importantes susceptibles d'être mobilisées.

Les accidents climatiques entraînant des sécheresses ou des inondations. Il est vraisemblable que l'augmentation de ces accidents soit une conséquence du changement climatique, mais cela n'a été prouvé jusqu'ici que dans de rares cas, comme les inondations en Angleterre et Pays de Galles de l'automne 2000 (Pall et al., 2011). Le rapport du GIEC de Novembre 2011, le premier consacré aux événements extrêmes, est très prudent : Si la responsabilité du changement climatique est vraisemblable dans l'augmentation des sécheresses, il y a une faible confiance dans l'augmentation des inondations parce que les processus régionaux sont complexes et les évidences limitées.

La variabilité intrinsèque des débits des cours d'eau.

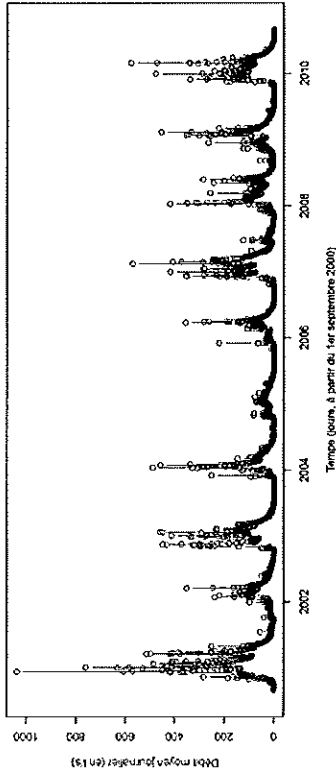
Cette difficulté à prouver l'influence du changement climatique sur les débits passés est liée, d'une part à la très forte variabilité intrinsèque du régime des eaux (beaucoup plus importante que celle des pluies), qui demande donc d'avoir de très longues séries pour observer des évolutions, d'autre part à l'influence très forte des activités humaines sur le régime des eaux (barrages, prélèvements d'eau, rejets, irrigation, etc...), qui brouille l'effet du changement climatique sur le régime hydrologique.

Nous présentons ici à titre d'exemple 10 années de débits quotidiens, mesurés dans le bassin versant du Coet Dan, à la station de Kervidy, dans le cadre de l'ORE AgHys (site qui servira de référence dans le chapitre sur la qualité des eaux). Ce bassin a un débit moyen interannuel de 10,6 l/s/km².

On constate sur la figure, la grande variabilité interannuelle des débits de cette petite rivière (quelques km²) sur substrat schisteux. On peut exprimer cela par l'hydraulicité (le rapport entre le débit de l'année sur le débit moyen). L'hydraulicité de 2000-2001 est de 2,22; celle de 2004-2005 est de 0,33, soit un rapport de l'ordre de 1 à 7, pour des pluies qui varient de 1323 mm à 470 mm, soit un rapport de 1 à 3.

On pourra comparer cette variabilité interannuelle des débits à l'ordre de grandeur des évolutions de débits sous contrainte de changement climatique, dont on présentera la simulation dans les paragraphes à suivre.

Chronique des débits à l'exutoire de Kervidy-Naizin



La simulation des débits par des modèles, sous des hypothèses de changement climatique, permet de dépasser ces difficultés et d'apporter des informations cruciales, même si les conclusions doivent être tirées avec prudence du fait de l'incertitude des scénarios et de la rusticité des modèles. En France, les travaux sur la Seine et la Loire (Ducharme et al., 2007) ont évalué l'effet du changement climatique sur l'hydrologie de ces bassins du Nord de la France. Notre objectif ici est d'évaluer les grandes tendances des débits des rivières du Grand Ouest dans les décennies à venir.

Méthode. Des simulations avec des modèles hydrologiques adaptés au grand ouest (Top-Model et TNT2) ont été réalisées sur le bassin du Scorff (Morbihan), en considérant des projections climatiques issues du scénario A1b du GIEC. On a considéré ce bassin comme un bassin « virtuel » auquel on a appliqué 3 climats, correspondant à un gradient Sud-Est/Nord-Ouest de projections climatiques faites pour le Grand Ouest, de manière à le soumettre à des contraintes climatiques variées. La sensibilité des débits et des zones humides à ces projections climatiques a été testée.

Tableau 1 – Caractéristiques des projections climatiques utilisées pour simuler les débits du Scorff

	Montreuil-Bellay	Naizin	Ploudaniel
latitude	47°08'11.43N	47°59'21.9N	48°32'15.3N
longitude	00°09'11.2 O	02°49'56.1O	04°18'43.4O
P moyenne annuelle (mm)	584	813	1004
ET0 moyenne annuelle (mm)	933	876	690

Les résultats sont présentés sous forme de moyenne sur des séries chronologiques de 30 ans, ces périodes longues permettant de gommer la variabilité des données journalières. Les quatre périodes utilisées, calculées du 1er janvier au 31 décembre, sont les suivantes :

- 1971- 2000, appelée 'passé récent' (PR)
- 2001- 2030, appelée 'actuel' (ACT)
- 2031- 2060, appelée 'futur proche' (FP)
- 2071- 2100, appelée 'futur lointain' (FL). Sur cette modalité, on a aussi considéré un accroissement de 2 ppm de CO2 par an, lié à l'effet du climat sur la plante (FL + CO2)

Les chroniques climatiques sont désagrégées¹ à l'échelle régionale par la méthode dynamique "Quantile-Quantile" (Brisson, 2010) issues du scénario A1b du GIEC. Le scénario A1b est un scénario qui prévoit 2 à 4 ppm de CO2 atmosphérique supplémentaire par an et une augmentation de la température de 3,2°C à l'horizon 2100. Les données climatiques utilisées ont été les précipitations journalières et l'ET0 journalière.

Simulation de l'évolution des débits du Scorff avec les projections climatiques de Bretagne centrale

L'analyse de l'évolution des variables d'intérêt (précipitation, évapotranspiration, débit par saison), pour les 5 modalités prédéfinies (passé récent, actuel, futur proche, futur lointain, futur lointain + CO2), montre (Figure 2 et 3) :

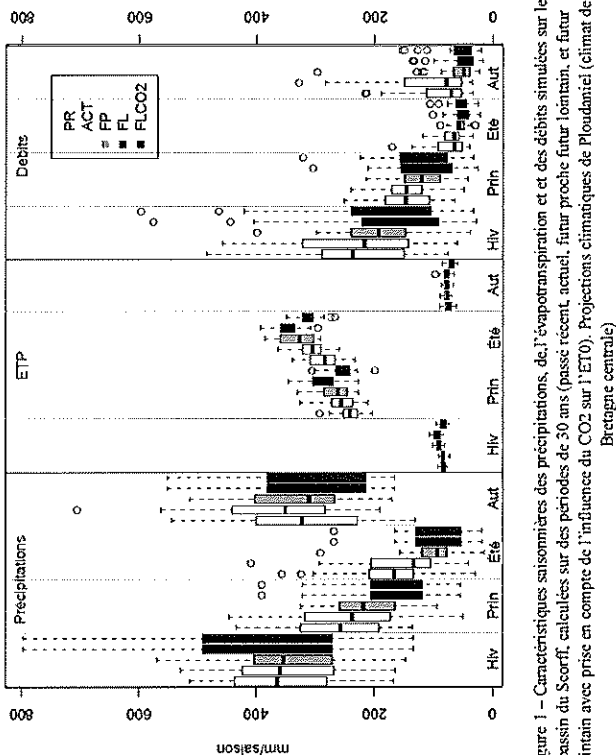


Figure 1 – Caractéristiques saisonnières des précipitations, de l'évapotranspiration et des débits simulés sur le bassin du Scorff, calculées sur des périodes de 30 ans (passé récent, actuel, futur proche futur lointain, et futur lointain avec prise en compte de l'influence du CO2 sur l'ET0). Projections climatiques de Ploudaniel (climat de Bretagne centrale)

- En hiver, une diminution des débits dès le futur proche (PR), de l'ordre 18%, reflétant plus l'augmentation de l'évapotranspiration que la diminution des pluies. Les débits ne diminuent que de 11% en futur lointain avec CO2.
- Au printemps, les débits diminuent de façon parallèle à la période hivernale.

¹ Désagrégation : définir à une échelle plus grande que celle de la chronique initiale. Ex : désagréger des données nationales à l'échelle régionale.

- En Eté, les débits diminuent des l'actuel de 9%, puis de 24 et 28%. Ils ne diminuent que de 18% en futur lointain avec CO2.
 - En Automne, les débits augmentent en actuel de 26%, puis diminuent de 27 et 41%. Ils ne diminuent que de 35% en futur lointain avec CO2.
- Sur l'année, on observe globalement une stabilité des débits pour l'actuel, puis une diminution de 20 à 25%.

Lorsqu'on regarde de plus près la dynamique des débits au cours de l'année (figure 2), on voit que le pic de fort débit se situe toujours à la même période (Mars), mais que l'étiage se renforce et s'allonge, puisque la reprise des écoulements se fait plus en Septembre, mais en Novembre.

Cette figure permet également de comparer les simulations avec ou non prise en compte du forçage physiologique (CO₂). On constate une retroaction négative en hiver et au printemps, mais un effet négligeable en été et en automne, dû à la faiblesse de la réserve en eau des sols, et donc à la faible évaporation réelle pour les 2 simulations.

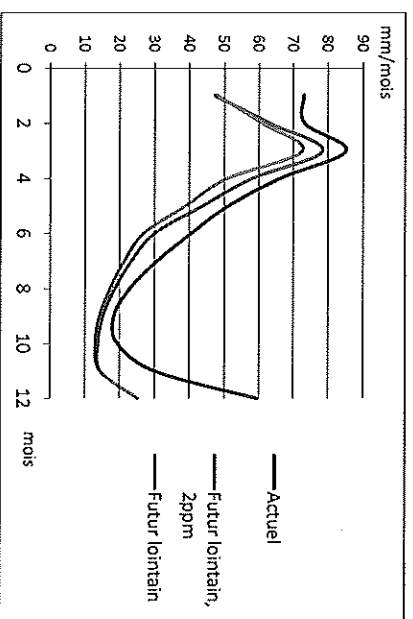


Figure 2 - Chronique des débits moyens mensuel (mêmes données que figure 2) pour les 3 modalités indiquées

Simulation de l'évolution des débits d'un bassin « virtuel » avec les projections climatiques de Bretagne Sud et de Pays de Loire

Lorsque l'on simule les débits sous l'hypothèse des projections climatiques des stations de Nazin et Montreuil Bellay, qui présentent une pluviosité plus faible et une ETO plus forte (Tableau 1), on observe des tendances identiques, avec des pourcentages d'évolution voisin pour Nazin, mais significativement plus fort pour Montreuil Bellay, atteignant une baisse de plus de 40% sur les débits annuels.

Nous présentons dans la figure les résultats les plus significatifs, pour le futur proche et le futur lointain.

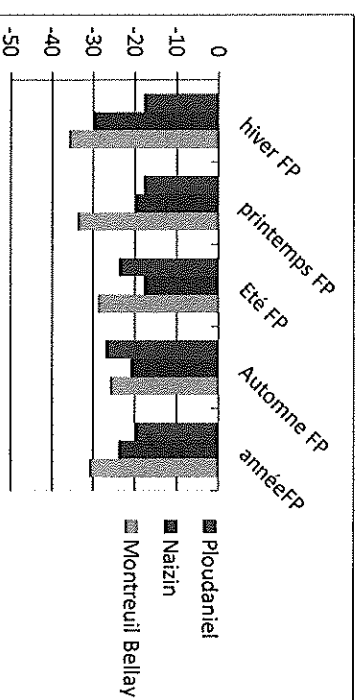


Figure 3 : évolution des débits pour le futur proche (haut) et pour le futur lointain (bas) simulée avec les pluviomètres de centre Bretagne (Ploudaniel), Sud Bretagne (Nazin et Pays de Loire) (Montreuil Bellay)

En futur proche, on constate une baisse relative de 20 à 30% des débits moyens annuels selon la localisation. La baisse se répartie différemment entre les saisons selon la localisation, et est plus marquée en hiver et au printemps dans le Sud.

En futur lointain, on constate une baisse de 23 à 43% des débits moyens annuels selon la localisation. La baisse relative est plus importante et été et automne en Bretagne et par contre répartie de façon assez régulière sur toute l'année en Pays de Loire.

Ces estimations, qui ne prennent en compte qu'une simulation, ne doivent être pris que comme des ordres de grandeurs des changements possibles. D'autres estimations avec non plus Top-Model, mais un modèle agro-hydrologique sont présentes plus loin dans l'ouvrage, et donnent des résultats similaires. On retrouve également les résultats proposés sur la Seine par A. Ducharme, obtenus là par une démarche de modèles multiples permettant d'associer une incertitude à ces estimations. Les résultats obtenus ici reflètent cependant de façon assez fidèle les changements des projections climatiques, qui portent la partie la plus importante de l'incertitude sur les résultats de modélisation (A. Ducharme, 2011), bien avant l'incertitude liée aux modèles.

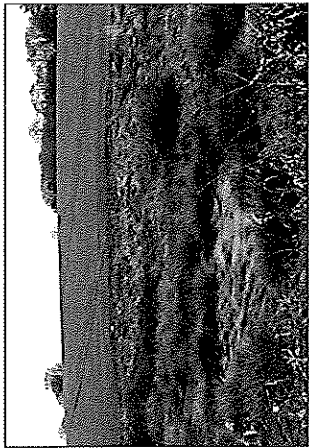
On constate in fine en futur proche une évolution relativement modérée des débits moyens, qui s'accroît vers le sud du grand Ouest. Ces variations sont bien inférieure à la variabilité interannuelle observée depuis toujours, et qui cache les évolutions liées au changement climatique. On observe des baisses de débit qui toucheront toutes les saisons et entraîneront un allongement de la période d'étiage, avec des reprises d'écoulement plutôt en novembre qu'en septembre. Cette évolution sera plus sensible dans le sud du Grand Ouest, là où les débits sont déjà plus faibles que dans le nord.

En futur lointain, il y a un véritable décrochement entre le Nord de la Loire et le Sud. Au nord, les diminutions de débit restent du même ordre de grandeur qu'en futur proche

Le devenir des zones humides sous l'influence du changement climatique

Introduction

Les zones humides sont des systèmes clés dans le fonctionnement des bassins versant tant sur le plan hydrologique que sur le plan de la qualité de l'eau. En effet, elles constituent, dans nos régions, l'émergence des nappes d'eau superficielles. Elles sont à l'interface entre la rivière et les versants qui les alimentent en eau, et donc contrôlent la dynamique de l'eau au cours de l'année. Ces zones humides sont aussi des zones tampons qui régulent la qualité de l'eau du fait de conditions biogéochimiques spécifiques, liées à la saturation du sol en eau.



Une zone humide d'amont de bassin versant

Les zones humides, écosystèmes entre terres et eaux, sont par leur nature même, vulnérables à toutes les modifications du cycle de l'eau et donc aux changements climatiques. Les scientifiques et gestionnaires de l'environnement s'inquiètent ainsi des menaces sur l'existence des zones humides (Anderson *et al.*, 2008, Kundzewicz *et al.*, 2007) et sur les fonctions et services écosystémiques qu'elles assurent (ASWM, 2009). Les observations passées, revisitées dans la perspective du changement climatique, montrent une grande

vulnérabilité des zones humides. Ceci a été mis en évidence sous différents climats : le long de gradients climatique comme en Australie, on a observé sur une période de 40 ans des phases de contraction/expansion de la superficie des zones humides, d'amplitude décennale, reliées aux variations de facteurs du climat (Keith, Rodoreda & Bodward, 2010) ; dans les zones arides, (Roshier *et al.*, 2001) montrent que les écosystèmes humides, dépendant de quelques pluies fortes et peu fréquentes sont clairement vulnérable à tout changement en fréquence ou intensité de ces pluies. Dans les régions plus tempérées, on observe l'effet du changement climatique sur les sols, avec par exemple une tendance à la sécheresse des sols sur des séquences longues comme depuis 1880 en Bretagne (voir chapitre sécheresse dans l'ouvrage) (Lamy & Dubreuil, 2010), depuis 1950 dans le Brandebourg, (Holsten *et al.*, 2009).

Aux USA, (David & Gorman, 2008), (Faulkner & Chivoiu, 2008) ou dans la région des Prairies (canada) , riches en « pothole » (petites dépressions humides fermées liées à la période glaciaire) (Niemuth, Wangler & Reynolds, 2010) des dispositifs d'observation sont mis en place pour suivre l'impact du climat sur les zones humides et y adapter la gestion.

Cela justifie que l'on regarde ce que vont devenir les zones humides sous l'effet du changement climatique. Dans une perspective de modélisation de l'impact du CC, (Acreman *et al.*, 2009) soulignent la dépendance étroite entre les fonctions des zones humides et leur régime hydrologique. Il oppose les zones humides alimentées par la pluie, des plaines d'inondation). (Winter, 2000), à partir du concept de paysage hydrologique (Winter, 2001). souligne parallèlement que la vulnérabilité des zones humides aux changements du climat dépend de leur position dans le paysage hydrologique.

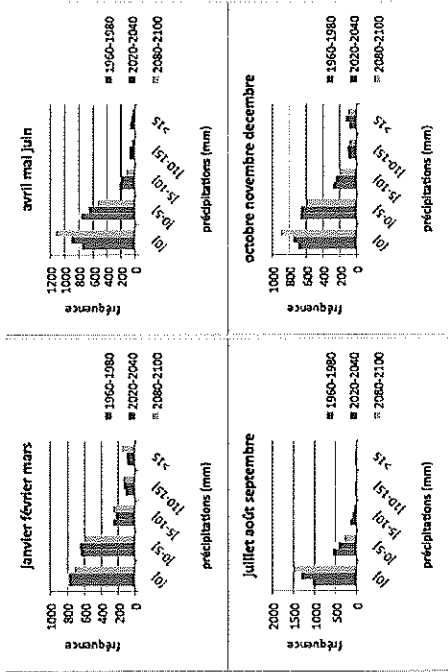


Figure Evolution de la pluviométrie pour les 3 périodes étudiée. En abscisse, classe de hauteur de précipitation. On, constate que la variation de la pluviométrie est variable selon les saisons, avec une forte diminution au printemps et en été.

Comment délimiter les zones humides dans le futur ?

Les méthodes de délimitation des zones humides *actuelles* sont bien connues des gestionnaires. Depuis la loi sur l'eau, de nombreux textes techniques et réglementaires ont précisé les critères : critères de sol (sols hydromorphes), de végétation (végétation hydrophile) ou hydrologique (présence d'eau). Par ailleurs, des méthodes de prédiction de la délimitation des zones humides ont été développées à partir de la connaissance que l'on a des processus qui préside à l'installation des zones humides. L'extension des zones humides dépend des flux d'eau et des gradients d'écoulement. Ces derniers peuvent être connus par la topographie. Ces flux et gradients peuvent être modélisés. Le modèle hydrologique Top-model (Beven and Kirkby, 1979) est particulièrement adapté à l'Ouest de la France pour modéliser ses flux et ses gradients et a été à la base de méthodes de délimitation de zones humides. Une des premières méthodes, qui a été précurseur de beaucoup d'autres a été développée en Bretagne, validée à l'échelle européenne (Merot et al., 2003), et mise à disposition des professionnels à l'échelle régionale (http://agro-transfert-bretagne.univ-rennes1.fr/Territ_eau/, voir la boîte à outil). Cette méthode prend en compte les facteurs qui déterminent la localisation des zones humides, à savoir la pente locale, qui contrôle les possibilités d'écoulement ou de stagnation de l'eau, et la quantité d'eau reçu par ce point, qui dépend de la dimension de la zone d'alimentation de ce point et de la quantité d'eau disponible (où pluie efficace, CAD pluie diminuée de l'évaporation). On calcule ainsi un indice climato-topographique, qui après seuillage et calage sur la limite réelle des zones humides représentatives, permet de prédire la délimitation des zones humides à l'échelle régionale. Nous pouvons donc cartographier l'extension des zones humides dans les conditions d'aujourd'hui, mais également dans les conditions climatiques futures, en nous appuyant sur des scénarios climatiques, qui permettent de prédire la pluie efficace dans le futur.

Par ailleurs, le fonctionnement des zones humides dépend de leur position dans le bassin versant, entre l'amont et l'aval du bassin. En effet, à l'amont, elles sont plus liées aux versants et plus directement à la pluie qui les alimentent : à l'aval, elles sont plus alimentées par la rivière. Donc leur sensibilité aux changements de conditions climatiques sera différente. Nous analyserons donc l'influence de la position des zones humides sur le devenir. Pour cela, les bassins seront classés en fonction de leur ordre, l'ordre 1 correspondant aux bassins d'amont les plus petits, les ordres supérieurs (2, 3...) croissent au niveau des confluences des affluents, jusqu'à l'exutoire.

Nous avons simulé le devenir des zones humides sur un bassin réel, le bassin versant du Scorff, selon le scénario A1 B. La méthode demande plusieurs étapes : délimitation d'un réseau de drainage mono et multidirectionnel, calcul de pentes, calcul des valeurs d'indices en pour les différentes périodes d'intérêt (passé récent, futur proche, futur lointain)

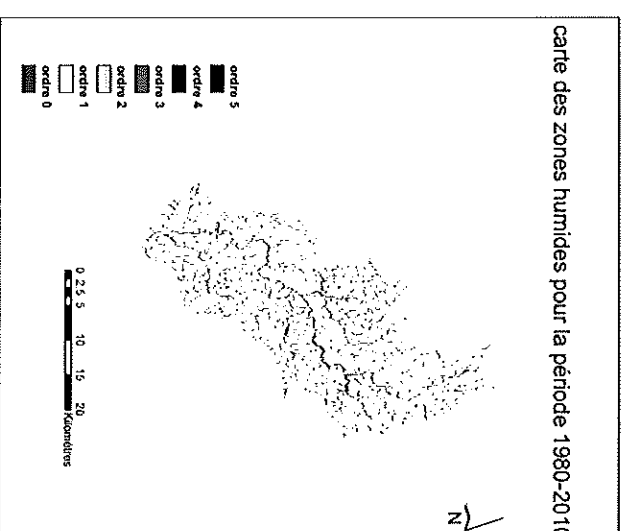
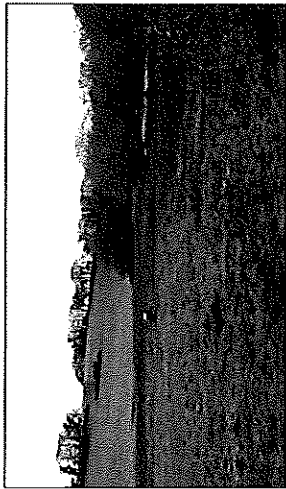


Figure 1. Carte des zones humides déterminée à l'aide de l'indice climato-topographique, et classée par ordre

Les résultats, présentés dans le tableau 2 appellent des commentaires. Le calcul de la surface de zone humide par ordre permet de distinguer un fonctionnement différent selon les ordres. Quelque soit le modèle de drainage utilisé (monodirectionnel, multidirectionnel ou mixte), les zones humides associées aux bassins versant d'amont présentent une sensibilité plus grande au changement climatique. On note une diminution de 10,25% en moyenne d'ici 2040 s'étendant à 20,48% en 2100 pour les zones humides associées à un ordre 1 contre une diminution de 1,27% puis 3,30% pour une zone humide associée à un ordre 6. Cependant, les bassins versants d'ordre 1 et 2 représentent la superficie la plus importante des bassins (supérieure à 2/3). C'est donc une forte diminution en moyenne que l'on pourrait voir dans le futur. Cependant, les grandes zones humides à l'aval des bassins ne devraient pas être trop affectées. On retrouve en cela les résultats obtenus sur le bassin de la Seine par les équipes d'hydrologues travaillant sur la Seine, au sein du PIREN Seine.

fig 1 : Diminution moyenne des zones humides tous modèles de drainage confondus

Ordre	absolue	relative	absolue	relative
ordre 1	10,3%	20%		
ordre 2	3,2%	7,00%		
ordre 3	2,4%	5,0%		
ordre 4	2,0%	4,2%		
ordre 5	1,7%	3,8%		
ordre 6	1,3%	3,3%		



Une zone humide à l'aval d'un bassin versant

Anderson, J. E., Arblaster, K., Bartley, J., Cooper, T., Kettunen, M., Kaphengst, T., Leipprand, A., Laaser, C., Umpfenbach, K., Kuusisto, E., Lepistö, A., and Holmberg, M., 2008. Climate change induced water stress and its impact on natural and managed ecosystems. European Parliament, Policy Department Brussels

Bever, K. and Kirkby, M. J., 1979. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.* 24, 43-69.

Ducharme, A., Baubion, C., Beaudoin, N., Benoit, M., Bilien, G., Brisson, N., Garnier, J., Kieken, H., Lebonvallet, S., Ledoux, E., Mary, B., Mignolet, C., Poux, X., Sauboua, E., Schott, C., Thery, S., and Viennot, P., 2007. Long term prospective of the Seine River system: Confronting climatic and direct anthropogenic changes. *Science of the Total Environment* 375, 292-311.

Merot, P., Squitiant, H., Aurousseau, P., Hefing, M., Burt, T., Maitre, V., Kruk, M., Butturini, A., Thenail, C., and Vaud, V., 2003. Testing a climate-topographic index for predicting wetlands distribution along an European climate gradient. *Ecol. Model.* 163, 51-71.

Pall, P., Aina, T., Stone, D. A., Stott, P. A., Nozawa, T., Hilberts, A. G., Lohmann, D., and Allen, M. R., 2011. Anthropogenic greenhouse gas contribution to flood risk in England and Wales in autumn 2000. *Nature* 470, 382-386.

Beaujouan, V., Durand, P., Ruiz, L., Aurousseau, P., Cotteret, G., 2002. A hydrological model dedicated to topography-based simulation of nitrogen transfer and transformation: rationale and application to the geomorphology-denitrification relationship. *Hydrol. Process.* 16, 493-507.

Bancal, M.O., Gate, P., 2010. Changement climatiques et culture de blé: l'essentiel des formalisations et paramétrisation de la STICS crop model, Quae (Eds), Versailles, 297 p.

Brisson, N., 2010. Changement climatiques et cultures de maïs et sorgho : l'essentiel des impacts. *Livre vert Projet Climator.*

Durand, J.L., Bernard, F., Lardy, R., Graux, A.I., 2010. Changement climatiques et prairie: l'essentiel des impacts. *Livre vert Projet Climator.*

Etude des effets du changement climatique sur la réserve en eau des sols et les phénomènes de sécheresse

Chloé Lamy¹, Vincent Dubreuil¹, Blainine Lemerrier²,
Olivier Cantat^{3,4}, Patrick Le Gouat^{3,4}, Abdelkrim Bensaid^{3,4}, Edwige Sannouet⁵

¹ Laboratoire COSTEL, UMR 6554 LETG CNRS, Université Rennes 2

² Laboratoire Science du Sol, Agrocampus Ouest

³ Université de Caen Basse-Normandie, laboratoire GEOPHEN, UMR 6554 LETG, F-14032 Caen, France

⁴ CNRS, UMR 6554 LETG, F-14032 Caen, France

⁵ Université de Metz, laboratoire CEGUM, EA 1105, F-57000 Metz, France

Points marquants

Dans ce chapitre, en plus des données climatiques et du relief, une connaissance très précise des sols – via leur réserve utile – permet d'accéder à une cartographie fiable et à un suivi des disponibilités en eau dans le sol à l'échelle plurikilométrique ou de la parcelle agricole. Les résultats diffèrent parfois assez sensiblement de ceux obtenus par les procédures traditionnelles qui, par défaut d'informations existantes, considèrent l'espace comme plan et affectent à la réserve utile du sol une valeur conventionnelle de 100 ou 125 mm, selon les auteurs. Or, une étude approfondie sur la Bretagne et le Calvados montre des valeurs variant de 10 à 270 mm.

Le suivi des réserves en eau des sols est présenté ici à partir de deux études faites sur le territoire breton et le Calvados. Ces deux études ont des approches différentes, s'appuyant sur des données principalement climatologiques ou pédologiques. Les phénomènes de sécheresses ont ainsi été étudiés en Bretagne de 1950 à 2100 à partir de bilans hydriques stationnels et spatialisés. Les projections climatiques, issues du modèle ARPEGE-Climat de Météo-France dans le cas du scénario A1B, sont utilisées en données d'entrées de modèles de bilans hydriques. Ces bilans ont mis en évidence, à partir du suivi du déficit d'évaporation et de l'évolution de la réserve hydrique, une augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses au cours du 21^{ème} siècle. Cette évolution n'est pas homogène, puisque l'augmentation serait faible, jusque dans les années 2050, par rapport à l'intensité attendue au cours de la seconde moitié du 21^{ème} siècle. En plus d'événements secs gagnant en intensité, cette étude a mis en évidence une recharge automnale retardée d'un mois en l'espace de 50 ans sur le territoire breton.

L'étude sur le Calvados, faite à une échelle plus fine, est particulièrement adaptée à la lecture des contraintes hydriques, utile pour les acteurs en charge de la gestion et de l'aménagement du territoire (problèmes liés aux sécheresses, aux inondations, à l'érosion des sols...). mais aussi pour l'agriculteur, puisque la fine résolution spatiale permet d'identifier les exploitations les plus affectées par les déficits et les surplus en eau des sols. Une simulation des conditions pédoclimatiques à l'horizon 2100 met en lumière de nouvelles contraintes à venir pour le Grand Ouest de la France (plus d'inondations hivernales et de sécheresses estivales). Pour nos régions rurales, cela pose à moyen terme la question de la vulnérabilité des systèmes de production agricole pour lesquels la sécheresse accrue des sols durant la saison végétale serait la plus impactante. Dans le cadre du *Développement durable*, les deux exemples présentés ici

soulignent la nécessité de réfléchir dès aujourd'hui à des stratégies d'adaptation de l'agriculture pour atténuer les effets attendus du changement climatique.

Le sol : une composante essentielle dans le cycle de l'eau et pour la production agricole

La place du sol dans le cycle de l'eau

Le cheminement de l'eau entre l'Atmosphère et la Terre sous forme de précipitations – avant son retour dans l'Atmosphère – par évaporation – s'organise dans le cadre du cycle de l'eau. La figure 1 présente de façon simplifiée le circuit intégral de l'eau dans la nature (bilan hydrologique, cadre bleu) et précise les composantes d'un bilan partiel à caractère agro-climatique de cette eau (bilan hydrique, cadre vert).

De par ses caractéristiques variables d'un lieu à un autre (épaisseur, texture, charge en cailloux, teneur en matière organique...), le sol joue un rôle essentiel dans les processus biologiques mais aussi hydrologiques et géomorphologiques, à l'origine de la diversité des paysages. Ainsi, quand les sols sont saturés (réserve utile RU pleine) ou les pluies trop violentes, l'excédent de précipitations (P) comparé à la demande évapo-transpiratoire (ET) constitue le surplus hydrologique (S). Une part de ce surplus est un vecteur important d'érosion des sols par ruissellement de surface (S1) ; l'autre partie s'infiltre et percole vers les profondeurs à travers la porosité du sol et du sous-sol (S2), contribuant ainsi à la recharge des nappes d'eau souterraines (R) qui interviennent directement dans l'alimentation des cours d'eau (Q).

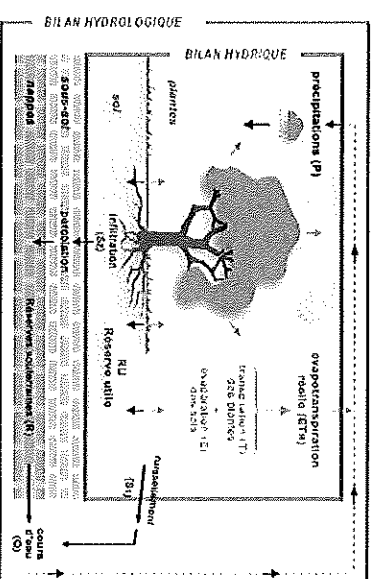


Figure 1. Figureation simplifiée du bilan hydrologique (cycle complet de l'eau dans la nature) et du bilan hydrique (cycle partiel de l'eau, ne prenant pas en compte les réserves souterraines profondes mais seulement celles que contient le sol agronomique, appelées réserve utile ou RU).

Le bilan hydrique : un outil pour déterminer la quantité d'eau présente dans le sol

Grâce à sa perception complète des relations entre l'atmosphère, le sol et les plantes, le bilan hydrique permet de calculer la quantité d'eau présente dans le sol et constitue de ce fait un bon indicateur pour évaluer les contraintes pédoclimatiques pesant sur les cultures. Le bilan hydrique consiste en la comparaison de la lame d'eau tombée à la surface d'un territoire (bassin versant...) *i.e.* les précipitations, et les différentes formes de transfert de cette eau par évapotranspiration, écoulement, infiltration et alimentation des nappes souterraines.

Si nous considérons le sol comme une éponge, une fraction de l'eau retenue par celle-ci entretient l'évaporation physique des surfaces humides (E) et la transpiration des végétaux (T), le tout constituant l'évapotranspiration réelle (ETR). Cette eau directement mobilisable par l'atmosphère et les plantes, correspond à la réserve utile (RU), élément fondamental dans le calcul du bilan hydrique dont l'équation fondamentale est :

$$P = ETR + S \pm \Delta RU$$

P : les précipitations (mm) ; ETR : l'évapotranspiration réelle (mm) ; S : le surplus hydrologique, composé par le ruissellement S_i et l'infiltration profonde S_p (mm) ; Δ RU : les variations de la réserve utile du sol (mm)

Deux approches du suivi de la réserve en eau des sols ont été effectuées à l'échelle de deux territoires : la Bretagne et le Caivados. Ces études présentent des méthodologies différentes puisqu'elles s'appuient sur des bases de données dont les résolutions spatiales et temporelles varient.

Approche climatique du suivi des sécheresses en Bretagne de 1950 à 2100 à partir de l'utilisation de bilans hydriques stationnels et spatialisés

Les bilans hydriques peuvent être utilisés de manière stationnelle ou spatialisée, ce qui permet de présenter l'évolution quantitative de l'eau dans les sols à l'échelle d'une année pour une ville ou un territoire. Ici, deux utilisations différentes du bilan hydrique seront présentées pour mettre en évidence les phénomènes de sécheresse en Bretagne. Cette étude s'intègre dans une thèse financée par la région Bretagne. Dans un premier temps des bilans hydriques stationnels ont été calculés pour trois villes bretonnes : Rennes, Brest et Pontivy. Dans un second temps un bilan hydrique spatialisé a été réalisé pour apprécier les variations spatiales d'intensité des sécheresses à l'échelle de la région Bretagne. Les données climatiques utilisées pour cette étude proviennent de projections issues du modèle ARPEGE-Climat pour le scénario A1B du GIEC. Pour étudier les sécheresses on s'intéresse en particulier au paramètre de déficit d'évaporation qui correspond à la différence entre l'évapotranspiration potentielle et réelle (Dubreuil, 1997). Ce paramètre traduit ainsi la quantité d'eau qu'il manque dans le système sol - atmosphère pour assurer une bonne croissance de la végétation en place.

Calcul et validation du bilan hydrique stationnel et déficit d'évaporation à Rennes de 1950 à 2100

Le bilan hydrique stationnel a été calculé au pas de temps mensuel pour les stations de Rennes St Jacques, Brest-Guipavas et Pontivy. Les données d'entrée sont les précipitations (P), les températures minimales et maximales (Tn et Tx), l'humidité relative, la vitesse du vent et le rayonnement. Les données observées proviennent de la bibliothèque de Météo-France, tandis que les données modélisées sont obtenues à partir du modèle ARPEGE-Climat à 50 km pour le scénario A1B du GIEC¹, données obtenues dans le cadre du programme CLIMASTER². Les données modélisées ainsi obtenues à 50 km sont désagrégées par la méthode quantile-quantile conditionnelle pour être plus cohérentes localement pour une station donnée. Cela permet ainsi de conserver les caractéristiques climatiques et statistiques de petite échelle (Déqué, 2009). Cette désagrégation consiste plus en une correction de biais, qu'en une descente d'échelle *sensu stricto*. En effet, cette méthode repose sur l'hypothèse que le modèle possède sa propre échelle de variation qui est apparée à

¹ Données fournies par F. Huard (INRA Agrocim) pour la simulation du climat futur pour CLIMASTER

² Site Internet du programme CLIMASTER : www.rennes.inra.fr/climaster

l'échelle de variation des données observées (Déqué, 2007). Ainsi cette désagrégation équivaut à prédire une classe de température (ou précipitation), plutôt qu'une valeur.

Ces variables permettent de calculer une évapotranspiration potentielle (ETO) Penman-Monteith telle que recommandée par la FAO, *Food and Agriculture Organization*, (Allen *et al.*, 1998) au pas de temps mensuel. L'évapotranspiration potentielle correspond à la somme de l'évaporation du sol et de la transpiration de la végétation en un lieu donné dans l'hypothèse d'une disponibilité de l'eau non limitée. Ainsi l'évapotranspiration potentielle ne dépend que des facteurs climatiques, contrairement à l'évapotranspiration réelle qui est déterminée par le climat et la teneur en eau des sols. La taille de la réserve utile (RU) a été fixée à 125 mm, qui est la taille moyenne des réserves utiles en Bretagne (Mounier, 1965 ; Dubreuil, 1994). L'évolution de l'eau dans les réserves utiles est calculée par décroissance logarithmique (Thornthwaite and Mather, 1976), ce qui permet de traduire la difficulté qu'ont les végétaux à capter les derniers millimètres d'eau dans les sols.



Marnis asséché, Presqu'île de Rhé, le 11 juin 2011

Les premiers bilans hydriques ainsi réalisés ont révélé une évapotranspiration annuelle moyenne modélisée, sur la période 1951-1980, supérieure de 15 % à l'évapotranspiration annuelle moyenne observée sur cette même période. Pour le déficit d'évaporation, l'écart observé entre la modélisation et l'observation est de l'ordre de 30 %. Ces écarts peuvent s'expliquer par une méthodologie différente pour l'estimation de variables telles que l'humidité relative et la vitesse du vent, mais aussi par des biais liés au modèle climatique, ce qui est le cas des températures qui sont surestimées l'été. Pour avoir des jeux de données comparables, des facteurs de correction mensuels ont été appliqués sur les températures, l'humidité relative et la vitesse du vent. Cela a permis de réduire l'écart entre l'ETO modélisée et observée à 2.3 % sur la période 1951-1980 (tab. 1) et pour le déficit d'évaporation à 4 %.

Tableau 1. Différences entre les données modélisées (mod) et observées (obs) sur la période 1951-1980 (à Rennes St Jacques, moyenne annuelle).

Légende : Tn et Tx : température minimale et maximale (°C); P : précipitations (mm); ETO : évapotranspiration réelle (mm); DE : déficit d'évaporation (mm).

	obs	mod	écart	%
Tn	7,0	6,8	-0,2	
Tx	15,5	15,9	0,4	
P	647,6	691,7	44,1	6,8
ET0	690,7	706,2	15,5	2,3
ETR	520,7	529,1	8,4	1,6
DE	150,3	157,4	7,1	4,2

Deux bilans hydriques ont ainsi été réalisés pour la station de Rennes à partir des données climatiques observées et modélisées (fig. 2). Ces deux bilans, globalement similaires, mettent en évidence le bon fonctionnement du modèle qui traduit de manière assez cohérente le climat rennais (Lamy et Dubreuil, 2011). Cependant, la correction effectuée sur les données climatiques modélisées n'empêche pas un biais sec au mois d'août du fait de précipitations estivales sous-estimées par le modèle. Il sera donc important de prendre en compte ce biais estival lors de l'interprétation des bilans hydriques réalisés sur d'autres périodes.

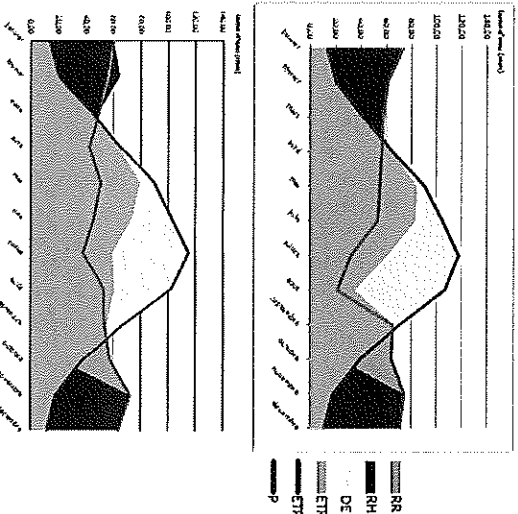


Figure 2 Bilan hydrique fait à partir des données observées (haut) et modélisées (bas) sur la période 1951-1989 pour Rennes St Jacques (RR : reconstitution de la réserve utile, RH : surplus hydrologique, en mm)

D'après ces deux bilans hydriques, le déficit d'évaporation moyen observé sur la période 1951-1980 est de 150 mm contre 157 mm pour le déficit modélisé. Ce déficit moyen ne présente pas la tendance de ces dernières décennies qui est à l'augmentation. Suite à cette observation moyenne du déficit d'évaporation, une analyse en continu sur le 21^{ème} siècle a été

effectuée. L'évolution du déficit d'évaporation à Rennes, d'après le modèle ARPEGE-Climat et le scénario A1B, révèle ainsi une augmentation de l'intensité des sécheresses notable au cours du 21^{ème} siècle (fig. 3). Cette évolution n'est pas linéaire, deux dates de ruptures (en orange sur la figure 3) découpent la série en trois. Ces dates de ruptures mettent en évidence trois périodes où l'augmentation du déficit d'évaporation ne présente pas la même intensité. On a ainsi une faible augmentation jusqu'à la fin des années 2020 de l'ordre de 4,5 mm tous les dix ans, prolongeant les observations actuelles (Dubreuil *et al.*, 1998). Ensuite, entre les deux dates de rupture, la tendance est à la stagnation. Enfin, la seconde moitié du 21^{ème} siècle connaît de nouveau une augmentation du déficit d'évaporation d'environ 8 mm tous les dix ans. De manière générale les sécheresses gagnent en intensité au cours du 21^{ème} siècle avec une valeur médiane de 225 mm jusqu'en 2050, qui atteindrait près de 415 mm sur la seconde partie du siècle.

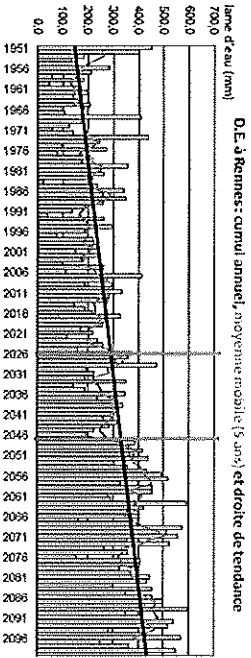


Figure 3 Evolution du déficit d'évaporation (D.E.) modélisé à Rennes de 1950 à 2100 (modèle ARPEGE-Climat, Scénario A1B)

Bilans hydriques stationnels au cours du 21^{ème} siècle à Rennes, Brest et Pontivy

Trois bilans hydriques ont été réalisés pour chacune des trois stations bretonnes. Ces bilans correspondent à des moyennes sur vingt ans autour des dates de ruptures déterminées par l'étude du déficit d'évaporation. Cela permet d'illustrer les tendances moyennes des sécheresses au début, au milieu et à la fin du 21^{ème} siècle pour Rennes (fig. 4), Pontivy et Brest (fig. 5). Ces graphiques mettent en évidence la période où l'on observe un déficit d'évaporation pour les trois stations bretonnes, généralement de mai à septembre, ainsi que l'intensité de ce déficit qui varie au cours de l'année et qui atteint son maximum *a priori* en juillet, la situation au mois d'août n'étant pas interprétable du fait du biais sec du modèle climatique.

Avec la figure 4 on peut apprécier l'augmentation du déficit d'évaporation au cours du 21^{ème} siècle à Rennes, qui est due à une augmentation de l'évapotranspiration potentielle et à une diminution des précipitations. Le déficit d'évaporation moyen passe de 226 mm jusque dans les années 2020, à 258 mm à l'horizon 2050, pour atteindre 368 mm dans les années 2070. Cette valeur de 368 mm de déficit d'évaporation peut être mise en relation avec les sécheresses de 1976 et 1989, dont les intensités respectives sont de 300 et 400 mm de déficit d'évaporation. Ces résultats montrent donc que des sécheresses exceptionnelles aujourd'hui, deviendraient communes au cours de la seconde moitié du 21^{ème} siècle à Rennes. L'évapotranspiration potentielle moyenne atteindrait 770 mm à l'horizon 2050 et 820 mm dans les années 2070, ce qui est similaire à l'évapotranspiration potentielle moyenne connue actuellement à Lyon et Cognac respectivement, toutes choses égales par ailleurs. Les

Cette chronique du bilan d'eau laisse apparaître des blocs de mois aux caractères certes un peu moins extrêmes mais dont les conséquences peuvent être aussi très préjudiciables pour les plantes pérennes en raison de la succession d'épisodes excédentaires ou déficitaires sur plusieurs années consécutives (cf. souffrance des arbres à la suite des trois étés « secs » de 1989 à 1991). La figure 12 permet, elle, d'imaginer concrètement les problèmes posés aux agriculteurs par cette variabilité climatique au printemps, et la modulation de ses conséquences selon la nature des sols. En cas de faibles précipitations, le manque d'eau dans le sol apparaît rapidement en cette période de l'année très sensible pour les cultures, ce qui influe sur la quantité et la qualité de la future récolte, particulièrement là où les sols ont une faible capacité hydrique (vert clair) et donc peu de réserves à la sortie de l'hiver (cf. 1976, 1982, 1984 et ces deux dernières années 2010 et 2011).

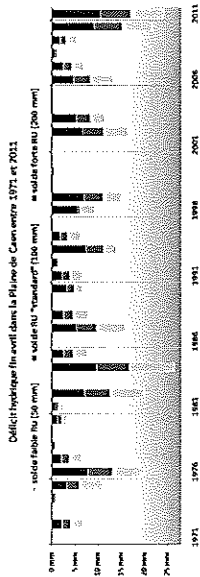


Figure 12 Evolution du déficit hydrique des sols fin avril dans la Plaine de Caen, calculé selon une décroissance exponentielle de la RU pour trois sols de capacités hydriques contrastées.

La réserve utile à échelle fine : une variable essentielle pour cartographier les disponibilités en eau des sols

La multitude des combinaisons topographiques, pédologiques et climatiques constitue autant de causes possibles pour expliquer de forts contrastes locaux de la quantité d'eau réellement disponible dans le sol pour les plantes. Chaque entité qui compose l'espace géographique a donc été caractérisée par des données climatiques et une réserve utile maximale représentatives de chaque site. La cartographie résultante (figures 14 et 15) s'appuie sur la spatialisation des observations du réseau de mesures Météo France pour les principales données climatiques (précipitations, température, rayonnement solaire, évapotranspiration potentielle) puis sur l'intégration au modèle de calcul du bilan hydrique des données topographiques (pente et exposition) et édaphiques (RU) pour obtenir une image des plus réalistes de la quantité d'eau disponible dans le sol à tout moment⁴. Les données climatiques à l'horizon 2100 utilisées comme référence pour la dimension prospective sont issues d'une extrapolation à l'échelle régionale des scénarii du GIEC (figure 13).

estimation	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Jun	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	année
ΔT (°C)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,8	3,1	3,3	3,2	3,1	2,8	2,7	2,5	2,8
ΔP (%)	9	9	8	4	-6	-20	-28	-20	-6	8	9	9	-2

Figure 13 Projections climatiques régionales à l'horizon 2100 selon le scénario A1B pour les variations de la température et des précipitations (GIEC 2007 modifié, d'après Cantat 2009).

Jusqu'il y a très peu de temps l'information pédologique sur le Calvados était très fragmentaire, ce qui constituait un frein majeur pour une spatialisation réaliste du bilan hydrique à échelle fine. L'établissement récent d'une carte des sols d'échelle fine a constitué un gain d'informations unique en son genre pour accéder à cette connaissance intime des variations spatiales des réserves agricoles utiles maximales (Le Goué et Delahaye, 2008). Cette cartographie - fondée sur près de 8.000 sondages pédologiques - montre une opposition majeure entre le nord-ouest du département et des secteurs du Pays d'Auge (interfluviaux) dont la RU est couramment supérieure à 160, voire 200 mm, comparativement à la partie centrale et méridionale du département dont les valeurs sont communément inférieures à 60 mm (carte présentée dans la fiche technique).

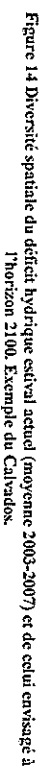
Il résulte de ces travaux la possibilité de substituer aux 100 mm de réserve utile conventionnellement attribués à tout espace des valeurs « vraies », ici comprises entre 10 et 235 mm. De ce fait, les cartes issues du modèle de spatialisation apparaissent représentatives de la réalité des conditions pédoclimatiques départementales.

Quelques résultats sur un indicateur essentiel : la sécheresse estivale des sols

La sécheresse des sols en juillet dans le Calvados : situation actuelle et à l'horizon 2100

Si l'on considère les espaces de champs ouverts destinés à la grande culture céréalière (diagonale Bayeux - Caen, Falaise), bien que le climat y soit sensiblement identique, les différences de RU occasionnent des contrastes très marqués dans le déficit hydrique estival (figure 6), fait essentiel pour l'agriculteur mais dont ne pouvait pas rendre compte une cartographie traditionnelle calée sur une RU uniforme de 100 mm. Au nord-ouest de Caen, les sols profonds et limoneux atténuent la sécheresse des sols (de 0 à 10 mm) alors qu'au sud-est de la capitale régionale le stress hydrique est déjà beaucoup plus présent (de 20 à 40 mm) en raison de la pierre RU de sols généralement minces et caillouteux, nécessitant le recours à l'irrigation pour ne pas pénaliser la production de matière végétale. Cette carte met également en évidence la situation paradoxale du Bocage : si les précipitations généralement plus abondantes sur ces hauteurs sont un atout pour la conservation des herbages en été, en revanche la faible RU des sols entraîne au total un déficit hydrique notable, conduisant certaines années (cf. 1976, 2011) à importer du fourrage pour pallier le dessèchement des prairies. Nous sommes donc parfois bien loin de l'image traditionnelle véhiculée par les collines de Normandie, région où « l'herbe foisonnante, le bocage serré deviennent l'expression concrète d'un climat tout pénétré d'humidité »... (Trzpit, 1978).

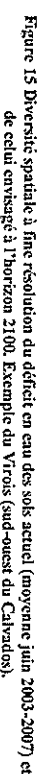
⁴ La méthode de spatialisation est présentée dans ses grandes lignes dans une fiche technique (page xx) et détaillée dans un article accessible par internet (http://thema.univ-lyon.fr/IMG/pdf/Olivier_Cantat.pdf).



La partition de l'espace géographique serait alors encore plus tranchée qu'actuellement, avec une aggravation notable de la sécheresse des sols dans tous les secteurs à faible réserve utile maximale, contrairement aux « bonnes terres » qui conserveraient le même niveau de faible contrainte hydrique.

Un des intérêts de la modélisation à fine résolution spatiale est de pouvoir mettre en relation l'intensité des stress hydriques avec la répartition des systèmes de production agricole

et le découpage des parcelles. A titre d'exemple, voici un zoom sur la région du Bocage virois exprimant le déficit hydrique moyen des sols pour le mois de juin (figure 15).



La prospective à l'horizon 2100 traduit la encore une aggravation sensible des conditions pédoclimatiques, ce qui pose à moyen terme la question de la viabilité des systèmes de production agricoles pour lesquels la sécheresse accrue des sols durant la saison végétative sera la plus impactante (Le Gouët et al., 2010a).

Conclusion

Les modèles climatiques utilisés pour l'étude en Bretagne présentent une bonne corrélation par rapport aux observations. Des biais résiduels persistent, notamment l'été, mais les tendances globales du climat sont bien reproduites. Les données du modèle ARPEGE-Climat permettent donc de simuler de façon réaliste le bilan hydrique actuel, ce qui autorise l'utilisation de ce type de bilan pour les scénarios jusqu'à la fin de ce siècle. L'étude des sécheresses à Brest, Pontivy et Rennes, avec les bilans hydriques stationnels réalisés suivant le modèle ARPEGE-Climat et le scénario A1B, révèle une augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses au cours du 21^{ème} siècle. Ces augmentations apparaissent plus modérées sur la première moitié du 21^{ème} siècle et seraient plus intenses sur la seconde moitié du 21^{ème} siècle. Des événements secs de type 1976 ou 1989, rares actuellement, deviendraient plus communs sur la moitié Est du territoire breton, où le climat est proche de celui de Rennes et Pontivy. Ces tendances sont confirmées par les bilans hydriques régionalisés, qui permettent en outre la mise en évidence du faible remplissage des sols à grande réserve utile sur la seconde moitié du 21^{ème} siècle. Ces sols qui présentent une forte inertie mettront ainsi plus de temps à se recharger au cours de l'automne, entraînant des taux de remplissage en décembre inférieurs à 100 % sur 1/5^{ème} du territoire breton dans les années 2080. Cette étude permet ainsi d'apprécier la variabilité spatiale de la sensibilité des sols bretons face aux sécheresses. Ces résultats devront être complétés par une prise en compte de l'occupation du sol, qui permettrait de cerner la vulnérabilité de l'agriculture.

L'étude faite sur le Calvados, du fait de sa prise en compte de la diversité des sols à une échelle plus fine, propose un bilan hydrique spatialisé particulièrement utile aux acteurs locaux et aux agriculteurs. En effet, en offrant une nouvelle lecture des contraintes hydriques du territoire, les résultats ainsi obtenus sont utiles à la gestion et l'aménagement du territoire ainsi que pour l'agriculture à travers l'identification des exploitations les plus touchées par les déficits en eau des sols. Dans le cadre du *Développement durable*, en complémentarité des travaux actuels menés par les agronomes sur les stratégies agricoles pour atténuer les impacts négatifs du changement climatique sur les productions, cette étude soulève également la question de l'adaptabilité socio-économique des exploitations agricoles face au changement climatique. En croisant la carte des déficits hydriques pour 2100 avec celle des systèmes de production agricole, il est possible d'envisager la résilience de ces systèmes sur la base des itinéraires techniques actuels : en systèmes céréaliers, nette opposition entre les exploitations septentrionales relativement épargnées et celles méridionales confrontées à des déficits hydriques importants susceptibles d'impacter les rendements ; pour les systèmes mixtes et d'élevage, conséquences encore plus significatives compte tenu des fortes intensités de déficit hydrique et de la nature des couverts végétaux (maïs fourrage en sec et prairie à graminées). L'économie agricole départementale devrait être d'autant plus affectée que ces systèmes couvrent aujourd'hui près de 80% de la SAU du Calvados (Le Gouée et al., 2010b)...

Références bibliographiques

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998 : Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage, paper 56.
- Cantat O., Le Gouée P., Bensaid A., 2009 : Le rôle de la topographie et des sols dans la modélisation spatiale d'échelle fine des bilans hydriques. *Actes des Journées de Climatologie*, CNFG, 91-100.
- Cantat O., Le Gouée P., Bensaid A., Savouret E., 2010 : Une méthode originale de spatialisation d'échelle fine des bilans hydriques. *Actes du 23^{ème} colloque de l'AIC « Risque et Changement climatique »*, Rennes, 23, 101-106.
- Programme CLIMASTER, 2008-2011 : Changement climatiques, systèmes agricoles, ressources naturelles et développement territorial.
- Déqué, M., 2007 : Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57, 16-26.
- Déqué, M., 2009 : Annexe Volet 1. Méthode de désagrégation quantile/quantile conditionnelle. Projet REXHySS. Lu en ligne sur www.sisyphie.upmc.fr/~agnes/rexhyss/DOCS/annexes/av1a.quantile_quantile.pdf
- Dubreuil, V., 1994 : La sécheresse dans la France de l'Ouest : Etude d'après les bilans hydriques et les données des satellites NOAA-AVHRR. Thèse de l'Université Rennes 2, 381p.
- Dubreuil, V., 1997 : La sécheresse dans la France de l'Ouest : une contrainte climatique trop souvent oubliée : Sécheresse, 8-1, 47-55. http://www.john-libbey-eurotext.fr/e-docs/00/04/21/AS/vers_alr/VersionPDF.pdf
- Dubreuil, V., Mounier J., Lejeune C., 1998 : L'accentuation récente du déficit estival dans la France océanique : Actes du 11^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie, 151-157
- GIEC, 2007 : *Climate change 2007: the physical science basis*, summary for policymakers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Website: <http://ipcc.ch/>
- Lamy, C., Dubreuil, V., 2011 : Modélisation du bilan hydrique en Bretagne dans le contexte du changement climatique : cas du scénario A1B du GIEC. Actes du 24^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie, 357-362.
- Le Gouée P., Delahaye D., 2008 : *Modélisation et cartographie de l'alté érosion des sols et des espaces de ruissellement dans le Calvados*. Rapport d'étude, CG du Calvados, CA du Calvados, DIREN de Basse-Normandie et AUP, 240p.
- Le Gouée P., Cantat O., Bensaid A., Savouret E., 2010a : La sensibilité des systèmes de production agricole en Normandie face au changement climatique (2000-2100). *Actes du 23^{ème} colloque de l'AIC « Risque et Changement climatique »*, Rennes, 23, 331-336.
- Le Gouée P., Cantat O., Bensaid A., Savouret E., 2010b : Evaluation et cartographie de la sécheresse des sols forestiers normands à l'horizon 2100. *Mappemonde*, 99, 1.
- Météo France, 2010 : *Projet ClimSec. Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol*. Météo France, Direction de la Climatologie. Website : <http://www.cnrm-game.fr/spip.php?article605>
- Mounier, J., 1965 : Les besoins en eau d'une région, d'après Thornthwaite, Essai d'application à la Bretagne. *Noréis*, 48, 437-448.
- Thornthwaite, C.W. and Mather J.R., 1957 : Instructions and Tables for Computing Potential Evapotranspiration and the Water Balance. *Climatology*, X, Number 3. Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, Centerton, New Jersey.
- Trzpit JP., 1996 : Gens de Basse-Normandie : et si l'eau vous était comptée ? *Noréis*, 16, 9-22.

Base de données :

Publithèque de Météo-France :
<http://publithèque.meteo.fr/okapi/accueil/okapiWebPubli/index.jsp>

Huard, F. : Données brutes modélisées fournies pour CLIMASTER, INRA Agroclim, Laboratoire Science du Sol (Agrocampus Ouest) : carte des réserves utiles bretonnes.

Glossaire :

Bilan hydrique : représente un bilan partiel du cycle de l'eau au centre duquel se place la satisfaction en eau des plantes. Comme tout budget, il confronte des disponibilités et des besoins. Les disponibilités en eau sont constituées par les précipitations et la réserve utile du sol (RU). Les besoins correspondent à l'eau rejetée dans l'atmosphère par évapotranspiration. En l'absence d'information météorologique directe, les agronomes déduisent l'évapotranspiration potentielle à partir de calculs fondés sur la prise en compte de divers paramètres. La méthode la plus performante est celle développée par l'agronome américain H. L. Penman car elle intègre les différents facteurs climatiques qui agissent ou tempèrent l'évapotranspiration (rayonnement solaire, température, déficit de saturation, vent) et les paramètres de la surface. En contrepartie, ce luxe de renseignements limite le nombre de postes où elle peut être calculée (pour pallier ce problème, Météo France propose depuis 2004 des « ETP point de grille » en substituant les données manquantes par celles des stations les plus proches).

Bilan hydrologique : circuit intégral de l'eau dans la nature.

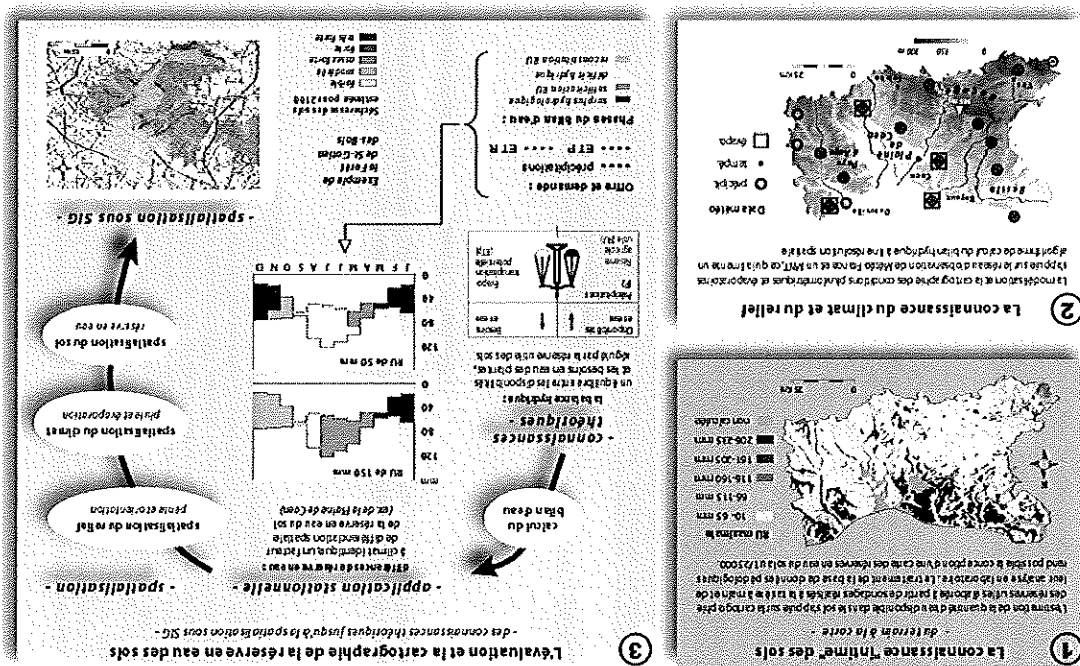
Bioclimat : « Ensemble des facteurs climatiques conditionnant les organismes vivants ou leurs communautés. *Note* : selon l'échelle d'étude considérée, un bioclimat peut contribuer à expliquer la présence locale d'une plante, la distribution régionale d'une espèce, ou la répartition mondiale des biomes... » (Da Lage et Métaillé, 2000 : *Dictionnaire de Biogéographie végétale*, CNRS Editions, Paris, 579p).

Capacité au champ, Cc : quantité maximale d'eau que peut contenir un sol après ressuyage (équilibre entre les forces de rétention (pression capillaire, forces d'adhésion, etc.) et les forces de gravité).

Pédoclimat : « La combinaison des 3 facteurs, température, humidité, aération, et ses variations saisonnières, constituent le pédoclimat, ou climat interne du sol. Le pédoclimat reflète en grande partie les conditions du climat général, notamment en ce qui concerne la température et l'humidité, mais il dépend largement aussi des propriétés physiques intrinsèques du sol : perméabilité, porosité, texture ; pour un même climat général, il existe de nombreux pédoclimats différents, qui, souvent, reflètent les facteurs de station (Duchaufour, 1991 : *Pédologie, Sol, végétation, environnement*, Masson, Paris, Milan, Barcelone, Bonn, 3^{ème} édition, 289p).

Point de flétrissement permanent, Pfp : limite inférieure de l'humidité d'un sol avec laquelle est compatible la vie des plantes (en dessous de cette valeur, les forces de succion des racines sont insuffisantes pour extraire l'eau du sol quelle que soit la demande atmosphérique).

Reserve agricole Utile, RU : pour une plante donnée, représente l'eau disponible entre la capacité au champ et le point de flétrissement permanent. Elle correspond à la lame d'eau piégée temporairement par le sol, puis restituée graduellement à la végétation par l'intermédiaire des racines. La valeur de la RU dépend de la nature des sols (épaisseur, granulométrie, teneur en matière organique et pierrosité).



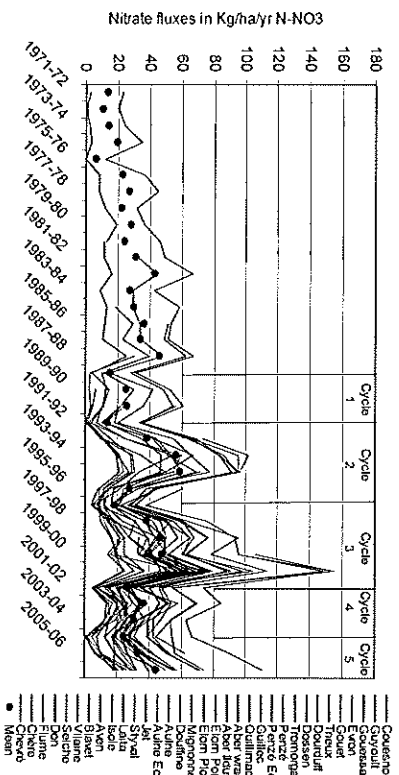
Nitrate

C. Gascuel-Odoux, A. Aubert, P. Durand, Salomon-Monviola,

La teneur en nitrate des eaux superficielles

L'analyse de l'évolution des teneurs en nitrate est également complexe, résultant d'interaction entre le sol, le climat et les systèmes hydrologiques, en y ajoutant un degré de complexité supplémentaire, la croissance des plantes dans des systèmes agricoles associant des systèmes de cultures et pratiques agricoles. L'approche du rôle du climat a de même été étudiée à partir de chroniques passées et de simulations sur un modèle représentant ces différents sous systèmes. L'effet du changement climatique doit prendre en compte dans le modèle les variations de la concentration en CO₂ atmosphérique liée au climat sur le développement des plantes, et donc les bilans d'eau et d'azote. Comme dans les approches précédentes, les simulations ne peuvent que donner des indications sur les tendances, compte tenu des incertitudes sur l'ensemble des données utilisées.

Les tendances passées à l'échelle de la Bretagne.



L'analyse des chroniques des flux de nitrates dans les eaux de surface des bassins versants de Bretagne, au regard des variations du climat, montre plusieurs points intéressants sur les interactions entre climat et qualité des eaux (réf).
-Tout d'abord, on constate que l'augmentation des flux apparaît en 77-78, année pluvieuse qui suit une année de grande sécheresse, celle de 76. Ce constat est rapporté dans la bibliographie européenne (réf).
-Si la cause en est les pollutions diffusées agricoles, on peut dire que c'est un événement climatique, ou une succession d'événements climatiques, qui en a révélé les conséquences. Les explications en sont,

l'obtention de rendements très inférieurs aux objectifs, d'où un fort reliquat d'azote, d'où un début de contamination significative de la nappe liée à une recharge exceptionnelle, elle-même liée à un hiver pluvieux.

- Une tendance linéaire à l'augmentation des flux, variables selon les bassins versants, marquées par des cyclicités interannuelles liées à la pluviosité. Cette cyclicité montre l'importance de l'hydraulique de l'année sur les flux. L'analyse détaillée des données montre en fait un flux relativement plus important en début qu'en fin de cycle, indiquant un distockage de l'azote privilégié en début de cycle.
- une stabilisation des flux dont l'explication peut être une stabilisation des intrants ou une dénitrification plus importante du bassin versant, ou encore un temps de réponse lent à des diminutions des entrées. L'analyse par modélisation des effets du climat montre que la pluviosité peut avoir un effet sur le temps de réponse des systèmes, effet variable selon les bassins versants. Quelques années de forte pluviosité peuvent, sur des bassins versants à faible inertie, permettre un équilibre du système. Ces effets du climat sur les flux et concentrations en nitrate sont cependant incertains, non vérifiables, les données étant peu nombreuses.

Impact du changement climatique sur l'évolution des bilans et flux d'eau et d'azote, des concentrations en nitrates et du rendement des cultures sur un bassin versant Breton

Salomon-Monviola J., Durand P., Gascuel C.

Cette analyse a été réalisée à partir de simulations faites avec le modèle TNT2 (voir Encadré...) sur le bassin versant de Kervidy-Naizin (Voir Encadré...)

Encadré. Les observatoires de recherche en environnement : les bassins versants, leurs données.
Le bassin versant de Kervidy-Naizin (4,9 km²) situé à l'Ouest de la France (Morbihan, 10km au Nord de la commune de Josselin) est un site de l'ORE Agrifys (Observatoire de recherche en environnement sur les AgroHydroSystèmes, site du Réseau National de Bassin versant). Il a été le support de nombreux travaux de recherche depuis 10 ans. Le bassin est représentatif d'une grande partie des petits bassins versants du Nord-Ouest de la France. L'altitude dans le bassin versant varie entre 98 et 140 m. Les pentes sont faibles (moins de 5%). Le substrat schisteux implique le développement de nappes superficielles très réactives qui alimentent le cours d'eau. Le réseau hydrographique est d'une longueur de 4,4 km. Le climat est océanique. Les moyennes hydro-climatiques ont été calculées sur la période 1993-2006: la température moyenne annuelle est de 11,6 °C, la pluviométrie moyenne est de 724 mm. Les sols sont limoneux avec une profondeur variant de 0,5 m à 1,5 m, associant des sols bien drainés sur les plateaux et versants, des sols hydromorphes dans les zones de bas-fonds. L'occupation du sol est orientée par la présence importante d'élevage (porcs, volailles, bovins), avec une majorité de cultures de maïs et blé (60% de la SAU) et quelques prairies (25% de la SAU)

A partir du scénario A1B du GIEC, régionalisé pour le site de Naizin, nous disposons des variables d'entrées suivantes pour le modèle agro-hydrologique TNT2: température minimale (TMin), température maximale (TMax), précipitation (P), évapotranspiration potentielle (ETP) (figure xx1). Le rayonnement global (RG) est issu de la station la plus proche (Remens). Pour cette étude, nous avons en défini 4 périodes:

- Passé Récent (1993-2009) avec les données climatiques réelles : PR_ClimObs
- Passé Récent (1993-2009) avec les données climatiques simulées : PR_ClimSim
- Futur Proche (2030-2050) : FP

- Futur Lointain (2080-2100) : FL

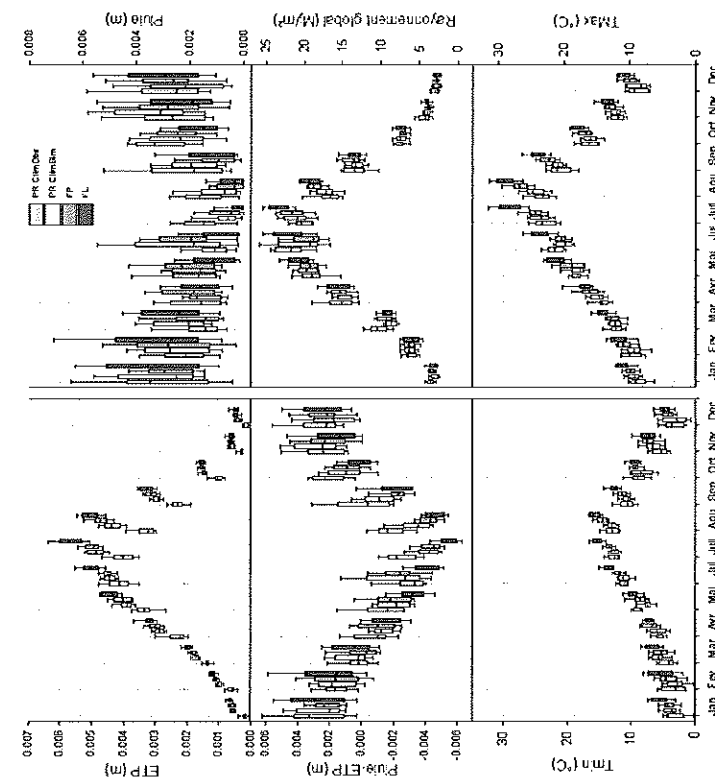


Figure xx1 : Box-plots des moyennes mensuelles de chaque année pour les quatre périodes (PR_ClimObs, PR_ClimSim, FP, FL)

L'ETP a tendance à augmenter sur la période estivale au cours des périodes passé simulé, futur proche et futur lointain. L'augmentation est beaucoup plus importante pour le futur lointain comparée au futur proche et passé simulé. On observe aussi que l'ETP observée (PR_ClimObs) est toujours inférieure à l'ETP simulé (PR_ClimSim).
Concernant les précipitations, on observe une grande variabilité des valeurs et une tendance à la diminution en futur lointain par rapport aux autres périodes, du mois de mai jusqu'à novembre. Le déficit hydrique mensuel (P-ETP) diminue fortement dans le futur lointain par rapport aux autres périodes à partir de mai jusqu'à août. Le rayonnement global suit une évolution presque similaire pour toutes les périodes considérées. On peut remarquer qu'il n'y a qu'en futur lointain que se dégage nettement une tendance à l'augmentation de cette variable sur la période mai-août.
Pour TMin et TMax, il y a une tendance à l'augmentation, surtout sur la période estivale, en considérant successivement PR_ClimSim, FP et FL. La figure xx2 qui compare l'évolution des contributions (en %) des périodes hivernales et estivales à la pluie annuelle montre que la contribution au cumul annuel de la pluie pendant l'hiver diminue légèrement en futur proche comparé au passé

simulé et augmente en futur lointain comparé aux précédentes périodes. La contribution de la pluie au cumul annuel pendant l'été au contraire diminue au cours des 3 périodes.

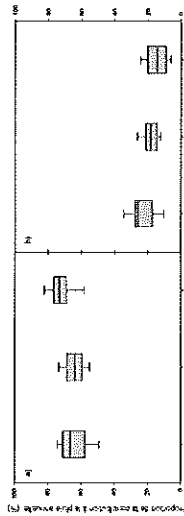


Figure xx2: Contribution des périodes hivernales (01/10-31/03)(a) et estivales (01/06-30/09)(b) au cumul annuel de pluie pour les périodes PR_ClimSim, FP, FL.

L'analyse des variables climatiques, montre que leurs évolutions et leurs variabilités pour le passé observé et simulé ne sont pas similaires. Les modèles climatiques, globaux ou régionaux ne sont en effet pas destinés à reproduire les observations d'une année particulière ou d'une séquence de plusieurs années. En revanche, ils doivent reproduire le mieux possible les caractéristiques moyennes des variables climatiques (Brisson et al. 2010). Pour s'affranchir du biais qui existe entre les variables climatiques du passé observé et simulé, nous avons uniquement analysé les résultats des simulations utilisant comme données d'entrée les variables climatiques simulées (PR_ClimSim, FP, FL) (Table de protocole xxx3).

Encadré. Le modèle TNT2.

Le modèle agro-hydrologique TNT2 (Topography-based nitrogen transfer and transformations) permet de simuler le transfert d'eau et de nitrate dans un bassin versant (Beaujouan et al., 2002), la dénitrification dans les zones humides et la possibilité de récupération,

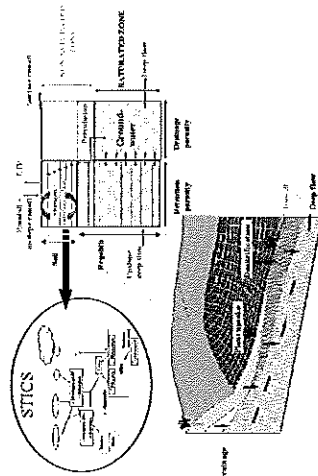


Figure AAAA : Schéma de principe de TNT2

par les parcelles de bas de versant, des nitrates lessivés en amont. TNT2 est un modèle hydrologique distribué maillé, basé concernant le calcul des écoulements sur les hypothèses suivantes : écoulement en saturé Darcyen, gradient hydraulique constant et égal au gradient topographique, transmissivité hydraulique fonction de la profondeur. Pour la partie agronomique, TNT2 est basée sur modèle STICS (Brisson et al., 2009) dont le formalisme a été repris pour simuler la croissance des plantes et les biotransformations dans le sol (Fig. AAA).

Le modèle nécessite une description détaillée du milieu physique (relief, profondeur du sol et du sous-sol, porosité, conductivité), du milieu agricole (types de culture) et des variables de forçages (calendrier des pratiques culturales: semis, récolte, apports d'azote, et variables climatiques : pluie, température, évapotranspiration potentielle, rayonnement global). Le pas de temps du modèle est le jour.

Le modèle TNT2 a été modifié pour prendre en compte l'effet de l'évolution de la teneur en CO₂ sur la physiologie des plantes pendant les périodes futur proche et lointain. En effet, la photosynthèse, moteur de la croissance et donc de la production des cultures, augmente avec la teneur en CO₂ de l'atmosphère, en même temps que la conductance stomatique diminue. L'ampleur de cette augmentation est plus importante pour les plantes en C3 que pour les plantes en C4. La prise en compte de la concentration en CO₂ atmosphérique se fait donc à deux niveaux: 1) l'effet du CO₂ sur le fonctionnement stomatique (effet anti-transpirant) par la correction des valeurs d'ETP; 2) l'effet du CO₂ sur l'accroissement de la biomasse, en différenciant les plantes en C4 et en C3. Nous avons calé le modèle sur la période 01/02/1994-20/08/2001, c'est-à-dire modifié les paramètres du modèle pour obtenir la meilleure correspondance entre les débits observés et simulés.

Périodes	Date Début simulation - Nombre de jours	Climat	CO2	Nombre simulations
1993-2009	20/08/1993 - 5855	Climat Simulé <i>PR_ClimSim</i>	-	1
Passé				
Récent				
2030-2050	20/08/2030 - 7316	Climat Simulé	- Sans CO2 <i>PRsxCO2</i> - Avec CO2 <i>FP CO2</i>	2
Futur				
Proche				
2080-2100	20/08/2080 - 7315	Climat Simulé	- Sans CO2 <i>FLsxCO2</i> - Avec CO2 <i>FL CO2</i>	2
Futur				
Lointain				

Table xxx3 : Protocole de simulation

Résultats sur le bilan en eau. Les résultats sur les variables du bilan en eau, avec ou sans CO₂ en futur proche et lointain, sont quasi similaires: on voit peu d'effet de la prise en compte du CO₂ sur le bilan en eau. Sur l'année hydrologique, on observe une tendance à la diminution de l'ETR et des débits notamment dans le futur lointain. La variabilité pour l'ensemble des variables du bilan en eau en futur lointain est plus importante que celle en futur proche (Fig xxx4).

Pendant la période hivernale, la tendance en futur proche est plutôt une diminution des débits et du stock en eau dans la nappe si on compare cette période au passé simulé. Les débits diminuent en futur lointain, de l'ordre de 20% comparé à la période simulé, ce qui est comparable aux résultats décrits ci-dessus sur le Scoreff, et sont plus variables qu'en futur proche. On observe aussi une forte variabilité

des variations de stocks en eau dans la nappe en futur lointain associée à une tendance à la recharge du stock si on compare le futur lointain au futur proche. Ce résultat est assez cohérent avec une plus grande contribution hivernale à la pluie annuelle en futur lointain, ce qui permet une recharge plus importante en hiver de la nappe. Pendant la période estivale, l'ETR diminue en futur lointain par rapport au futur proche. La variation de stocks d'eau dans la nappe est plus négative en futur lointain par rapport au futur proche: la nappe en été se vide plus en futur lointain qu'en futur proche. On voit donc qu'en futur lointain la dynamique de la nappe est plus importante comparée aux autres périodes (recharge et stockage importants et très variables). En ce qui concerne la proportion de zones saturées sur le bassin, la variabilité est plus importante en futur lointain par rapport aux autres périodes et la tendance est à leur diminution ce qui est en accord avec les résultats obtenus sur d'autres bassins (cf chap extension des zones humides...).

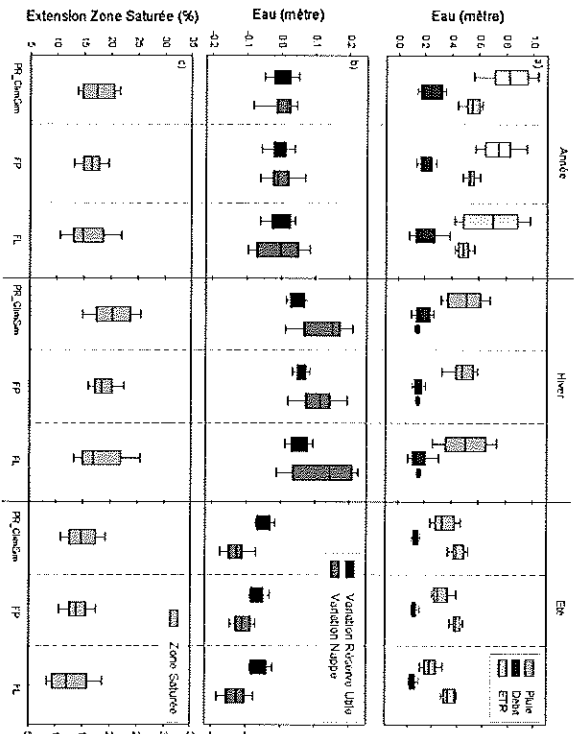


Figure xxx4 : Evolution en boxplots de la pluie, débit, ETR (a) et variation de stocks dans la réserve utile et la nappe (b), pourcentage de zone saturée (nappe atteignant le sol) (c) pour l'année hydrologique (01-10-YYYY au 31-09-YYYY+1), pour la période hivernale (01-10-YYYY au 31-03-YYYY+1), pour la période estivale (01-04-YYYY+1 au 31-09-YYYY+1)

Bilan en nitrate. Deux tendances se dégagent: le N à l'exutoire du bassin versant a tendance à diminuer en futur proche par rapport au passé simulé, puis en futur lointain par rapport au futur proche; le N issu de la dénitrification augmente en futur proche puis en futur lointain. Il n'y a pas d'effet important du forçage physiologique du au CO₂ sur ces tendances. On peut remarquer une légère augmentation du N exporté par les cultures avec CO₂ par rapport à sans CO₂ (Fig xxx5 a). En ce qui concerne les variations de stock, on peut remarquer que le stock de N dans la nappe (dN Nappe, Fig. xxx b) diminue en futur proche par rapport au passé simulé puis en futur lointain par rapport au futur proche, mais avec une variabilité plus importante en futur lointain. Le CO₂ ne joue pas

sur cette tendance. On remarque également un déstockage du N de l'humus (dN Hum, Fig. xxx b) surtout en futur lointain avec ici un effet du CO₂ qui atténue la diminution du stock d'humus. L'augmentation du N issu de la dénitrification en futur proche et lointain est attribuée ici à deux facteurs qui accentuent le processus: l'augmentation de la température pendant ces deux périodes et la disponibilité du nitrate qui n'est pas limitant dû à la plus forte minéralisation entraînant le déstockage du N de l'humus.

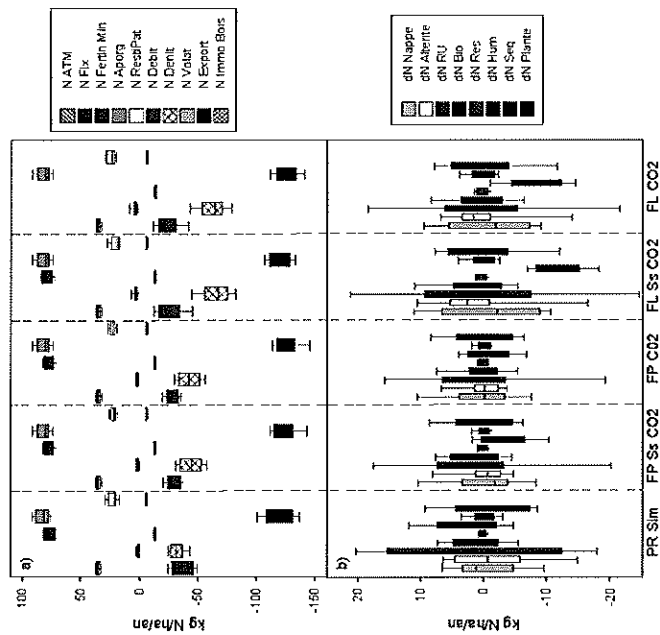


Figure xxx5: Variabilité des différents postes du bilan en azote, les entrées et sorties (a) et les variations des stocks (b). Les sorties du bilan (sur le graphique a) sont indiquées selon un axe négatif pour faciliter la lecture.

Concentration dans la rivière. Les concentrations en nitrate à l'exutoire du bassin versant ont tendance à diminuer si on compare le futur proche au passé simulé, et le futur lointain par rapport au futur proche (Figure xxx6). Cette tendance se retrouve quelle que soit la saison considérée. On peut aussi remarquer un effet du CO₂ sur l'évolution des concentrations: que ce soit en futur proche ou lointain, les concentrations sont globalement moins importantes avec que sans la prise en compte du CO₂.

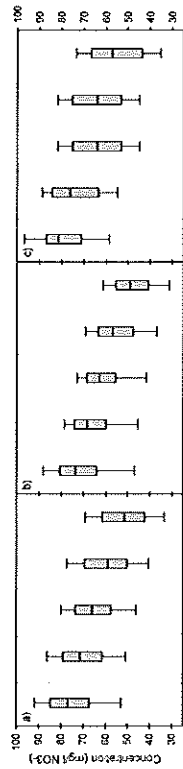


Figure xxx6: Variabilité des concentrations dans la rivière pour l'année hydrologique (a), en hiver (b), et en été (c) pour chaque période (en mg/l de NO₃).

Rendement des cultures. La variabilité des rendements en maïs et en blé apparaît plus importante que celle de la prairie (Figure xx7 a). Le CO₂ a un effet positif sur les rendements, avec une augmentation en futur proche et lointain avec CO₂ comparé aux simulations sans CO₂. Sans CO₂, on observe une diminution des rendements pour l'ensemble des cultures, des périodes futur proche et lointain par rapport au passé simulé (traits en pointillés, Figure xx7 b). Cette diminution est beaucoup plus importante pour le maïs que pour le blé et la prairie. On remarque aussi que le futur proche est moins pénalisant sur les rendements des cultures que le futur lointain. Si on considère les trajectoires avec CO₂ (traits pleins, Fig. xx6 b), les rendements pour le blé et le maïs ont tendance à augmenter en futur proche comparé au passé puis à diminuer uniquement pour le maïs en futur lointain comparé au passé. Pour la prairie, la tendance est toujours une augmentation relativement modérée (du futur proche comparé au passé simulé et du futur lointain par rapport au futur proche) alors que le futur lointain reste plus pénalisant que le futur proche pour le blé et maïs. Quelque soit la période ou la modalité avec ou sans CO₂ considéré, le rendement du maïs diminue beaucoup plus que celui du blé. Ces résultats sont assez cohérents avec les connaissances que l'on a sur le fonctionnement des plantes C3 et C4, les plantes de types C3 (blé) ayant tendance à mieux valoriser les augmentations de concentration en CO₂ que les plantes en C4 (maïs). Pour le blé, culture à cycle long, moyennant sensible au stress hydrique estival, l'augmentation de la température permet une anticipation des stades et un raccourcissement du cycle qui limitent un certain nombre de stress ce qui permet en tendance une augmentation du nombre de grain (Baneal et Gate, 2010). Au contraire, le maïs sera défavorisé par le changement climatique, notamment à cause du positionnement estival de son cycle de culture qui engendra en futur proche et lointain des raccourcissements de la période de remplissage des grains et donc des baisses de rendement (Brisson, 2010). Pour la prairie, les résultats à l'échelle du bassin versant de Kervidy-Naizin sont cohérents avec les tendances issues d'autres études (Durand et al., 2010, Brisson, 2010). Le changement climatique aura en effet un impact modéré et plutôt positif sur les rendements de la prairie.

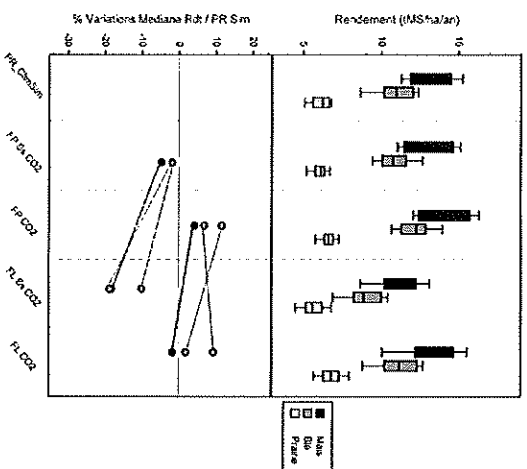


Figure XX7: Evolution en box-plots des rendements des cultures de maïs, blé et prairie (en tMS/ha/an) pour chaque période (a), évolution de la variation des médianes des rendements en FP, FL par rapport à la médiane en PR_ClimSim (b).

Conclusion. Cette étude des impacts des changements climatiques en futur proche et lointain sur un petit bassin versant Breton a permis de montrer une tendance à la diminution des débits et de l'ETR notamment en futur lointain. L'analyse saisonnière des variables du bilan en eau montre qu'en futur lointain la dynamique de la nappe est accentuée par rapport au futur proche où passe récent : recharge hivernale et déstockage estival importants et très variables. La proportion des zones humides saturées aura tendance à diminuer en futur lointain. En ce qui concerne les termes du bilan de N, les résultats sont marqués par une diminution du N à l'exutoire, une augmentation du N issu de la dénitrification. La minéralisation du stock d'humus augmente surtout en futur lointain et la prise en compte du CO₂ a tendance à atténuer cet effet. Les simulations des concentrations en nitrate à l'exutoire montrent une tendance à la diminution en futur proche puis lointain. Pour une même période, les concentrations sont globalement moins importantes si on prend en compte le CO₂. L'analyse des rendements montre l'effet positif du CO₂ sur les cultures (blé, maïs, prairie). Le maïs sera toujours pénalisé en terme de rendement par rapport au blé, ce dernier pouvant avoir des augmentations significatives notamment en futur proche avec CO₂. Le futur lointain sera plus pénalisant que le futur proche pour les cultures sauf pour la prairie. Vu les incertitudes (sur les données d'entrées, sur le modèle) qui pèsent sur les résultats, les tendances extraites à partir de ces résultats de simulation pourraient être confrontées à d'autres résultats issus d'une démarche de "multi-modelling" (changer de modèle avec le même bassin d'étude, utiliser un autre bassin versant breton avec le même modèle). Enfin ce cadre de modélisation pourrait aussi nous permettre de tester des scénarios d'adaptation des cultures au climat (avancement des dates de semis des cultures, choix de variétés précoces, ...).

- Anderson, J. E., Arbuckle, K., Bartley, J., Cooper, T., Kettunen, M., Kaplenget, T., Leipprand, A., Laaser, C., Umpfenbach, K., Kuusisto, E., Lepistö, A., and Holmberg, M., 2008. Climate change induced water stress and its impact on natural and managed ecosystems. European Parliament, Policy Department Brussels.
- Beven, K. and Kirkby, M. J., 1979. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.* 24, 43-69.
- Ducharme, A., Baubion, C., Beaudoin, N., Benoit, M., Bilien, G., Brisson, N., Garnier, J., Kieken, H., Lebonvallet, S., Ledoux, E., Mary, B., Mignolet, C., Poux, X., Sauboua, E., Schott, C., Thiery, S., and Vernot, P., 2007. Long term perspective of the Seine River system: Confronting climatic and direct anthropogenic changes. *Science of the Total Environment* 375, 292-311.
- Merot, P., Squitiant, H., Auroousseau, P., Helting, M., Burt, T., Maitre, V., Kruk, M., Batturini, A., Themail, C., and Viaud, V., 2003. Testing a climato-topographic index for predicting wetlands distribution along an European climate gradient. *Ecol. Model.* 163, 51-71.
- Pail, P., Ama, T., Stone, D. A., Stott, P. A., Nozawa, T., Hilberts, A. G., Lohmann, D., and Allen, M. R., 2011. Anthropogenic greenhouse gas contribution to flood risk in England and Wales in autumn 2000. *Nature* 470, 382-386.
- Beaujouan, V., Durand, P., Ruiz, L., Auroousseau, P., Cottet, G., 2002. A hydrological model dedicated to topography-based simulation of nitrogen transfer and transformation: rationale and application to the geomorphology–denitrification relationship. *Hydrol. Process.* 16, 493–507.
- Bancel, M. O., Gate, P., 2010. Changement climatiques et culture de blé: l'essentiel des connaissances et application à la géomorphologie–denitrification relationship. *Hydrol. Process.* 24, 493–507.
- Brisson, N., Launay, M., Mary, B., and Beaudoin, N., 2009. Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model. *Que (Eds). Versailles*, 297 p.
- Brisson, N., 2010. Changement climatiques et cultures de maïs et sorgho : l'essentiel des impacts. *Livre vert Projet Climator.*
- Durand, J. L., Bernard, F., Lardy, R., Graux, A. I., 2010. Changement climatiques et prairie: l'essentiel des impacts. *Livre vert Projet Climator.*

Carbone Organique dissout dans les eaux, matière organique dans les sols

C. Gascuel-Oudou, J. Denès, P. Durand, G. Gruau, A. Jaffrézic, T. Panaget, A.C. Pierson-Wickmann, M. Rouxel, V. Viaud

Points marquants

La qualité organique des eaux superficielles

Deux rivières des Côtes d'Armor utilisées pour produire de l'eau potable (le Léguer et le Yar) montrent un doublement de leur teneur moyenne annuelle en matière organique dissoute en 25 ans. Cette dégradation pose la question de la pérennité de la ressource en eau, ainsi que les questions corollaires des mécanismes en jeu à l'origine de cette dégradation et des mesures de protection à mettre en œuvre. Elle pose aussi la question du rôle du changement climatique et de son impact futur, sachant que la température et l'humidité du sol, deux facteurs importants de l'évolution climatique, peuvent stimuler la production de matière organique dissoute par le sol. Quelle est la situation des captages du Grand Ouest vis-à-vis du paramètre "matière organique" ? Quelles sont les tendances passées et actuelles ? Observe-t-on une tendance unique et systématique à la dégradation ? Les changements climatiques annoncés vont-ils dégrader plus la qualité organique des captages d'eau brute de Bretagne et des Pays de la Loire ?

Une grande variabilité spatiale et temporelle de la contamination des captages d'eau brute de Bretagne et des Pays de Loire par les matières organiques. L'état des lieux des captages superficiels de Bretagne et des Pays de la Loire (rivières et retenues) du point de vue des matières organiques est obtenu en calculant la proportion de captages non-conformes, c'est-à-dire dépassant la limite réglementaire de 10 mg/L de carbone organique total ou COT pendant 5%, au moins, du temps de leur exploitation (Figure xx). Pour la Bretagne, sur un total de 60 captages en rivières et 36 captages en retenue en exploitation, cette proportion est respectivement de 39% et 26% ; pour les Pays de la Loire, les proportions sont plus élevées, atteignant 73% pour les captages en retenue (15 en exploitation) et 44% pour les captages en rivière (29 en exploitation). Tous captages et régions confondus, le taux de non-conformité est de l'ordre de 40%. Ces chiffres correspondent aux années 2008 et 2009, dernières années pour lesquelles existe une analyse comparée des captages, région par région.

Ces chiffres démontrent l'état globalement dégradé des captages superficiels d'eau brute de Bretagne et des Pays de la Loire du point de vue des matières organiques, et l'acuité du problème posé sachant que ces captages représentent 80% de l'alimentation en eau potable de ces deux régions. Ils démontrent également que la situation est plus préoccupante dans la région de la Loire que dans la région de Bretagne.

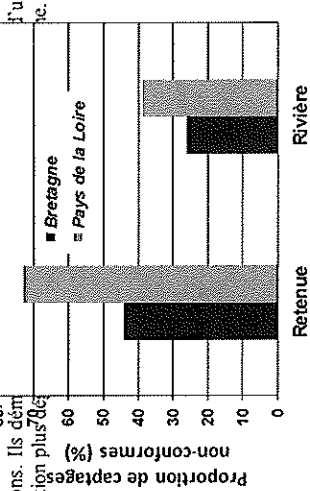


Figure xx. Proportion des captages superficiels d'eau brute en rivière et en retenue de Bretagne et des Pays de la Loire non-conformes sur le paramètre "matière organique" dépassant la limite réglementaire matière organique (sources des données : ARS Bretagne et Pays de la Loire).

L'analyse de l'évolution de la teneur en matière organique des captages des deux régions entre 1986 et 2009, montre des évolutions dans le temps contrastées, certains captages présentant des teneurs à la hausse, d'autres présentant des teneurs stables voire à la baisse. L'analyse comparée des 140 captages d'eau superficielle en exploitation à l'échelle de la Bretagne et des Pays de la Loire montrent que les masses d'eau brute ayant subi une augmentation de leur teneur en matière organique sont en fait minoritaires, ne représentant que 18% du total des captages (Figure yy).

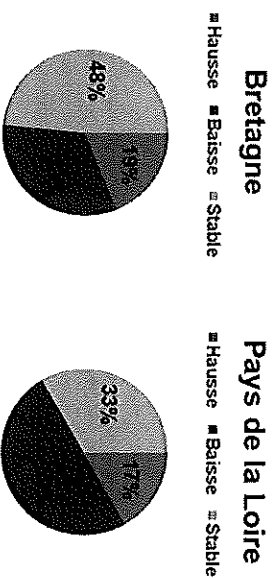


Figure yy. Répartitions des captages superficiels d'eau brute de Bretagne et des Pays de la Loire selon l'évolution de leur teneur en matière organique entre 1986 et 2009 (sources des données : ARS Bretagne et ARS Pays de la Loire).

Rôle du changement climatique sur les tendances passées et à l'horizon 2100. Les augmentations de teneur en matière organique de près de 20% des captages d'eau brute superficielle de Bretagne et des Pays de la Loire depuis 15-20 ans témoignent d'une dégradation de la qualité organique des eaux de ces captages. Cette dégradation est-elle en rapport avec le changement climatique ? Sachant que les régions Bretagne et Pays de la Loire connaissent un climat très semblable, de type océanique, ne devrait-on pas s'attendre à une tendance unique, systématiquement à la hausse, pour l'ensemble des captages ?

Repondre à cette question passe d'abord par une analyse de la façon dont le changement climatique est susceptible d'augmenter la teneur en matière organique des eaux. L'augmentation de la pluviosité hivernale peut conduire à une interaction plus grande de l'eau avec les horizons organiques du sol, augmentant ainsi les transferts de matière organique du sol vers les eaux de surface. L'augmentation de la température, accompagnée ou non de phases d'assèchement, peut stimuler la formation dans le sol, d'un stock de matière organique facilement mobilisable. Ces effets sont cependant en interaction avec des facteurs d'hétérogénéité du sol. En effet, les sols ne présentent pas des horizons organiques de même épaisseur et/ou de même réactivité vis-à-vis de la température et ou de l'assèchement. Les sols, de par leur variabilité, sont donc susceptibles d'engendrer des variations dans la réponse de la qualité organique des eaux de surface face au changement climatique.

Topmodel, utilisé précédemment pour prédire les débits des cours d'eau et l'extension des zones humides, a été couplé à un module d'estimation des émissions de carbone organique dissous par le sol pour estimer l'effet des changements climatiques annoncés sur la teneur en matière organique des eaux superficielles du Grand Ouest. La modélisation a été effectuée en

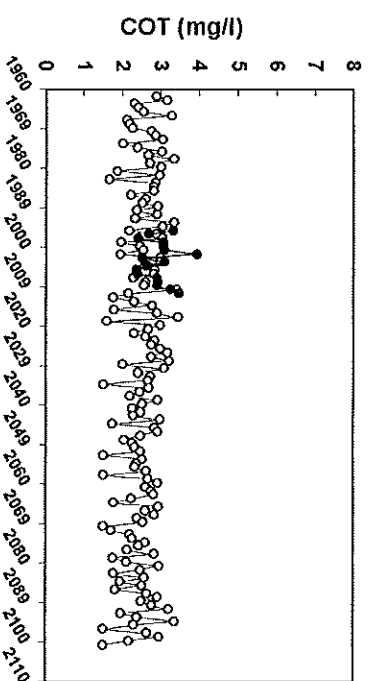


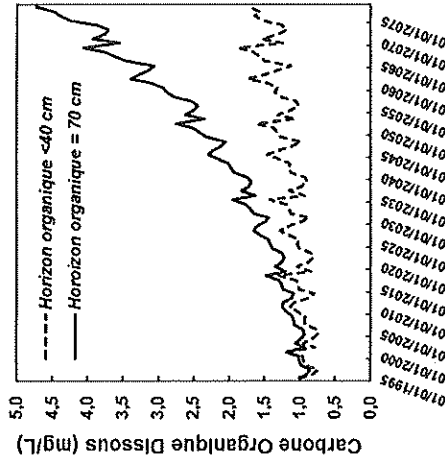
Figure zz. Simulation des concentrations moyennes annuelles en carbone organique total (COT) dans la rivière à l'exutoire du bassin versant de Kervidy-Naizin simulée sur la période 1960-2100 en utilisant le scénario Alb du GIEC. Le modèle ne prend pas en compte d'éventuelles modifications des flux de COT du fait de l'élévation prévue de la température. Les points figurés avec des symboles pleins (1990-2009) correspondent aux concentrations simulées en utilisant les précipitations effectives tombées sur le bassin.

prenant le bassin versant de Kervidy-Naizin dans le Morbihan comme bassin versant test et en appliquant le scénario Alb du GIEC. Le bassin versant de Kervidy-Naizin a été choisi car les mécanismes de transfert de l'eau y sont connus. Deux simulations ont été réalisées l'une pour tester l'impact des changements de pluviosité attendus à l'horizon 2100, l'autre pour tester l'impact du facteur "épaisseur des horizons organiques du sol" sur la réponse de la matière organique aux augmentations de température. Ces dernières modélisations ont été réalisées en considérant des épaisseurs moyennes des horizons organiques des sols égales respectivement à 40 cm (cas du bassin choisi) et à 70 cm (cas du bassin versant du Yar dans les Côtes d'Armor).

La première simulation (Figurezz) montre que les changements de régime de précipitations prévus par les modèles climatiques ne sont pas de nature, à eux seuls, à générer des évolutions significatives de la teneur en matière organique des eaux superficielles du Grand Ouest.

La seconde simulation (Figure wv), qui elle prend en compte la simulation de la production de matière organique du sol induite par un réchauffement climatique révèle que des variations dans l'épaisseur de l'horizon organique du sol sont capables de générer des différences dans la réponse dans le temps de la qualité organique des eaux. Ainsi, une augmentation annuelle de 3% de la production de matière organique dissoute par le sol n'augmentera la concentration en matière organique de l'eau des rivières que d'un facteur 1,5 à l'horizon 2070 dans le cas d'une épaisseur de 40 cm alors que cette augmentation sera d'un facteur 4 pour les

rivières drainant des bassins versants ayant des sols présentant une épaisseur d'horizon organique égale à 70 cm. Ceci rend plausible l'hypothèse d'un rôle du changement climatique dans la dégradation de la qualité organique des captages d'eau brute superficielle de Bretagne et des Pays de la Loire, le facteur "épaisseur des horizons organiques du sol" fournissant une explication au fait que cette dégradation ne concerne qu'une partie des captages.



Figurew. Simulation de l'impact de l'épaisseur de l'horizon organique des sols sur l'évolution temporelle des concentrations moyennes annuelles en carbone organique dissous (COD) dans les eaux superficielles de Bretagne en supposant une augmentation de 3% par an de la production de matière organique dissoute par le sol. Les simulations ont été arrêtées en 2077.

L'analyse comparée de la qualité organique des captages d'eau brute de Bretagne et des Pays de la Loire confirme le caractère dégradé des masses d'eau superficielles de ces deux régions du point de vue des matières organiques, avec un taux moyens de non-conformité de l'ordre de 40%. Cependant les tendances à la hausse observées pour quelques rivières des Côtes d'Armor ne sont pas la règle puisque seules 18% des 140 masses d'eau analysées ont vu leur teneur en matière organique augmenter dans la période récente, la majorité voyant leur concentration soit stagner, soit diminuer. Cette divergence d'évolution temporelle peut remettre en cause l'hypothèse fréquemment avancée d'un rôle du changement climatique en tant que moteur des évolutions à la hausse observée localement, dans la mesure où l'uniformité du climat affectant les régions Bretagne et Pays de la Loire devrait conduire à un seul type d'évolution. La modélisation ouvre cependant une voie pour dépasser cet apparent paradoxe en montrant que des variations dans l'épaisseur des horizons organiques des sols peuvent engendrer des variations dans la réponse temporelle des masses d'eau à une perturbation climatique apparemment identique.

La modélisation montre aussi que les changements en cours et annoncés par les modèles climatiques dans les régimes de précipitations ne sont pas de nature, à eux seuls, à générer des évolutions significatives de la teneur en matière organique des eaux superficielles de l'Ouest de la France.

Au final, l'hypothèse d'une interaction entre les propriétés du sol et le changement climatique comme explication aux différences d'évolution temporelle de la teneur en matière organique des eaux brutes superficielles du Grand Ouest devra être vérifiée par des relevés pédologiques de terrain et des études expérimentales au laboratoire. L'impact d'une élévation de la température sur l'augmentation de la taille du réservoir de matière organique mobilisable des sols reste également à être quantifiée précisément, de même que la capacité des écoulements de l'eau à épuiser ce réservoir. Une fois ces effets connus, ceux-ci pourront être introduits dans les modèles, permettant une meilleure prédiction de l'impact du changement climatique sur l'évolution long-terme de la teneur en matière organique des eaux superficielles.



Impact du changement climatique sur l'évolution des stocks de carbone dans les sols - Cas de l'Ille-et-Vilaine

V. Viaud

Introduction

La matière organique du sol est constituée de 50% de carbone (C). Elle contribue à la fertilité des sols (fournisseur de nutriments pour les plantes) et à leur qualité chimique (disponibilité en éléments), physique (porosité, structure) et biologique. Dans les régions du Grand-Ouest, les stocks de C dans les 30 premiers centimètres sont hétérogènes ; ils peuvent être importants localement en atteignant localement Bretagne et en Normandie et atteindre 80 à 90 tC.ha⁻¹ (GISSOL, données BDAT). Entre les périodes 1990-1995 et 1999-2004, les estimations montrent que les stocks de C ont tendance à diminuer, en particulier dans le sud Bretagne, dans le sud-ouest des Pays-de-Loire et en Poitou-Charentes (GISSOL, 2007).

Le stock de C présent dans le sol résulte du bilan entre les entrées de C par les apports de matières organiques au sol (résidus végétaux, effluents organiques) et les sorties de C, sous forme de CO₂, essentiellement, associées à la minéralisation de la matière organique du sol. Les entrées comme

les sorties de C sont très dépendantes des conditions climatiques, puisque la production de biomasse végétale et l'activité des microorganismes du sol varient en fonction du climat. Les effets de l'augmentation de température et de la diminution des précipitations sur le stock de C du sol peuvent être antagonistes.

Nous avons essayé de répondre à la question de l'impact des évolutions du climat sur le stockage ou le déstockage de C dans le sol, dans le nord de l'île-et-Vilaine, pour deux systèmes de culture (rotation maïs/ blé, prairie de longue durée), en nous appuyant sur une démarche de modélisation avec le modèle RothC.

Méthode

Nous avons simulé la dynamique du C du sol sur la période 2010-2100 avec le modèle RothC (Coleman et Jenkinson, 1999). Le modèle fonctionne au pas de temps mensuel ; les entrées du modèle sont le stock de C initial dans le sol, la teneur en argile, les apports mensuels de C, et les données climatiques mensuelles (température, pluviométrie, évapotranspiration).

Les systèmes modélisés

Les simulations ont été réalisées pour deux profils de sol (Méaulisols sur limons éoliens), l'un sous prairie de longue durée retournée tous les 7 ans, et l'autre sous une rotation maïs ensilage-blé. Le modèle a été appliqué à l'ensemble des horizons organo-minéraux. Aucune des parcelles ne reçoit de fertilisation organique, les apports de C au sol sont constitués par les résidus de récolte et la biomasse racinaire. Ces systèmes de culture ont été considérés comme constants sur la période de simulation. Les stocks de C observés en 2010 et utilisés en initialisation de la simulation sont présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1. Stocks de C observés en 2010 dans le profil sous prairie (P) et dans le profil sous rotation de culture annuelle (MB).

Profil	Horizon	Profondeur (cm)	Stock de C par horizon (t·ha ⁻¹)	Stock de C sur 0-30 cm (t·ha ⁻¹)	Stock de C total du profil (t·ha ⁻¹)
P	A1	0-12	34,1	53,4	64,2
	A2	12-35	24,7		
	A/E	35-45	5,4		
MB	LA	0-32	32,1	30,1	54,7
	A2	32-70	19,4		
	A/E	70-82	2,2		

Les données climatiques

Nous avons utilisé comme référence la simulation d'un climat stationnaire sur la période 2010-2100 présentant la même variabilité que le climat observé sur la période 1970-2000. Les données de changement climatique utilisées sont les sorties du modèle ARPEGE associées au scénario d'émission de gaz à effet de serre A1B, et régionalisées par la méthode des quantiles-quantiles (Déqué, 2007). Elles permettent la caractérisation de l'évolution du climat au cours de la période 2010-2100. Nous avons également utilisé un scénario A1B pour lequel l'impact de l'augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique sur la demande climatique et par conséquent sur l'évapotranspiration est pris en compte (Brisson et al., 2010). Par rapport au climat stationnaire, le changement climatique se traduit par une diminution des précipitations, essentiellement d'avril à septembre, et par une augmentation de la température et de l'évapotranspiration (ETP) (Tableau 2).

Tableau 2. Moyennes mensuelles des précipitations, évapotranspiration potentielle (ETP) et des températures sur la période 2010-2100, pour le climat stationnaire, le scénario A1B et le scénario A1B avec prise en compte de la modification de l'ETP, à Rennes.

Périodes	Pluviométrie moyenne mensuelle (mm)	Température moyenne mensuelle (°C)		Evapotranspiration moyenne mensuelle (mm)			
	Stationnaire	A1B	Stationnaire	A1B	Stationnaire	A1B	A1B ETP modifiée
2010-2020	59,1	53,5	10,4	12,4	49,0	56,2	55,8
2020-2050	58,9	55,3	10,7	12,8	48,4	57,6	55,2
2070-2100	58,6	46,1	10,7	14,3	49,1	64,4	57,2

Résultats

Les résultats de simulation montrent que le changement climatique se traduit par un déstockage de C pour l'horizon de surface 0-30 cm comme pour l'ensemble des horizons organo-minéraux, et dans les deux types de systèmes de culture (Figure 1). En valeur absolue, les pertes de C sont plus importantes dans le profil sous prairie. Mais le déstockage sur la période 2010-2100 représente 8 à 10% du stock initial de C en prairie et 12 à 15% en rotation maïs-blé dans l'horizon 0-30cm. De même, dans l'ensemble des horizons organo-minéraux, il représente 11 à 13 % en prairie et 10 à 12% en rotation maïs-blé.

d'évolutions des systèmes de cultures en lien avec l'adaptation de l'agriculture au changement climatique devraient être évalués par simulation.

Bibliographie

Brisson, N. et Levrault, F., 2010. *Livre vert du projet CLIMATOR*. ADEME-INRA, Angers.

Déqué, M., 2007: Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57, 16-26.

Falloon P.D. et Betts R.A. 2010. Climate impacts on European agriculture and water management in the context of adaptation and mitigation - the importance of an integrated approach. *Science of the Total Environment*, 408, 5667-5687

Jones, A., Stolbovoy, V., Rusco, E., Gentile, A.R., Gardi, C. Marechal, B., Montanarella, L., 2009. Climate change in Europe. 2. Impact on soil. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 423-432.

Eglin, T., Ciais, P., Piao, S.L., Barre, P., Bellassen, V., Cadule, P., Chenu, C., Gasser, T., Koven, C., Reichstein, M., Smith, P. 2010. Historical and future perspectives of global soil carbon response to climate and land-use changes. *Teilus*, 62, 700-718.

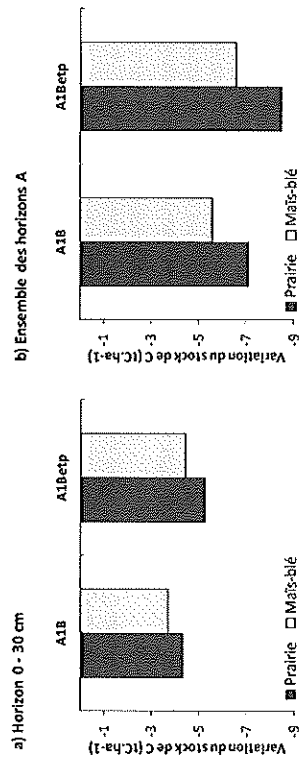


Figure 1. Evolution des stocks de C sur 0-30 cm (a) et sur l'ensemble des horizons A et A1B avec prise en compte de l'impact 2010 et 2100, pour les deux scénarios de changement climatique A1B et A1Bctp. Les barres noires représentent la prairie et les barres grises le maïs-blé.

La diminution des stocks de C n'est pas linéaire sur l'ensemble de la période de simulation, elle est plus importante dans le futur lointain. Dans le futur proche (2020-2050), la diminution des stocks de C dans l'horizon 0-30 cm est de 35 à 43 kgC.ha⁻¹.an⁻¹ sous prairie et de 23 à 29 kgC.ha⁻¹.an⁻¹ sous rotation maïs-blé. Dans le futur lointain (2070-2100), elle est de 45 à 65 kgC.ha⁻¹.an⁻¹ sous prairie et de 28 à 41 kgC.ha⁻¹.an⁻¹ sous rotation maïs-blé.

Si l'on intègre dans la simulation du scénario A1B avec ETP modifiée, les augmentations de rendements en prairie estimées par Brisson et al. (2011), le déstockage de C est moins important (5,4 tC.ha⁻¹ pour l'ensemble des horizons organo-minéraux), mais les apports supplémentaires de biomasse ne compensent pas l'augmentation de la minéralisation de la matière organique dans les systèmes prairiaux.

Conclusion

Les résultats de ce travail, compte-tenu des hypothèses faites et du modèle utilisé, tendent à montrer qu'au nord de l'Île-de-France, le changement climatique se traduit par un déstockage du C du sol, pour l'horizon de surface 0-30 cm comme pour les horizons organo-minéraux plus profonds, et pour les deux systèmes considérés. Ces résultats sont en accord avec des synthèses internationales (Falloon et al., 2010 ; Jones et al., 2009 ; Eglin et al., 2010) qui prédisent une diminution des stocks de C en Europe de l'ouest avec l'évolution du climat. Toutefois, les niveaux de variation des stocks de C obtenus sont très dépendants des choix de simulation, notamment du stock de C initial, des niveaux d'apports de C et de la sensibilité du modèle de dynamique des matières organiques aux facteurs température, humidité du sol et évapotranspiration. Ces résultats doivent être confortés par des simulations prenant en compte plus finement les interactions entre température, humidité, teneur en CO₂, rendements et activités des microorganismes du sol. Dans les travaux futurs nous devons inclure la question de l'apport de matière organique exogène, par les effluents d'élevage en particulier, pour mieux aborder la spécificité des systèmes avec apports organiques important particulier des systèmes d'élevage. De plus, des scénarios prospectifs

Transports solides

Catherine Grimaldi

La qualité physique des eaux : turbidité, matières en suspension, flux solides

Dans les rivières, les flux solides sont liés d'une part à la capacité de transport du cours d'eau, déterminée par la réponse hydrologique des bassins versants au climat, d'autre part aux processus d'érosion liés à de nombreux facteurs dont certains dépendent aussi du climat : intensité de la pluie, occupation et état d'humidité du sol... Leur dynamique temporelle est très sensible aux événements pluvieux extrêmes dont le nombre pourrait augmenter avec le changement climatique.

Nous nous interrogeons ici sur les conditions climatiques, saisonnières et événementielles, susceptibles d'amplifier ces flux. Ne disposant pas de modèles aptes à prédire des flux solides en fonction de scénarios climatiques, l'analyse a été faite sur des chroniques passées, en comparant les flux pour différents bassins versants.

Les bassins versants étudiés, des bassins agricoles orientés vers l'élevage

Les suivis à haute fréquence (10 mn) du débit et de la turbidité (donnant accès aux concentrations de matières en suspension (MES)) ont été réalisés aux exutoires de quatre petits cours d'eau bretons et bas-normands. Les ruisseaux de Kervidy (Morbihan) et du Moulinet (Manche) sont deux cours d'eau d'ordre 2 qui drainent des bassins versants d'environ 5 km², sur schistes brévochéens, présentant des pentes faibles. A Kervidy l'occupation du sol est orientée vers l'élevage intensif, avec une majorité de cultures de maïs et blé et quelques prairies ; le bocage y est fortement dégradé. Sur le Moulinet l'occupation du sol est orientée essentiellement vers l'élevage bovin, avec plus de prairies situées en particulier en bordure du cours d'eau ; le bocage y est encore bien préservé (Lefrançois, 2007). Les bassins versants de Lingèvres et de la Petite Seulline (Calvados) sont plus grands (13 et 15 km²) et sont drainés par des cours d'eau d'ordre 3. Le bassin de la Petite Seulline est situé dans un contexte géologique et paysager semblable à celui observé sur le bassin du Moulinet mais avec des pentes plus fortes. Le bassin versant de Lingèvres, situé dans une zone de transition entre le massif Armorican et le Bassin Parisien, est marqué par une opposition lithologique forte entre le Nord et le Sud qui se traduit également par une grande variété pédologique, géomorphologique et paysagère. La partie Sud du bassin versant, sur argiles résiduelles, présente des sols peu épais, une large majorité de surfaces en herbe et conserve aujourd'hui un maillage bocager dense. A l'inverse, la partie Nord, sur les calcaires de la plaine de Caen présente un paysage d'openfield intégralement cultivé et totalement dépourvu de haies.

Les cours d'eau de Lingèvres et de la Petite Seulline sont tous deux des affluents de la Seulles (430 km²), observatoire des hydrosystèmes bas-normands mis en place en 2009, à l'exutoire duquel on mesure également les flux solides. Des chroniques plus longues de 6 et 5 ans (2004-2010 et 2005-2010) sont disponibles sur les bassins de Kervidy et du Moulinet. Ces deux sites appartiennent à des observatoires de recherches en environnement inscrits dans la durée, respectivement l'ORE Agrisys et l'ORE Petits Fleuves Côtiers.

Des flux solides annuels très variables selon les sites, dépendant plus de l'origine des sédiments et de la protection des berges que des conditions climatiques

Les flux solides annuels présentent une forte variabilité d'un bassin à l'autre : entre 2 et 20 t/km²/an à Kervidy, 23 t/km²/an pour la Petite Seulline, 32 t/km²/an à Lingèvres et jusqu'à 63 t/km²/an sur le Moulinet pour les années de suivi. Les concentrations annuelles moyennes, obtenues en pondérant les flux solides par les flux hydriques, rapprochent Kervidy (entre 25 et 61 mg L⁻¹) de la Petite Seulline (40 L⁻¹), et le Moulinet (68 à 177 mg L⁻¹) de Lingèvres (175 mg L⁻¹), mais montrent toujours une grande variabilité.

Cette forte variabilité inter-sites est en partie liée à des différences de pluviosité annuelle et de flux hydriques mais qui restent peu marquées. Elle s'explique surtout par des origines différentes des sédiments et la protection ou non des linéaires de berges face à l'érosion. Viel (thèse en cours) montre que les surfaces les plus contributrices en sédiments sont localisées dans les bassins versants élémentaires (ordre 1), au niveau des zones d'initiation du réseau hydrographique, lorsque les écoulements passent d'une circulation diffuse à une circulation concentrée. Ces surfaces amont, propices à l'incision du talweg et aux écoulements le plus souvent temporaires, sont largement piétinées par les bovins en période estivale, lorsqu'ils ont accès au cours d'eau. La dégradation des berges produit un stock de sédiments mobilisable par le cours d'eau dès que le débit augmente. Cette origine est particulièrement importante pour les bassins du Moulinet, la Petite Seulline et Lingèvres, et explique les flux solides élevés toute l'année, malgré la présence de prairies et d'un bocage assez dense qui limite l'érosion sur les versants (Lefrançois et al. 2007). A l'inverse, le rôle de la ripisylve apparaît fondamental dans les bassins amont. Présente le long d'une grande partie du ruisseau de Kervidy, elle protège efficacement les berges de l'érosion et limite les apports de MES du versant, pourtant potentiellement importants au vu de l'occupation du sol sur le bassin.

A l'échelle plus large du bassin versant de la Seulles (420 km²), l'identification de l'origine des sédiments est plus complexe. En effet, la remobilisation de stockages alluviaux de fonds de vallées par ajustements latéraux du cours d'eau constitue une nouvelle source sédimentaire potentielle. Ce stock a pu être évalué sur le bassin de la Seulles. Il est très important, à la fois en termes de volume (plus de 50 millions de m³), mais également en termes d'extension spatiale puisque des épaisseurs supérieures au mètre ont été observées dès les parties amont du bassin versant. Il contribue donc à renforcer la contribution des fonds de vallées dans le bilan sédimentaire global du bassin versant et relativise l'impact du changement climatique sur les transferts sédimentaires de ces hydrosystèmes.

Des flux solides surtout importants en automne et en hiver, mais avec des variantes liées à l'origine et la disponibilité des sédiments

Soumis à un climat océanique, l'ensemble des bassins présentent une faible saisonnalité des pluies, qui ont tendance à diminuer de l'automne à l'été. La saisonnalité des flux hydriques est quant à elle plus marquée (Fig. 1), fortement liée à l'évapotranspiration. Classiquement, et c'est le cas pour 3 des bassins étudiés sur 4, la grande majorité (entre 80 et 90%) des flux solides annuels est mobilisée au cours de l'automne et de l'hiver. L'augmentation de la capacité de transport du cours d'eau joue un rôle indéniable sur l'intensité des flux solides. Cependant le débit n'est pas le seul facteur explicatif. Lorsque les MES proviennent surtout de l'érosion et du ruissellement sur les versants, ces processus, sensibles à l'état d'humidité et à la couverture végétale du sol, sont aussi favorisés en automne et en hiver. Lorsque les MES proviennent surtout des berges dégradées par le bétail, leur stock accumulé pendant la durée printanière et en été se remet en mouvement à l'automne, et est déjà en partie exporté avant l'hiver. La comparaison de la dynamique saisonnière entre Kervidy et Moulinet illustre cette différence d'origine et de disponibilité des sédiments, issus surtout de l'érosion des versants à Kervidy et des berges pour le Moulinet (Fig. 1).

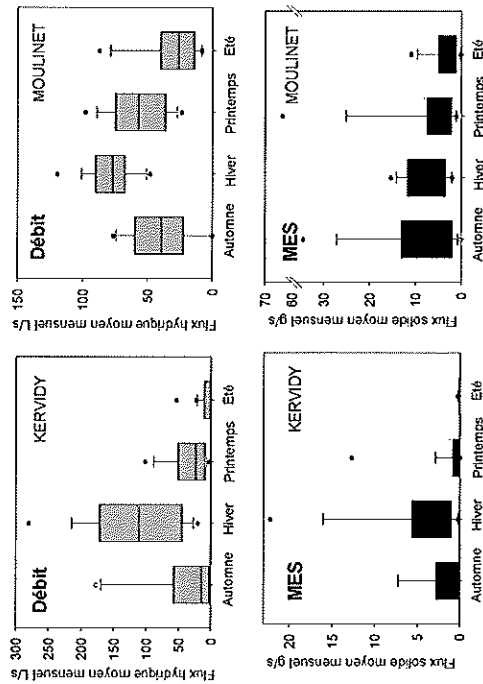


Figure 1. Distribution saisonnière des flux hydriques (en haut) et solides (en bas) à partir des moyennes mensuelles. Représentation en box-plots : les limites de la boîte correspondent aux percentiles 25 et 75%, les barres d'erreur correspondent aux percentiles 10 et 90%; les ronds noirs représentent les percentiles 5 et 95%. La médiane est en trait continu, la moyenne en pointillé.

Des flux solides journaliers très liés aux épisodes de crues avec un poids remarquable des événements extrêmes

La distribution des pluies journalières au cours de l'année et les intensités horaires sont comparables entre la Bretagne et la Basse-Normandie. Sur les différents sites expérimentaux 90% des intensités horaires sont inférieures à 4 mm/h. En revanche une hétérogénéité importante apparaît dans les débits. La gamme de variation des débits moyens journaliers est plus étendue à Kervidy où les maxima sont plus élevés que sur le Moulinet, et le ruissellement parfois à sec. Cette différence de fonctionnement hydrologique est due à la présence d'une nappe importante qui soutient le débit du Moulinet, mais aussi au paysage et à l'occupation du sol (nombreuses prairies et haies) qui favorisent la recharge de la nappe et limite le ruissellement. Cette opposition est également observée entre le bassin de Lingèvres caractérisé par des étages assez sévères et des crues très courtes et le bassin de la Petite Seulline où les débits sont fortement soutenus par une nappe alluviale bien développée.

L'importance des fortes crues, voire des événements extrêmes, sur les flux solides a été mesurée en quantifiant le nombre de jours qui correspondent à l'exportation de 50% du flux annuel pour les années de l'étude. Leur nombre s'élève entre 4 et 13 jours à Kervidy (7 jours en 2005-2006, Fig. 2), entre 4 et 48 jours pour le Moulinet (11 jours en 2005-2006, Fig. 2), 3 jours à Lingèvres et 18 jours pour la Petite Seulline (en 2009-2010). Ces événements très productifs en MES se produisent surtout en hiver à Kervidy et Lingèvres, mais également en automne sur le Moulinet et la Petite Seulline (Fig. 3). Le fonctionnement hydrologique semble ici expliquer les différences entre les bassins versants. Un très petit nombre de crues à Kervidy et Lingèvres produisent des flux solides exceptionnels, dus à des phénomènes de ruissellement et d'érosion intenses sur les versants en hiver, quand les sols sont très humides et peu couverts par la végétation. On peut remarquer que la ripisylve à Kervidy apparaît très efficace la majeure partie du temps comme barrière aux transferts de, mais ne suffit plus à

arrêter le ruissellement et l'érosion du versant lors des événements les plus importants. A l'inverse, les crues sont moins violentes sur le Moulinet et la Petite Seulline, sont donc plus nombreuses à contribuer aux flux solides annuels et se répartissent entre l'automne et l'hiver.

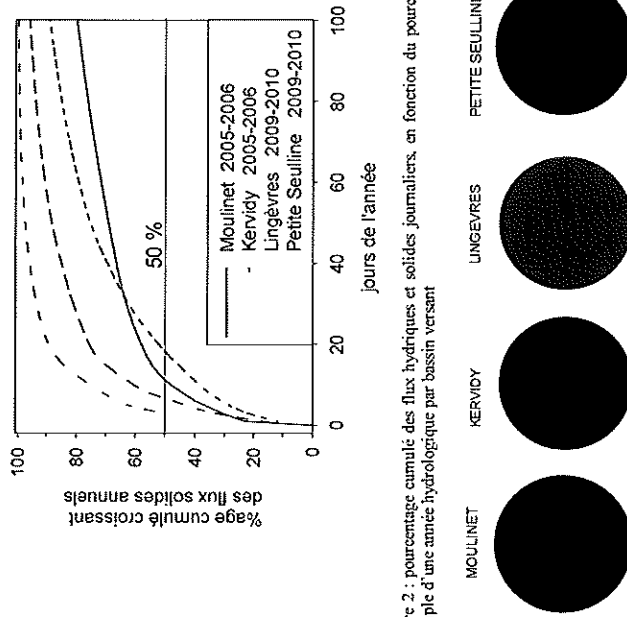


Figure 2 : pourcentage cumulé des flux hydriques et solides journaliers, en fonction du pourcentage du temps, exemple d'une année hydrologique par bassin versant

Figure 3 : répartition saisonnière des jours les plus productifs de MES, totalisant 50% des flux solides annuels pour les années présentées dans la figure 2 : automne (brun foncé et trame), hiver (bleu), printemps (vert), été (rouge)

A côté de ce comportement saisonnier moyen, des événements exceptionnels peuvent se produire en toutes saisons. En mai 2008, alors que le maïs était encore peu développé sur les bassins de Kervidy et du Moulinet, quelques fortes pluies ont entraîné des flux solides mensuels de 10 t/km² à Kervidy et 40 t/km² sur le Moulinet, à comparer avec les bilans annuels mesurés de respectivement 20 t/km² et 63 t/km² en 2007-2008 pour ces bassins.

Synthèse et discussion

Les flux solides sont très sensibles aux forçages climatiques mais ils sont avant tout fortement dépendants des caractéristiques environnementales des bassins versants. Pour les bassins étudiés en Bretagne et Basse-Normandie, les variables morphologiques, pédologiques, paysagères, agricoles... déterminent des réponses des hydrosystèmes très variées malgré un contexte climatique assez homogène. Cette variabilité actuelle entre les milieux est sans doute

plus importante que celle qui peut être envisagée à moyen terme sous l'effet du changement climatique.

Une première origine des sédiments liée à la dégradation des berges produit des flux solides importants, répartis tout au long de l'année, même s'ils sont surtout mobilisés pendant la reprise hydrologique en automne. La protection des berges contre leur dégradation et érosion doit permettre de réduire les flux solides associés. Une deuxième origine liée au ruissellement et à l'érosion des versants produit des flux solides plus soudains et intenses, principalement en hiver et secondairement en automne. Dans les scénarios du GIEC, notamment 1B, la période hivernale risque d'être plus humide (10 % environ) ce qui peut laisser craindre un renforcement des flux solides. Toutefois, la présence de ripisylves, de haies et de prairies permet de rompre la continuité des circulations d'eau dans le bassin versant, d'augmenter la rugosité du sol et l'infiltration de l'eau, et ainsi de limiter efficacement les flux solides vers les rivières. Ces dispositifs sont très efficaces pour les événements de moyenne amplitude. Au-delà d'un certain seuil, ils ont un effet modéré, le ruissellement et l'érosion mettant en jeu des circuits nouveaux (entrée de champ, route, fossés, chemins...) qui peuvent eux aussi faire l'objet d'aménagements spécifiques.

Les études menées sur les sites expérimentaux montrent clairement que les têtes de bassin (ordres 1 et 2) doivent être suivies en priorité notamment les zones d'initiation des réseaux hydrographiques (premières formes d'incision) qui sont souvent soumises aux piétiements des bovins. Sans minorer le rôle du climat, ce sont bien les pratiques et plus largement la gestion des zones sources en sédiments qui sont en causes et changer ces pratiques constitue sans doute l'enjeu prioritaires de ces petits hydrosystèmes.

Transports solides

Catherine Grimaldi

La qualité physique des eaux : turbidité, matières en suspension, flux solides

Dans les rivières, les flux solides sont liés d'une part à la capacité de transport du cours d'eau, déterminée par la réponse hydrologique des bassins versants au climat, d'autre part aux processus d'érosion liés à de nombreux facteurs dont certains dépendent aussi du climat : intensité de la pluie, occupation et état d'humidité du sol... Leur dynamique temporelle est très sensible aux événements pluvieux extrêmes dont le nombre pourrait augmenter avec le changement climatique.

Nous nous interrogerons ici sur les conditions climatiques, saisonnières et événementielles, susceptibles d'amplifier ces flux. Ne disposant pas de modèles aptes à prédire des flux solides en fonctions de scénarios climatiques, l'analyse a été faite sur des chroniques passées, en comparant les flux pour différents bassins versants.

Les bassins versants étudiés, des bassins agricoles orientés vers l'élevage

Les suivis à haute fréquence (10 mn) du débit et de la turbidité (dominant accès aux concentrations de matières en suspension (MES)) ont été réalisés aux exutoires de quatre petits cours d'eau bretons et bas-normands. Les ruisseaux de Kervidy (Morbihan) et du Moulinet (Manche) sont deux cours d'eau d'ordre 2 qui drainent des bassins versants d'environ 5 km², sur schistes briovériens, présentant des pentes faibles. A Kervidy l'occupation du sol est orientée vers l'élevage intensif, avec une majorité de cultures de maïs et blé et quelques prairies ; le bocage y est fortement dégradé. Sur le Moulinet l'occupation du sol est orientée essentiellement vers l'élevage bovin, avec plus de prairies situées en particulier en bordure du cours d'eau ; le bocage y est encore bien préservé. Leffrançois (2007). Les bassins versants de L'ingèvres et de la Petite Seulline (Calvados) sont plus grands (13 et 15 km²) et sont drainés par des cours d'eau d'ordre 3. Le bassin de la Petite Seulline est situé dans un contexte géologique et paysager semblable à celui observé sur le bassin du Moulinet mais avec des pentes plus fortes. Le bassin versant de L'ingèvres, situé dans une zone de transition entre le massif Armoricaïn et le Bassin Parisien, est marqué par une opposition lithologique forte entre le Nord et le Sud qui se traduit également par une grande variété pédologique, géomorphologique et paysagère. La partie Sud du bassin versant, sur argiles résiduelles, présente des sols peu épais, une large majorité de surfaces en herbe et conserve aujourd'hui un maillage bocager dense. A l'inverse, la partie Nord, sur les calcaires de la plaine de Caen présente un paysage d'openfield intégralement cultivé et totalement dépourvu de haies.

Les cours d'eau de L'ingèvres et de la Petite Seulline sont tous deux des affluents de la Seulles (430 km²) observatoire des hydrosystèmes bas-normands mis en place en 2009, à l'exutoire duquel on mesure également les flux solides. Des chroniques plus longues de 6 et 5 ans (2004-2010 et 2005-2010) sont disponibles sur les bassins de Kervidy et du Moulinet. Ces deux sites appartiennent à des observatoires de recherches en environnement inscrits dans la durée, respectivement l'ORE Agrivis et l'ORE Petits Fleuves Côtes.

Des flux solides annuels très variables selon les sites, dépendant plus de l'origine des sédiments et de la protection des berges que des conditions climatiques

Les flux solides annuels présentent une forte variabilité d'un bassin à l'autre : entre 2 et 20 t/km²/an à Kervidy, 23 t/km²/an pour la Petite Seulline, 32 t/km²/an à Lingèvres et jusqu'à 63 t/km²/an sur le Moulinet pour les années de suivi. Les concentrations annuelles moyennes, obtenues en pondérant les flux solides par les flux hydriques, rapprochent Kervidy (entre 25 et 61 mg L⁻¹) de la Petite Seulline (40 L⁻¹), et le Moulinet (68 à 177 mg L⁻¹) de Lingèvres (175 mg L⁻¹), mais montrent toujours une grande variabilité.

Cette forte variabilité inter-sites est en partie liée à des différences de pluviosité annuelle et de flux hydriques mais qui restent peu marquées. Elle s'explique surtout par des origines différentes des sédiments et la protection ou non des linéaires de berges face à l'érosion. Viel (thèse en cours) montre que les surfaces les plus contributrices en sédiments sont localisées dans les bassins versants élémentaires (ordre 1), au niveau des zones d'initiation du réseau hydrographique, lorsque les écoulements passent d'une circulation diffuse à une circulation concentrée. Ces surfaces amont, propices à l'incision du talweg et aux écoulements le plus souvent temporaires, sont largement piétinées par les bovins en période estivale, lorsqu'ils ont accès au cours d'eau. La dégradation des berges produit un stock de sédiments mobilisable par le cours d'eau dès que le débit augmente. Cette origine est particulièrement importante pour les bassins du Moulinet, la Petite Seulline et Lingèvres, et explique les flux solides élevés toute l'année, malgré la présence de prairies et d'un bocage assez dense qui limite l'érosion sur les versants (Lefrançois et al, 2007). A l'inverse, le rôle de la ripisylve apparaît fondamental dans les bassins amont. Présente le long d'une grande partie du ruisseau de Kervidy, elle protège efficacement les berges de l'érosion et limite les apports de MES du versant, pourtant potentiellement importants au vu de l'occupation du sol sur le bassin.

A l'échelle plus large du bassin versant de la Seulline (420 km²), l'identification de l'origine des sédiments est plus complexe. En effet, la remobilisation de stockages alluviaux de fonds de vallées par ajustements latéraux du cours d'eau constitue une nouvelle source sédimentaire potentielle. Ce stock a pu être évalué sur le bassin de la Seulline. Il est très important, à la fois en termes de volume (plus de 50 millions de m³), mais également en termes d'extension spatiale puisque des épaisseurs supérieures au mètre ont été observées des parties amont du bassin versant. Il contribue donc à renforcer la contribution des fonds de vallées dans le bilan sédimentaire global du bassin versant et relativise l'impact du changement climatique sur les transferts sédimentaires de ces hydrosystèmes.

Des flux solides surtout importants en automne et en hiver, mais avec des variabilités liées à l'origine et la disponibilité des sédiments

Soumis à un climat océanique, l'ensemble des bassins présentent une faible saisonnalité des pluies, qui ont tendance à diminuer de l'automne à l'été. La saisonnalité des flux hydriques est quant à elle plus marquée (Fig. 1), fortement liée à l'évapotranspiration. Classiquement, et c'est le cas pour 3 des bassins étudiés sur 4, la grande majorité (entre 80 et 90%) des flux solides annuels est mobilisée au cours de l'automne et de l'hiver. L'augmentation de la capacité de transport du cours d'eau joue un rôle indéniable sur l'intensité des flux solides. Cependant le débit n'est pas le seul facteur explicatif. Lorsque les MES proviennent surtout de l'érosion et du ruissellement sur les versants, ces processus, sensibles à l'état d'humidité et à la couverture végétale du sol, sont aussi favorisés en automne et en hiver. Lorsque les MES proviennent surtout des berges dégradées par le bétail, leur stock accumulé pendant la décroissance printanière et en été se remet en mouvement à l'automne, et est déjà en partie exporté avant l'hiver. La comparaison de la dynamique saisonnière entre Kervidy et Moulinet illustre cette différence d'origine et de disponibilité des sédiments, issus surtout de l'érosion des versants à Kervidy et des berges pour le Moulinet (Fig. 1).

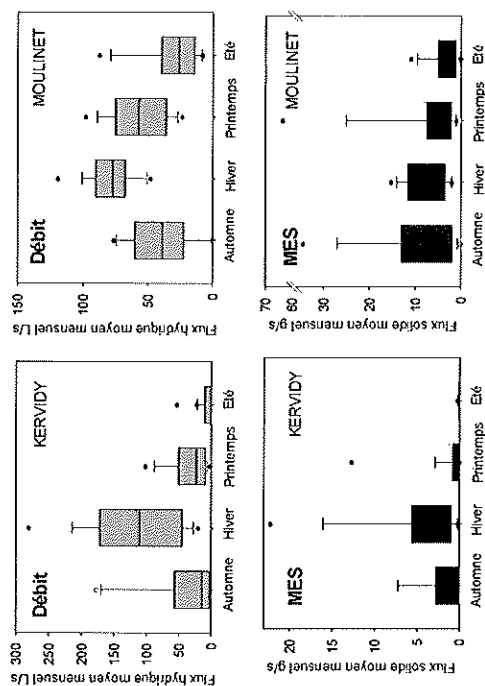


Figure 1. Distribution saisonnière des flux hydriques (en haut) et solides (en bas) à partir des moyennes mensuelles. Représentation en box-plots : les limites de la boîte correspondent aux percentiles 25 et 75%, les barres d'erreur correspondent aux percentiles 10 et 90%, les ronds noirs représentent les percentiles 5 et 95%. La médiane est en trait continu, la moyenne en pointillé.

Des flux solides journaliers très liés aux épisodes de crues avec un poids remarquable des événements extrêmes

La distribution des pluies journalières au cours de l'année et les intensités horaires sont comparables entre la Bretagne et la Basse-Normandie. Sur les différents sites expérimentaux 90% des intensités horaires sont inférieures à 4 mm/h. En revanche une hétérogénéité importante apparaît dans les débits. La gamme de variation des débits moyens journaliers est plus étendue à Kervidy où les maxima sont plus élevés que sur le Moulinet, et le ruisseau parfois à sec. Cette différence de fonctionnement hydrologique est due à la présence d'une nappe importante qui soutient le débit du Moulinet, mais aussi au paysage et à l'occupation du sol (nombreuses prairies et haies) qui favorisent la recharge de la nappe et limite le ruissellement. Cette opposition est également observée entre le bassin de Lingèvres caractérisé par des étiages assez sévères et des crues très courtes et le bassin de la Petite Seulline où les débits sont fortement soutenus par une nappe alluviale bien développée.

L'importance des fortes crues, voire des événements extrêmes, sur les flux solides a été mesurée en quantifiant le nombre de jours qui correspondent à l'exportation de 50% du flux annuel pour les années de l'étude. Leur nombre s'élève entre 4 et 13 jours à Kervidy (7 jours en 2005-2006, Fig. 2), entre 4 et 48 jours pour le Moulinet (11 jours en 2005-2006, Fig. 2), 3 jours à Lingèvres et 18 jours pour la Petite Seulline (en 2009-2010). Ces événements très productifs en MES se produisent surtout en hiver à Kervidy et Lingèvres, mais également en automne sur le Moulinet et la Petite Seulline (Fig. 3). Le fonctionnement hydrologique semble ici expliquer les différences entre les bassins versants. Un très petit nombre de crues à Kervidy et Lingèvres produisent des flux solides exceptionnels, dus à des phénomènes de ruissellement et d'érosion intenses sur les versants en hiver, quand les sols sont très humides et peu couverts par la végétation. On peut remarquer que la ripisylve à Kervidy apparaît très efficace la majeure partie du temps comme barrière aux transferts de, mais ne suffit plus à

arrêter le ruissellement et l'érosion du versant lors des événements les plus importants. A l'inverse, les crues sont moins violentes sur le Moulinet et la Petite Seulline, sont donc plus nombreuses à contribuer aux flux solides annuels et se répartissent entre l'automne et l'hiver.

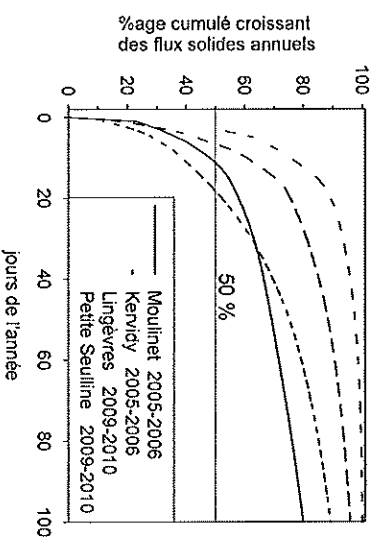


Figure 2 : pourcentage cumulé des flux hydriques et solides journaliers, en fonction du pourcentage du temps, exemple d'une année hydrologique par bassin versant

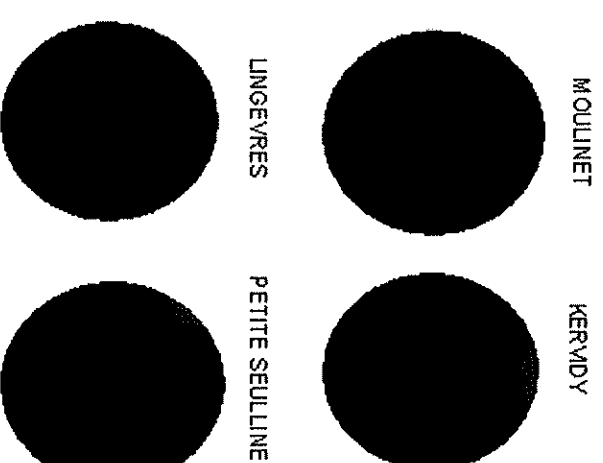


Figure 3 : répartition saisonnière des jours les plus productifs de MES, totalisant 50% des flux solides annuels pour les années présentées dans la figure 2 : automne (orange foncé et trame), hiver (bleu), printemps (vert), été (rouge)

A côté de ce comportement saisonnier moyen, des événements exceptionnels peuvent se produire en toutes saisons. En mai 2008, alors que le maïs était encore peu développé sur les bassins de Kervidy et du Moulinet, quelques fortes pluies ont entraîné des flux solides mensuels de 10 t/km² à Kervidy et 40 t/km² sur le Moulinet, à comparer avec les bilans annuels mesurés de respectivement 20 t/km² et 63 t/km² en 2007-2008 pour ces bassins.

Synthèse et discussion

Les flux solides sont très sensibles aux forçages climatiques mais ils sont avant tout fortement dépendants des caractéristiques environnementales des bassins versants. Pour les bassins étudiés en Bretagne et Basse-Normandie, les variables morphologiques, pédologiques, paysagères, agricoles... déterminent des réponses des hydrosystèmes très variées malgré un contexte climatique assez homogène. Cette variabilité actuelle entre les milieux est sans doute plus importante que celle qui peut être envisagée à moyen terme sous l'effet du changement climatique.

Une première origine des sédiments liée à la dégradation des berges produit des flux solides importants, répartis tout au long de l'année, même s'ils sont surtout mobilisés pendant la

reprise hydrologique en automne. La protection des berges contre leur dégradation et érosion doit permettre de réduire les flux solides associés. Une deuxième origine liée au ruissellement et à l'érosion des versants produit des flux solides plus soudains et intenses, principalement en hiver et secondairement en automne. Dans les scénarios du GIEC, notamment 1B, la période hivernale risque d'être plus humide (10 % environ) ce qui peut laisser craindre un renforcement des flux solides. Toutefois, la présence de ripisylves, de haies et de prairies permet de rompre la continuité des circulations d'eau dans le bassin versant, d'augmenter la rugosité du sol et l'infiltration de l'eau, et ainsi de limiter efficacement les flux solides vers les rivières. Ces dispositifs sont très efficaces pour les événements de moyenne amplitude. Au-delà d'un certain seuil, ils ont un effet modéré, le ruissellement et l'érosion mettant en jeu des circuits nouveaux (entrée de champ, route, fossés, chemins,...) qui peuvent eux aussi faire l'objet d'aménagements spécifiques.

Les études menées sur les sites expérimentaux montrent clairement que les têtes de bassin (ordres 1 et 2) doivent être suivies en priorité notamment les zones d'initiation des réseaux hydrographiques (premières formes d'incision) qui sont souvent soumises aux piétinements des bovins. Sans minorer le rôle du climat, ce sont bien les pratiques et plus largement la gestion des zones sources en sédiments qui sont en causes et changer ces pratiques constitue sans doute l'enjeu prioritaire de ces petits hydrosystèmes.

Modélisation prospective des conséquences du changement climatique sur l'aléa érosion des sols Adaptation des SCALES et MESALES et applications en Basse-Normandie et en Bretagne.

Patrick Le Coné, Olivier Camai, Daniel Delahaye, Alexis Gaultier Vincent Viel, Romain Reullier, Abdelkrim Bensaid

Blandine Lemerrier, Christian Walter, Nicolas Jambou

Points marquants

En Europe, l'érosion hydrique des sols est considérée comme l'une des principales formes de dégradation des terres arables. On évalue à environ 12 % la surface du territoire européen affectée par l'érosion hydrique, ce qui représente 115 millions d'hectares. Outre la perte de terre qu'elle occasionne, cette forme d'érosion entraîne une dégradation de la qualité des eaux en aval, liée au transfert dans les cours d'eau de particules de terre sur lesquelles des substances potentiellement polluantes (notamment phosphore et pesticides) sont adsorbées sur les particules de terre érodées. Dans un contexte de réchauffement climatique perturbant à moyen et long terme les composantes naturelles des milieux, il apparaît nécessaire d'apporter aux représentants de la société civile des éléments nouveaux permettant une anticipation raisonnée des évolutions à venir et des conséquences en termes de gestion des sols. Nos travaux vont également dans le sens de l'Agence européenne de l'environnement qui rappelle la nécessité de développer des outils d'évaluation de l'impact du changement climatique sur les sols (EEA, 2008). Ce chapitre présente la phase de développement et de validation de ces nouveaux outils de modélisation de la sensibilité actuelle et future à l'aléa érosion des espaces agricoles du grand ouest.

Introduction

L'évaluation du risque érosif doit pouvoir être menée au niveau de structures administratives régionales, mais aussi localement pour élaborer, mettre en œuvre et évaluer les actions de lutte contre l'érosion. Cette expertise passe par l'élaboration ou l'adaptation de modèles d'estimation de l'aléa érosion permettant :

- de faire varier les données d'entrées pour intégrer les scénarios d'évolution climatiques ;
- de produire de l'information aux échelles fines (parcelle agricole ou flots PAC) pour tenir de la variabilité locale des réponses aux changements climatiques ;
- décliner la modélisation aux échelles intra-annuelles (saison, mois) pour tenir compte non seulement du changement climatique globale mais également des redistributions saisonnières des pluies que privilégient certains scénarios climatiques.

Afin de répondre à ce cahier des charges un travail important de modélisation a été mené en adaptant deux modèles d'estimation de l'aléa érosion déjà éprouvés : SCALES – Spatialisation d'Échelle fine de l'ALéa Erosion des Sols – (Le Gouée *et al.*, 2010) et Messales – Modèle d'Évaluation Spatiale de l'ALéa Erosion des Sols – (Le Bissonnais *et al.*, 1998 ; 2002).

La validation des résultats est difficile du fait évidemment de l'absence de données mesurées à l'horizon 2100. L'adaptation de plusieurs modèles permet une comparaison des

résultats et ainsi pouvoir analyser la variabilité des résultats et la sensibilité des variables d'entrées.

La première partie de la présentation relate cette phase d'adaptation des modèles à l'approche prospective pour permettre l'étude de l'impact du changement climatique sur l'aléa érosion des sols. Ensuite, à l'aide du modèle SCALES, une vision prospective de la sensibilité du milieu sera proposée en comparant les niveaux actuels de l'aléa érosion avec ceux projetés pour 2100 à l'échelle mensuelle, à partir d'une étude de cas menée en Basse-Normandie (Goulet, 2010).

Vers une modélisation prospective de l'aléa érosion des sols aux échelles fines.

Caractéristiques générales du modèle SCALES

SCALES (Fig.1) est un modèle expert qui propose une cartographie de l'aléa érosion permettant aux acteurs du territoire de disposer d'informations spatialisées au niveau régional tout en ayant un degré de précision élevé à l'échelle locale (Le Gouec et Delahaye, 2008). Ainsi, l'évaluation de l'aléa porte sur les zones sources de production de l'érosion identifiées par des unités spatiales élémentaires que sont les parcelles agricoles.

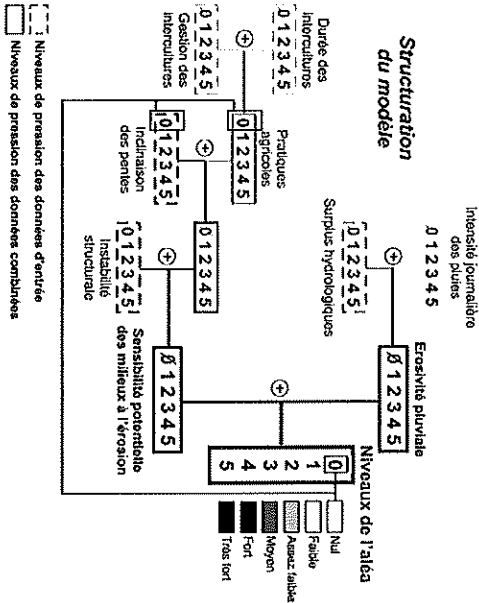


Figure 1 : Structure du modèle SCALES

La prise en compte de l'action anthropique dans l'évaluation de l'aléa repose sur le concept d'utilisation du sol et non d'occupation du sol, comme cela est le cas pour tous les modèles d'érosion à l'échelle régionale. L'idée est ici de recontextualiser l'aléa à partir des pratiques agricoles s'inscrivant dans une forte temporalité d'échelle intra-annuelle (la durée et la gestion des intercultures) et pluri-annuelle (les rotations culturales).

Les données initiales, intermédiaires et finales du modèle doivent être accessibles sous la forme d'informations numériques géoréférencées, exploitables par des logiciels SIG et présentées à différentes résolutions spatiales reprenant les principales divisions agricole, administrative et hydrologique de l'espace.

Dans la mesure où le diagnostic de l'aléa repose sur des données qui peuvent évoluer sur du court ou moyen terme, le modèle doit être conçu afin de générer aisément des mises à jour des basses de données et des niveaux d'aléa (niveau 0 : aléa nul ; niveau 1 : aléa faible ; niveau 2 : aléa assez faible ; niveau 3 : aléa moyen ; niveau 4 : aléa fort ; niveau 5 : aléa très fort). Cette perspective offre alors la possibilité de développer des approches exploratoires visant à mesurer par exemple les effets d'une évolution climatique.

Présentation de la zone d'étude

Le terrain d'étude est localisé dans le nord-ouest du Calvados (Fig.2). Il s'agit d'un bassin versant d'une superficie de 15 km² appelé le Lingèvres. Il est rattaché au bassin versant de la Seules qui s'étend sur 450 km² dans la partie ouest du département. Le Lingèvres est situé sur une zone de transition entre le Massif armoricain que l'on retrouve à l'amont du bassin versant et le Bassin parisien qui occupe la partie aval. En périphérie du bassin versant, notamment à l'amont, des placages épais de limons éoliens (loess) recouvrent les formations argileuses et calcaires datées du Secondaire et du Tertiaire.

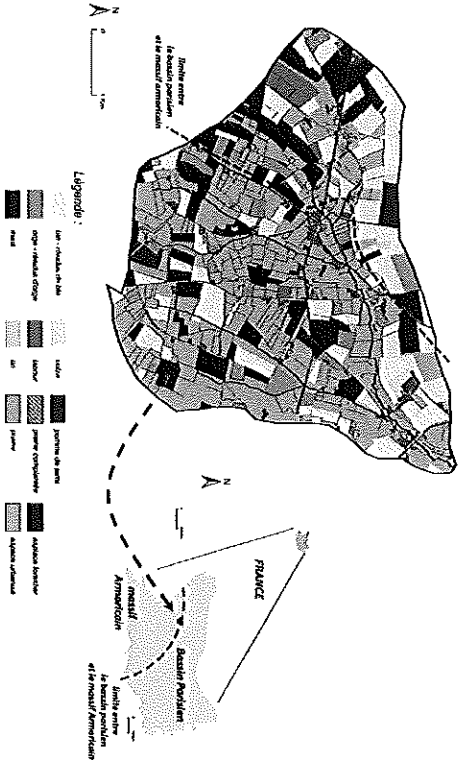


Figure 2 : Présentation du bassin-versant du Lingèvres

Les pentes sont globalement faibles, surtout sur les parties hautes qui culminent à plus de 130 mètres d'altitude. Le dénivelé est d'environ 80 mètres jusqu'à l'exutoire, au nord du bassin. Les pentes augmentent à mesure que l'on se rapproche de la partie aval du Lingèvres.

Les sols sont majoritairement hydromorphes. En périphérie du bassin versant, sur les parties hautes, on note la présence de néoluvissols limoneux moyennement ou fortement redoxiques dont l'épaisseur dépasse 1 mètre. 70% des versants du Lingèvres sont occupés par des sols argileux redoxiques de faibles épaisseurs (40 cm).

Le climat local est caractérisé par des précipitations annuelles abondantes, comprises entre 900 et 1000 mm. Les précipitations sont assez régulières toute l'année avec une augmentation à l'automne et en hiver.

L'agriculture combine culture céréalière, culture fourragère et élevage bovin dans le cadre de grandes exploitations en système intensif. Les prairies occupent la moitié de la surface agricole du bassin versant. Il s'agit presque toujours de prairies permanentes. Les cultures couvrent une superficie équivalente aux prairies. Les terres labourables se partagent équitablement entre cultures de printemps (maïs fourrager) et cultures d'hiver (blé).

Les données d'entrées du modèle SCALES

Le modèle numérique de terrain du Calvados au pas de 20 m a été mobilisé pour estimer les pentes du Lingèvres. Les données climatiques locales sont issues d'une station située à 5 km du bassin. La reconnaissance du maillage parcellaire agricole et des pratiques culturales a été menée à partir d'un travail d'investigation sur le terrain. Les données recueillies couvrent la période septembre 2009-août 2010. Les données sol utilisées pour le calcul de la réserve utile et des bilans hydriques ont été extraites de la base de données relative à la carte des sols du Calvados au 1/50 000 (Le Gouée, 2008). Des sondages complémentaires ont permis d'affiner spatialement les caractéristiques pédologiques au niveau du Lingèvres. Ainsi, la stabilité structurale des sols du bassin versant a été déterminée à partir des données existantes issues de la base de données départementale et de 18 analyses complémentaires sur des échantillons représentatifs de la diversité des sols et des pratiques agricoles. Les données d'entrée du modèle et leur traitement aux échelles mensuelles et saisonnières pour une année climatique moyenne ont été intégrées dans des unités spatiales élémentaires représentées par les parcelles agricoles (Tabl n°1).

Tableau 1. Adaptation des données d'entrées du modèle Scales pour une estimation à l'échelle mensuelle de l'aléa érosif.

Facteurs de l'évaluation de l'aléa Erosion	Données d'entrée	Données d'entrée	Sources	Résolution
Pratiques agricoles	Version originale	Version BV du Lingèvres	Version BV du Lingèvres	
	Durée des intercultures	Taux de recouvrement végétal	Redevs de termin	Parcelle
	Gestion des intercultures	Pentes	Période septembre 2009-août 2010	
Topographie			Carte des pentes (MNT IGN)	Pas de 20 m
			Carte des sols et de la stabilité structurale des sols de la zone d'étude à partir de données analytiques	Parcelle
Stabilité des sols	Instabilité structurale	Instabilité structurale	Carte des sols de la zone d'étude	
	Intensité des pluies	Intensité des pluies	Météo France (période 1991-2004)	Zone d'étude
	Surplus hydrologiques	Surplus hydrologiques	Carte des sols de la zone d'étude et Météo France (période 1991-2004)	Parcelle
Erosivité pluviale				

Résultats

Le modèle Scales permet de produire une cartographie annuelle de la sensibilité à l'aléa érosion à l'échelle parcellaire mais également de décliner à l'échelle mensuelle l'évolution de cette sensibilité.

Afin de présenter les résultats les plus intéressants, notre propos portera plus spécifiquement sur la période qui s'étend de septembre à février pendant laquelle la variabilité temporelle de l'aléa est la plus forte. La cartographie mensuelle de l'aléa érosion selon les données climatiques actuelles montre que les parcelles cultivées sont caractérisées par une susceptibilité à l'érosion hydrique qui est moyenne à forte (Fig.3).

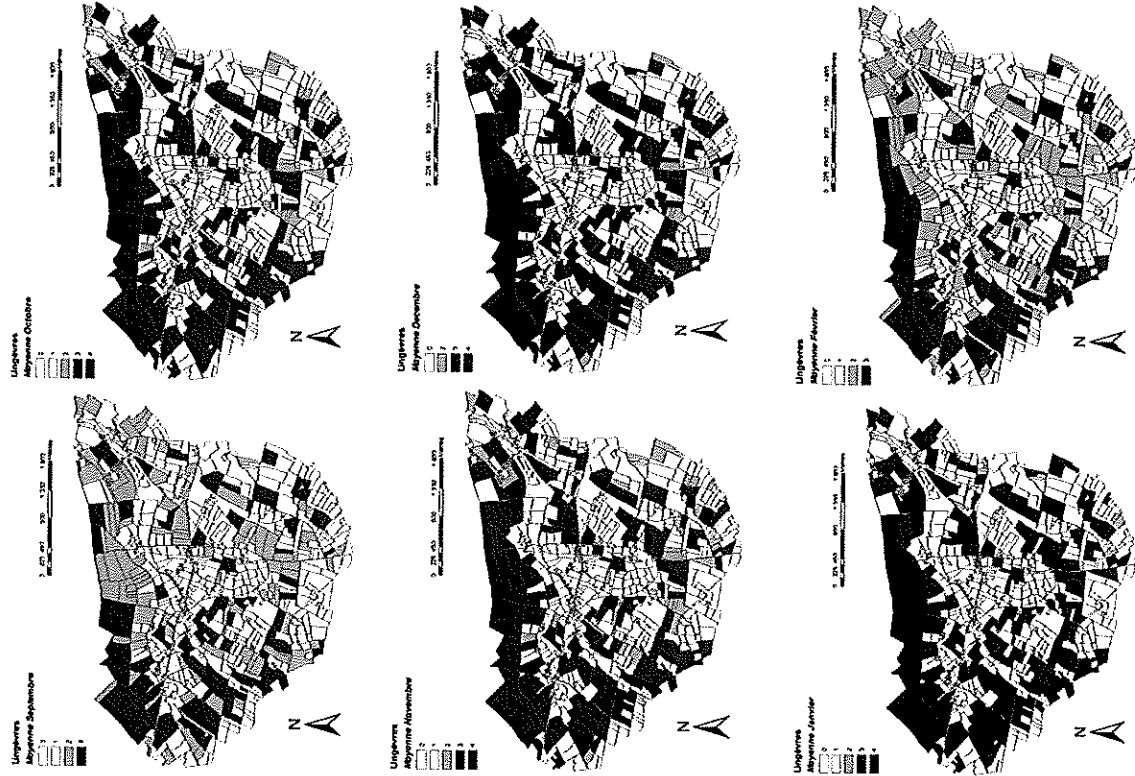


Figure 3 : Cartographies mensuelles de l'aléa érosion selon les données climatiques actuelles

En septembre, les niveaux d'aléa sont assez faibles à moyens. A ce moment, les réserves utiles des sols ne sont pas reconstruites, ce qui retarde la présence de surplus hydrologique. Par ailleurs, le recouvrement végétal des sols est assuré par la présence du maïs et des charrues de blé. En octobre et novembre, le niveau moyen de l'aléa érosion concerne près de 90% des parcelles cultivées. L'augmentation de la susceptibilité des sols à l'érosion résulte de la mise en sol nu des surfaces ensemencées et semées en blé. Cela s'explique également par l'apparition des premiers surplus hydrologiques de faible importance. L'aléa érosion atteint les niveaux les plus élevés en décembre et janvier, où il devient fort pour la moitié des parcelles cultivées. Si le taux de recouvrement végétal est peu différent de la période précédente, l'érosivité s'est accentuée en raison de surplus hydrologiques importants et de l'augmentation des jours où les précipitations dépassent 10 mm. En février, la susceptibilité à l'érosion redevient moyenne en bordure amont du bassin versant et assez faible ailleurs. Cela s'explique par un meilleur recouvrement des cultures en place et par une réduction significative des jours de pluies supérieures à 10 mm.

Adaptation du modèle MESALES aux échelles spatiales fines

Dans sa version initiale, le modèle MESALES est conçu pour être appliqué à des échelles larges : régionale (Colmar et al., 2010), nationale (Le Bissonnais et al., 2002) voire européenne (Van Rompaey et al., 2003).

MESALES est un modèle cartographique d'estimation de l'érosion hydrique des sols, de type expert. Comme le montre la figure 4, ce modèle pondère et hiérarchise les facteurs de l'érosion (occupation du sol, batance, pente, érodibilité et climat) selon un arbre logique pour aboutir à une évaluation du niveau de l'aléa érosion en 5 classes, de 1 (très faible) à 5 (très fort). L'estimation se fait en deux grandes étapes : la première définit une sensibilité potentielle du milieu à l'érosion sur la base des facteurs physiques, et la seconde croise cette sensibilité avec le facteur climatique qui combine la hauteur et l'intensité des pluies.

L'unité de calcul de l'aléa érosion est un pixel de 250 m dans la version initiale de MESALES. Le résultat peut ensuite être agrégé par entité spatiale comme le bassin versant, ou la commune.

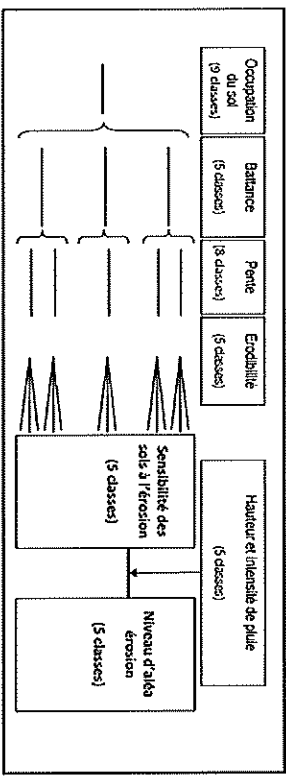


Figure 4. Vue schématisée de l'arborescence logique du modèle MESALES d'estimation de l'aléa érosion des sols (Colmar et al., 2010)

Présentation de la zone d'étude

La zone étudiée est située au nord de l'Ille-et-Vilaine, à quelques kilomètres de la Manche (Basse-Normandie). D'une superficie de 900 ha, elle appartient à la Zone Atelier Armorique pilotée par l'unité INRA SAD-Paysage de Rennes. La lithologie est caractérisée par deux

grands types de substrats : du schiste briovérien tendre au nord et du granite au sud. Une aureole de métamorphisme sépare ces deux formations. Des placages de limons éoliens pouvant atteindre plusieurs mètres ont été fréquemment mis en évidence sur la zone d'étude, surtout dans la partie sud. Les sols les plus fréquemment rencontrés sont des Néoluvissols et des Brunisols parfois hydromorphes, des Fluvisols-Rédoxisols et des Rankosols issus de matériaux métamorphisés. L'altitude varie de 10 à 100 m (Figure 5) et les pentes fortes (de 5 à 40 %) se concentrent dans la zone de contact entre le schiste et le granite et certaines vallées alluviales. Le climat de la zone est de type océanique, caractérisé par une pluviométrie annuelle de 860 mm et une température moyenne annuelle de 11,7°C. L'activité agricole est tournée vers la polyculture-élevage laitier. Les prairies permanentes occupent 20% du territoire et les rotations sont principalement constituées de maïs, blé et prairie temporaire. Les pentes les plus fortes sont généralement boisées.

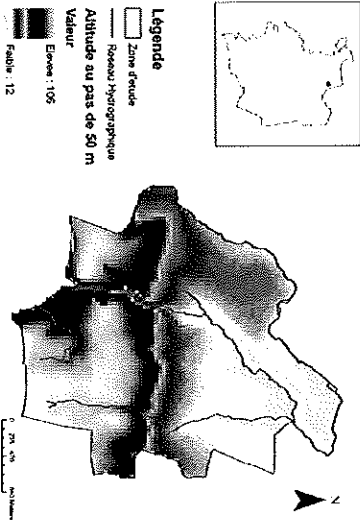


Figure 5. Localisation et topographie de la zone d'étude

Adaptation des données d'entrée du modèle

Pour produire une estimation de l'aléa érosion pertinente à l'échelle de la zone d'étude, l'arbre de décision du modèle n'a pas été modifié, mais les données d'entrée ont été adaptées, d'une part en termes de résolution, d'autre part en termes d'informations de base utilisées. Des études précédentes ou en cours sur le site d'étude ont permis d'acquiesir une connaissance précise de la nature et de la distribution spatiale des sols et des successions culturales entre 1997 et 2010. Le tableau 2 montre, pour chaque facteur de l'érosion considéré dans MESALES, les données utilisées dans la version initiale et dans la version adaptée du modèle. Les manifestations d'érosion étant plus fréquents et intenses pour les sols nus, dans la version adaptée du modèle, le facteur occupation du sol a été renseigné par le nombre de jours de sols nus, établi de façon experte à partir des successions culturales de 1997 à 2010. Cet indicateur est parcellaire et permet de prendre en compte les variations saisonnières de couverture du sol. Au final, l'aléa érosion a été estimé au pas de 50 m.

Tableau 2. Adaptation des données d'entrée du modèle Mesales pour améliorer de la précision de l'estimation de l'aléa érosif

	Version initiale		Version adaptée	
	Source	Résolution	Source	Résolution
Occupation du sol	CORINE land Cover	1/100 000	Nombre de jours de sol nu Parcelle (recouvrement inférieur à 30%)	Parcelle

Battance	Base de données géographique des sols de France	1/1 000 000	Carte des sols et stabilité structurale des sols de la zone d'étude	1/25 000
Pente	MNT* (IGN)	250 m	MNT* (IGN), aire drainée prise en compte	50 m
Erodibilité	Base de données géographique des sols de France	1/1 000 000	Carte des sols de la zone d'étude	1/25 000
Hauteur et intensité des pluies	Spatialisation de données sur 30 ans (méthode AUPELHY, Météo France)	5 km	Idem pour la hauteur des pluies : station météorologique de Pontson (1997-2009) pour l'intensité des pluies	5 km

* Modèle Numérique de Terrain

Résultats

La figure 6 (A. et B.) présente les résultats de modélisation de l'aléa érosion annuel par le modèle Mescales, en fonction des données d'entrée. Dans la version initiale du modèle, la variabilité de l'aléa érosion était liée à l'occupation du sol et aux pentes, les autres paramètres ne montrant pas ou très peu de variabilité. Pour les deux simulations, 4 classes d'aléa sont prédites (de très faible à fort), et la classe « très faible » est la plus fréquente. Les classes d'aléa « moyen » et « fort » représentent 16 et 24 % des pixels modélisés avec la version initiale et la version adaptée, respectivement. En termes de répartition spatiale, les grandes structures sont identiques, mais des différences sont significatives notamment dans la partie centrale de la zone d'étude. Ce qui est interprété comme un gain de précision du modèle tient surtout à l'amélioration du facteur pente et à la représentation du facteur occupation du sol par le nombre de jours de sol nu.

Les résultats obtenus peuvent être agrégés au niveau d'entités spatiales, comme les parcelles agricoles. La figure 6 C. représente, pour chaque parcelle, la valeur de la classe majoritaire. Dans une optique de quantification des risques, une autre méthode d'agrégation aurait pu être choisie : classement de la parcelle en risque fort si un certain pourcentage de la superficie présente un aléa érosion des sols fort ou très fort. Cette présentation des résultats permet une approche à l'échelle de la parcelle pour tester des scénarios climatiques et de changement de pratiques agricoles.

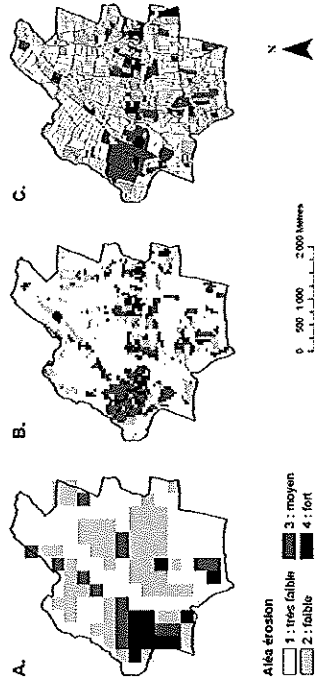


Figure 6. Aléa érosion annuel estimé à partir du modèle Mescales. A. Résultat de la version initiale du modèle au pas de 250 m ; B. Résultat de la version adaptée du modèle au pas de 50 m ; C. Agrégation par parcelle agricole du résultat de la version adaptée du modèle

Modélisation de l'aléa érosion à l'horizon 2100 selon le modèle SCALES

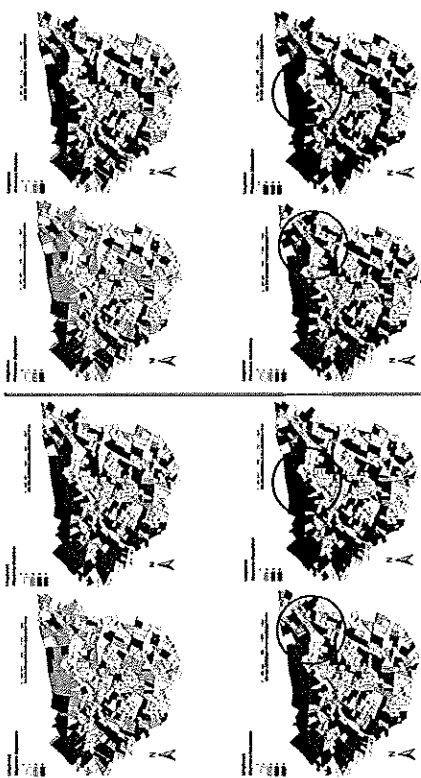
Les données d'entrée pour une projection de l'aléa en 2100

Les données agricoles et climatiques représentent les deux types de données présentant une variabilité dans le temps. Les travaux relatifs au changement climatique permettent aujourd'hui de disposer d'informations faisant consensus dans la communauté scientifique des climatologues pour un futur lointain. Malheureusement, on ne peut pas en dire autant à propos des pratiques agricoles car l'évolution de l'agriculture dépend tout à la fois de son interaction avec le climat, des choix politiques et du contexte socio-économique. Or, rien ne permet de préciser ce que sera l'agriculture locale dans un futur lointain car nous ne savons rien ou peu de choses aujourd'hui des conséquences agricoles de ces interactions, de ces choix politiques et des caractéristiques socio-économiques pour 2100. Aussi, notre projection de l'aléa érosion pour 2100 s'appuie sur les données issues du GIEC en reproduisant par défaut le contexte agricole actuel.

Pour caractériser le contexte climatique normand à l'horizon 2100, nous avons repris et adaptés les données de simulation du GIEC (GIEC, 2007a) relatives au scénario A1B déjà présentée dans le chapitre « réserves utiles ».

Résultats

La projection de l'aléa érosion pour septembre montre des niveaux identiques à ceux obtenus pour la période actuelle (Fig.7). En octobre, on note pour 2100 que les surfaces cultivées concernées par l'aléa faible et assez faible augmentent et que les parcelles caractérisées actuellement par un aléa fort disparaissent. La diminution de la susceptibilité à l'érosion des sols des surfaces cultivées s'expliquerait par la forte diminution des précipitations estivales (-21%). Cela aurait pour effet de retarder le remplissage des réserves utiles et donc de reporter à novembre l'apparition des premiers surplus hydrologiques.



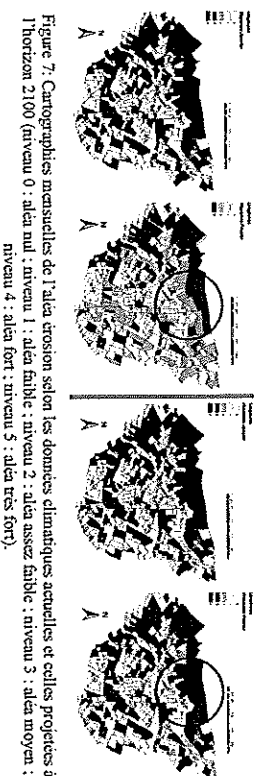


Figure 7: Cartographies mensuelles de l'aléa érosion selon les données climatiques actuelles et celles projetées à l'horizon 2100 (niveau 0 : aléa nul ; niveau 1 : aléa faible ; niveau 2 : aléa assez faible ; niveau 3 : aléa moyen ; niveau 4 : aléa fort ; niveau 5 : aléa très fort).

Pour novembre, la projection souligne un renforcement des niveaux moyen et surtout fort de l'aléa érosion. La tendance serait encore plus marquée en décembre. Les parcelles caractérisées par un aléa fort représenteraient 90% des surfaces cultivées. L'augmentation de la susceptibilité à l'érosion du bassin versant serait perceptible jusqu'au mois de février. L'aléa fort serait encore présent et l'aléa moyen concernerait plus de 80% des surfaces cultivées.

En comparant les données climatiques envisagées pour 2100 avec celle de notre chronique de référence (1991-2004), nous avons constaté que l'année 1994 était très comparable à la projection climatique pour 2100. Les cartes mensuelles de l'aléa obtenues pour 1994 montrent qu'elles sont très proches de celles de 2100. Connaissant la fréquence de retour des conditions climatiques de 1994, cela nous amène à conclure que les niveaux d'aléa obtenus pour une année moyen à l'horizon 2100 correspondraient à une année de la période actuelle dont la périodicité de retour est de 4 ans.

Discussion

Adaptation des modèles

Le projet CLIMASTER a permis de faire évoluer les outils de modélisation de l'aléa érosion des sols pour les rendre opérationnels dans le champ de la prospective climatique. Le modèle SCALES permet de proposer des scénarii sur mesure à hautes résolutions spatiale et temporelle de l'impact du changement climatique sur l'évolution de la susceptibilité des sols à l'érosion hydrique à l'horizon 2100. Les développements en cours du modèle MESALES vont permettre à court terme de mener le même type d'analyse prospective.

Ces approches croisées sont fondamentales. En l'absence de données de validation des estimations de l'aléa érosion, la possibilité de comparer les résultats des deux modèles présente un intérêt majeur. Cette comparaison est envisageable du fait des points communs entre les deux modèles : l'évaluation de l'aléa érosion est restituée sous forme de score, à l'échelle des parcelles agricoles et par saison. En revanche, ces modèles ne sont pas semblables car certains paramètres de calage, par exemple les seuls d'intensité de pluie, divergent. Ces différences offrent la possibilité de tester la validité des modèles pour détecter l'effet de changement climatique sur l'érosion des sols en analysant la sensibilité des données d'entrées.

Les travaux sont pour l'instant développés sur des secteurs relativement restreints mais ils ont vocation à être généralisés à des niveaux plus intégrateurs (Grands bassins versants, département, région). Les données d'entrée nécessaires à leur mise en œuvre sont en effet de plus en plus disponibles et permettraient de répondre au besoin d'outils d'évaluation des risques de dégradation des sols dans un contexte de changement climatique et d'adaptation des pratiques agricoles.

L'aléa érosion à l'horizon 2100

Les premières tentatives de modélisation prospectives montrent que l'augmentation de la pression érosive sur les sols cultivés projetée pour une année moyenne à l'horizon 2100 correspondrait à un scénario dont la fréquence actuelle est d'une fois tous les 4 ans. La sensibilité des sols cultivés en Normandie serait donc vraisemblablement plus importante et plus continue dans le temps au moins pour le bassin qui a fait l'objet du test.

Ces résultats en année normale ne doivent pas faire oublier que la variabilité climatique dans un futur lointain peut avoir des conséquences tout aussi dommageables que la tendance de fond. En outre, on doit également rappeler que deux années climatiquement semblables peuvent aboutir à réponses érosives différentes (Favis-Mortlock and Boardman, 1995).

Au-delà de la tendance interannuelle qui reste discutable, un balancement saisonnier de la sensibilité à l'érosion apparaît plus clairement. Le jeu de la vidange de la réserve utile en été et du renforcement des surplus hydrologiques en hiver entraîne un décalage de la sensibilité à l'aléa érosion qui diminue à l'automne et augmente en fin d'hiver et début de printemps (figure n°8).

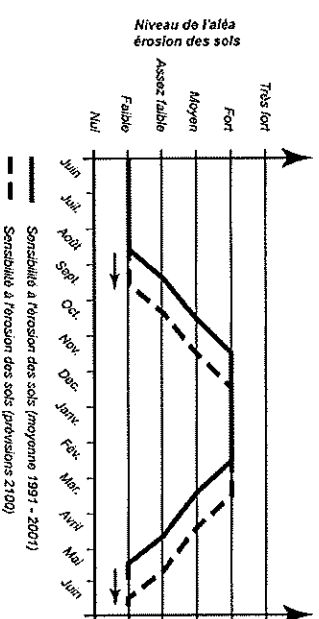


Figure n°8 : Saisonnalisation du décalage saisonnier de la susceptibilité des sols à l'érosion sous l'effet du changement climatique (scénario A1B)

Ces résultats posent clairement la question de la capacité d'adaptation des systèmes agricoles car au-delà de la pression liée au changement climatique sur les sols c'est la capacité systèmes culturaux à s'adapter à ces décalages saisonniers de la sensibilité qui est en jeu.

Des travaux précédents (ANR VMC, programme MESOEROS21 : Erosion des sols méditerranéens et vulnérabilité au changement global au cours du 21^e siècle) ont montré que les paramètres climatiques ont une influence directe limitée sur l'érosion, même si le régime des précipitations, l'un des déterminants de l'érosion, évoluera. L'influence du changement climatique sur l'érosion devrait être essentiellement indirect, au travers de l'adaptation des pratiques voire des systèmes agricoles aux conditions climatiques qui agissent sur les processus érosifs. Pour une meilleure prédiction de l'évolution de l'aléa érosion, il sera nécessaire de tester non seulement des scénarios climatiques mais aussi ceux concernant l'évolution des itinéraires culturaux et des occupations du sol.

Bibliographie

- Boardman J., 1990. Soil erosion on the South Downs: a review. In: J. Boardman, I.D.L. Foster and J.A. Dearing (Editors), *Soil Erosion on Agricultural Land*. Wiley, Chichester, pp. 87-105.
- Boardman J., Favis-Mortlock D.T., 1993. Climate change and soil erosion in Britain. *Geogr. J.*, 159(2): 179-183.
- Cantat O., Le Gouée P., Bensaid A., 2009 : Le rôle de la topographie et des sols dans la modélisation spatiale d'échelle fine des biotopes hydriques. Actes des Journées de Climatologie, CNFG, 2009, 81-100.
- Colmar A., Walter C., Le Bissonnais Y., Daroussin J., 2010. Dénarcologie de validation régionale par avis d'experts du modèle MESALES d'estimation de l'aléa érosif. *Etude et Gestion des Sols*, 71 (1) : 19-32.
- EEA, 2008. Impacts of Europe's changing climate. 2008 indicator-based assessment. JRC Reference Report No JRC47756, 242 p.
- Ellis R.H., Hadley P., Roberts E.H. and Summerfield R.J., 1990. Quantitative relations between temperature and crop development and growth. In: M.T. Jackson, B.V. Ford-Lloyd and M.L. Parry (Editors), *Climate Changes and Plant Genetic Resources*. Belhaven Press, London.
- Favis-Mortlock D., Boardman J., 1995. Nonlinear responses of soil erosion to climate change: a modelling study on the UK South Downs. *Catena*, 25, 365-387.
- GIEC (2007a) : Climate change 2007: the physical science basis. Summary for policymakers. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on climate change. website: www.ipcc.ch
- GOULET A., 2010. Application d'un modèle de diagnostic de l'érosion des sols (SCALES) en Basse-Normandie : Analyse aux échelles saisonnière et mensuelle des effets du changement climatique. *Mémoire de Master I Ingénierie et Géosciences du Littoral*, UCBN, 49 p.
- Hudine M., Hossell J.E. and Parry M.L., 1993. Future climate change and land use in the UK. *Geogr. J.*, 159(2): 131-147.
- Le Bissonnais Y., Montier C., Daroussin J., King D., 1998. Cartographie de l'aléa « Erosion des sols » en France. INRA Orléans. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. Etude et Travaux. 18, 91 p.
- Le Bissonnais Y., Montier C., Jannige M., Daroussin J., King D., 2002. Mapping erosion risk of cultivated soils in France. *Catena*, 46: 207-220.
- Le Gouée P., Delahaye D., Bernond M., Marie M., Douvinet J., Viel V., 2010. SCALES : a large-scale assessment model of soil erosion hazard in Basse-Normandie (Northern-Western France). *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 8, 887-901.
- Le Gouée P., Delahaye D., 2008 : Modélisation et cartographie de l'aléa érosion des sols et des espaces de ruissellement dans le Calvados, rapport d'étude, 242p.
- Le Gouée P., 2008 : Représentation cartographique des grands types de sols du Calvados. Université de Caen Basse-Normandie, Conseil général du Calvados, Chambre d'agriculture du Calvados, DIREN de Basse-Normandie. Poster au 1/50000.
- Séguin B., 2010. Le changement climatique : conséquences pour l'agriculture et la forêt. *Rapportement du CNRS*, 54, 36-47
- Van rompaye A., Vieillefont V., Jones R., Montanarella L., Verstraeten G., Buzzoffi P., Destal T., Krass J., Deventer J., Poesen J., 2003a - Validation des estimations de l'aléa érosion des sols à l'échelle européenne. European Soil Bureau - Research Report No. 13, 27 p.
- Wheeler T.R., Morison J.I.L., Hadley P. and Ellis R.H., 1993. Whole-season experiments on the effects of carbon dioxide and temperature on vegetable crops. In: G.J. Kenny, P.A. Harrison and M.L. Parry (Editors), *The Effect of Climate Change on Agricultural and Horticultural Potential in Europe*. Environmental Change Unit, University of Oxford, pp. 165-176.
- Zhang X.C., Liu W.Z., Li Z., Zheng F.L., 2009. Simulating site-specific impacts of climate change on soil erosion and surface hydrology in southern Loess Plateau of China. *Catena*, 79, 237-242.

La biodiversité : les écosystèmes aquatiques

Baglinière J.L., Bal G., Roussel J.M.,

Les écosystèmes aquatiques

Des milieux complexes sous pressions humaines fortes : Les écosystèmes d'eau douce constituent d'importants réservoirs de biodiversité et sont, à ce titre, extrêmement sensibles au changement global (Hemo et al., 2009). Outre l'intérêt propre des écosystèmes d'eau douce, les enjeux qui s'y rattachent sont multiples : importance pour le maintien de la biodiversité terrestre, services écologiques (régulation et épuration de l'eau et énergie renouvelable notamment) et engagements réglementaires. En effet, aux conventions internationales et directives européennes protégeant certains types d'espèces et d'habitats (RAMSAR, CITES, Directives Habitats Faune Flore...) s'ajoute la Directive cadre sur l'eau (DCE) de l'Union européenne qui demande que l'ensemble des masses d'eau françaises atteigne le bon état écologique d'ici 2015 (qualité et connectivité).

Ces écosystèmes sont soumis à une pression croissante des activités humaines locales auxquelles s'ajoutent les effets du changement climatique. Ainsi, les aménagements au sein des réseaux hydrographiques (barrages, artificialisation des berges, prélèvements d'eau, pollution, eutrophisation, sédimentation, etc.) vont dans la plupart des cas conduire à une aggravation de certains des processus entraînés par le changement climatique, comme l'augmentation de la température de l'eau et la modification des débits, la dégradation des zones humides riveraines et littorales (McCormick et al., 2009 ; Schauer et al., 2009). Les petits cours d'eau sont particulièrement exposés (intrication avec les systèmes terrestres, faible inertie thermique, forte dépendance des précipitations, Poff et al., 2002). Leur fonctionnement est directement influencé par les flux hydriques qui contrôlent les flux particuliers ou dissous (Poff & Allan, 1995). L'altération du fonctionnement est liée à une modification de la qualité de l'eau et de la connectivité des habitats, influençant directement la capacité d'accueil du milieu (Poff & Allan 1995 ; Fauteux et al. 2001). La continuité écologique est considérée comme un indicateur de l'état de santé de ces écosystèmes puisque la fragmentation produit une forte érosion de la biodiversité (Pringle 2003). Cette continuité se poursuit au-delà du milieu d'eau douce par un lien fonctionnel avec le milieu marin et notamment avec les zones côtières. Les zones de transition que sont les estuaires jouent un rôle essentiel en termes de transferts de matière terrigène et d'apports nutritifs. Inversement, les échanges entre le milieu marin et les cours d'eau se font à l'occasion des migrations de colonisation des cours d'eau, leur intensité étant dépendante de la qualité des milieux estuariens et côtiers.

Les réactions à cet ensemble de pressions sont mal cernées, d'autant que dans les cours d'eau de petite taille, le fonctionnement interne est fortement dépendant de l'environnement proche (corridor fluvial, bassin versant, zone côtière). Par ailleurs, la superposition des deux types de forçage (local - global) peut être responsable de variations importantes à plus ou moins long terme. Cette superposition rend l'analyse complexe pour tous les compartiments de l'écosystème. La chaîne de causalités qui conduit des pressions anthropiques aux impacts dans les milieux aquatiques mérite d'être mieux comprise.

L'importance de l'habitat pour les communautés d'organismes aquatiques. Parmi les communautés qui peuplent ces milieux, les poissons occupent en général les derniers maillons de la chaîne trophique et sont l'objet d'attentions particulières liées à de fortes demandes sociales. La distribution de ces espèces et le fonctionnement de leurs populations à l'intérieur d'un bassin sont fortement reliés aux caractéristiques du milieu et notamment à l'habitat aquatique et son niveau d'hétérogénéité. Cet habitat correspond à la position qu'occupe à un instant donné un individu parvenu à un certain stade

de développement, cherchant à optimiser le compromis nécessaire entre différentes contraintes biologiques et écologiques dans un milieu variable (Levêque 1995). Quelle que soit l'échelle spatiale, l'habitat reste un paramètre très structurant de l'organisation des communautés d'organisme aquatiques. Ainsi, à l'échelle d'un tronçon de rivière, on observe une ségrégation spatiale entre les juvéniles de saumon atlantique (*Salmo salar*) essentiellement infodés aux zones courantes peu profondes de la rivière principale et ceux de la truite commune de même âge très abondants dans les affluents et les têtes de bassin, ces deux espèces de salmonidés ayant une écologie très proche. A une échelle spatiale plus fine (macro/microhabitat), la vitesse de courant pour le saumon et l'effet cache-frye /profondeur pour la truite sont les facteurs physiques essentiels jouant sur une distribution différente des deux espèces dans un cours d'eau. Le substrat, autre facteur de l'habitat physique, joue également un rôle important pour toutes les espèces à reproduction lithophile qui déposent leurs œufs sur le substrat. Cet effet substrat sur le fonctionnement des populations est renforcé chez la truite et le saumon qui déposent leurs œufs dans des frayères creusées par les adultes. Il faut alors pour la reproduction de ces espèces des fonds propres à un substrat grossier (bonne circulation d'eau et absence de colmatage donc pas de dépôt de particules fines) et des zones interstitielles bien oxygénées. En effet, un dépôt de sédiments fins dans les interstices de ce substrat peut créer des conditions d'hypoxie (sub)létales pour la survie des œufs et des alevins (Massa et al., 2000 ; Roussel, 2007). Sur les bassins versants, l'intensification des pratiques culturales, associées à des conditions climatiques et pédologiques particulières, conduisent à une accentuation des phénomènes d'érosion hydrique, d'augmentation de la charge en matières en suspension (MES) et de colmatage des substrats et en définitive à une altération de la qualité des eaux superficielles.

En règle générale, l'habitat physique est défini par trois variables, vitesse, profondeur et substrat, et classé selon cinq grands types de faciès d'écoulement (Bagliniere & Champigneulle, 1982 ; Malavoï & Souchea, 2002) (Fig. 1) : (1) rapide, caractérisé par une vitesse de courant très élevée et une granulométrie très grossière, (2) rapide, identifié par une faible profondeur et une vitesse de courant élevée avec des frisés apparents à la surface de l'eau et un substrat grossier, (3) plat courant, caractérisé par une plus grande profondeur que celle des rapides, une vitesse de courant modérément élevée avec une surface lisse, (4) plat lent, identifié par une vitesse de courant faible et une profondeur supérieure à celle du plat courant et (5) profond, à plus faible vitesse de courant que le plat lent et de plus grande profondeur.

Ainsi, pour suivre l'évolution de l'abondance et de la structure des populations de poissons, il importe de pouvoir quantifier et qualifier les différents types d'habitats présents sur la rivière mais également de pouvoir caractériser la dynamique spatiale et temporelle des habitats aquatiques et rivulaires et donc de la capacité d'accueil d'un cours d'eau. Ceci nécessite également de connaître le temps de réponse des organismes aquatiques à cette dynamique pour aboutir à une caractérisation d'habitats fonctionnels en prenant en compte leur qualité physico-chimique dont la température de l'eau, et leur niveau d'accessibilité (position sur le réseau). Cette dynamique spatiale et temporelle des habitats peut dépendre à la fois de l'impact des activités anthropiques sur le bassin versant mais également des effets du changement climatique.

Evolution de l'habitat de l'Or : modification des compositions granulométriques du substrat. L'Or est un affluent de la partie basse de la Sélune qui se jette dans la Manche en Basse Normandie. Ce cours d'eau fait l'objet d'un suivi à long terme (28 ans) du fonctionnement des populations de poissons migrateurs diadromes (cycle biologique alternant un séjour en rivière et en mer). Il constitue de ce fait un cours d'eau témoin de l'évolution de ces populations de poissons en liaison avec les activités agricoles présentes sur le bassin versant.

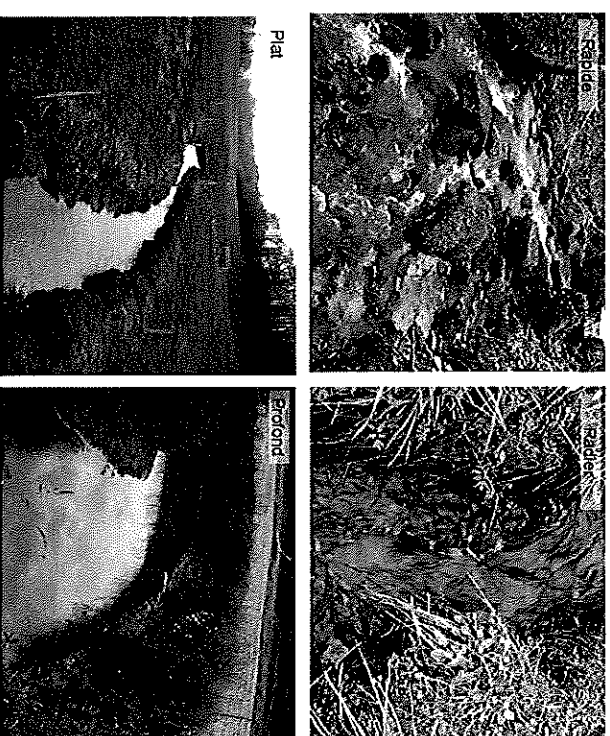


Figure 1 : Les grands types d'habitat ou faciès d'écoulement

Une étude a été entreprise pour analyser l'évolution de ce cours d'eau et plus particulièrement celle de la granulométrie du substrat sur une période de treize ans (1996-2009). Initialement, ce travail visait à mettre au point une méthodologie pour estimer la capacité de production en saumon atlantique du bassin versant. Pour cela, les habitats favorables à la présence des juvéniles (zones courantes) ont été identifiés visuellement puis mesurés sur les principales zones accessibles aux adultes de saumons soit une prospection de 20 km de linéaire de cours d'eau (cours principal et affluent). Le même protocole de mesure a été rigoureusement appliqué treize ans plus tard. Ce protocole incluant

- la description des faciès d'écoulement selon une classification en quatre types et avec cinq métriques (longueur, largeur moyenne, granulométrie dominante, taux de recouvrement par les macrophytes et ombrage du cours d'eau) (tab. 1)

- La description des berges avec l'occupation du sol des parcelles rivulaires et la présence d'obstacles (longueur et accessibilité) (Fig. 2).

¹ Plat lent et plat courant sont souvent regroupés sous la dénomination générique de plat.

Tableau 1 : Définition des métriques du protocole de description du linéaire

Métriques	Classes	Abréviations	Descriptions
Ecoulement			<i>Profondeur</i>
	Rapide	R	-
	Radier	Ra	< 50 cm
	Plat	P	< 80 cm
	Profond	Po	> 80 cm
Granulométrie	Grossier	G	Galets, blocs, rocs
	Mixte	M	Galet, blocs dans matrice fine
	Sableux	S	Sable, limon
	Absents	E	Absence
Macrophytes	Moy. Abondant	MA	Quelques touffes
	Abondant	A	1/3 à 1/2 de la surface en eau
	Très Abondant	TA	> 1/2 de la surface en eau
Ombrage	Type 1	1	Pas d'ombrage
	Type 2	2	10 à 30 % du cours
	Type 3	3	30 à 50 % du cours
	Type 4	4	> 50 % du cours

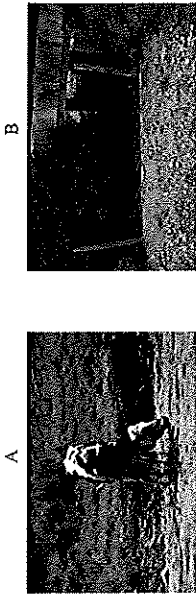
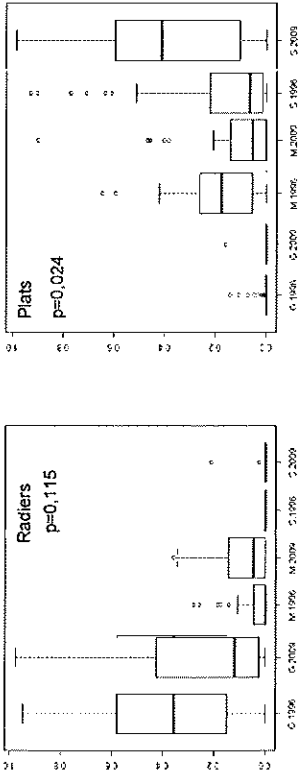


Figure 2 : Abreuvoirs «Dans» (a) et «Hors» (b) du cours d'eau (abreuvoir aménagé)

Les résultats montrent entre 1996 et 2009 (Fig 3) :

- Une évolution des faciès différente selon leur type et leur classe granulométrique. Les habitats rapides très peu nombreux sur l'Or et les habitats profonds ne changent pas tandis que l'on observe une diminution des recouvrements de faciès radiers et de granulométrie grossière et une augmentation des recouvrements de faciès plats et de granulométrie sableuse. Cette tendance est significativement plus accentuée pour le faciès plat. La prépondérance de ces deux derniers types de faciès sur l'Or traduit une diminution générale de la taille de la granulométrie du substrat.
- Un développement plus important des macrophytes lié à la présence d'un substrat mixte.



Figures 3 : Box plot des proportions des classes de granulométrie sur les faciès radiers et plats de 1996 et 2009 (G = grossier, M = mixte, S = sableux)

Cette tendance d'évolution de l'habitat sur l'Or et cette diminution de la taille de la granulométrie reste trop forte pour être expliquée par de seuls biais méthodologiques (observations visuelles). Par ailleurs, les débits plus élevés de 2009 comparés à ceux de 1996 auraient dû permettre d'augmenter le nombre d'habitats présentant des vitesses de courant élevée ce qui n'a pas été le cas. Ainsi, les causes probables de cette évolution sont plus à rechercher dans

- L'augmentation des surfaces cultivées en maïs laissant le sol nu à une période automne-hiver) où les précipitations sont les plus abondantes et où le transfert hydrique vers l'extérieur qu'est le cours d'eau est le plus rapide en raison de la formation possible d'une croûte de battance des sols.
 - L'impact du piédonement du bétail sur les berges avec une omniprésence d'abreuvoirs non aménagés et où la végétation rivulaire a disparu
- Dans les deux cas, cela se traduit par un apport de particules fines dans l'eau par ruissellement sur sols tassés ou par remise en suspension du au piédonement du bétail.

La température de l'eau : un facteur environnemental structurant fortement les milieux aquatiques et leurs compartiments biologiques. La température de l'eau et le régime hydrologique sont les deux facteurs environnementaux qui contribuent le plus à structurer les milieux d'eau courante. Plus que les valeurs absolues, ce sont les variations de débit et de température qui jouent un rôle structurant. Ces deux facteurs déterminent les fenêtres temporelles du développement de certaines phases ou stades clés et influencent la répartition spatiale des espèces et la capacité d'accueil du milieu (Poiff & Allan 1995).

La température de l'eau, en agissant directement sur le métabolisme des organismes aquatiques poikilothermes/ectothermes, est un paramètre très structurant de leur répartition et de leur abondance. Elle agit à l'échelle de l'aire de distribution des espèces en relation avec leurs préférences thermiques et leur degré de sténio (préférences thermiques marquées)- ou eurythermie (préférences thermiques larges) (Lassale et al. 2008). A l'échelle du réseau hydrographique, elle a un rôle important dans la répartition spatiale et sur la structure de taille des populations et des communautés (Daufresne & Boët 2007). A cette échelle, elle joue également un rôle déterminant sur la croissance des individus et la dynamique de la population (Bagliniere & Maisse, 2002). Chez les salmonides, les fluctuations de la température de l'eau impactent fortement les conditions de croissance qui est un trait d'histoire de vie essentiel qui oriente la trajectoire de vie du poisson vers la migration, la dispersion, la sédentarisation et/ou une précocité ou non de la première reproduction.

Sous nos latitudes, les évolutions climatiques observées (de l'ordre du degré) sont encore faibles pour conduire à des phénomènes biologiques extrêmes (invasion ou extinction de populations) et à des modifications profondes de la composition faunistique des cours d'eau. En revanche, des évolutions

plus subtiles sont déjà observées, pouvant mener à terme à des adaptations de certaines populations ou à leur disparition (Baglinière et al. 2004).

Dans le contexte du réchauffement climatique, il paraît important de pouvoir prédire ces évolutions structurelles et fonctionnelles des communautés de poissons et d'estimer quelle pourrait être la part de ce réchauffement dans ces évolutions biologiques.

Evolution de la température de l'eau des cours d'eau et impact sur la croissance du poisson, un trait d'histoire de vie essentiel chez le poisson. Dans une première étape, un nouveau modèle prévisionnel de la température de l'eau intégrant deux prédicteurs à savoir la température de l'air et le débit a été développé. Cette étude a été effectuée sur l'Or et sur deux autres petits fleuves de la façade atlantique française (le Scouff en Bretagne et la Nivelle au Pays Basque) ce qui permettait d'avoir des conditions environnementales contrastées. Ce modèle statistique Bayésien de corrélation entre la température de l'eau et les deux prédicteurs a permis de reconstruire des séries chronologiques historiques mais également d'effectuer des projections en fonction des scénarii de changement climatique. Ce nouveau modèle a permis notamment de quantifier la part de la corrélation due à la saisonnalité des signaux de performance prédictives de la température de l'eau. Ainsi, les prédictions de réchauffement des cours d'eau issues de ce modèle ont révélé un réchauffement plus faible que celui de l'atmosphère dans les cinquante prochaines années (Bal, 2011). Développé dans le cadre Bayésien, le modèle a également permis de quantifier d'une manière plus rigoureuse l'incertitude dans les prédictions de réchauffement des cours d'eau.

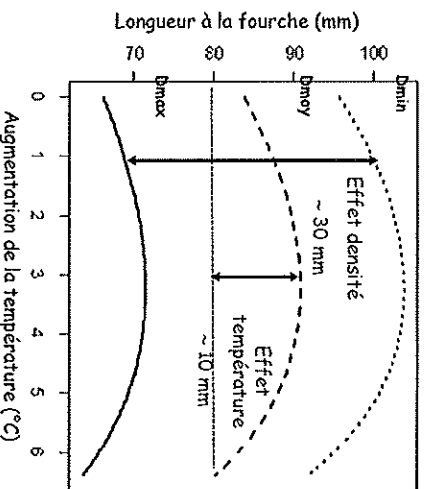


Figure 4 : Effet de la densité et de la température de l'eau sur la taille du juvénile de saumon à la fin de sa première année de vie dans le cadre d'un réchauffement des cours d'eau

Dans une seconde étape, les facteurs de variabilité temporelle de la croissance des juvéniles de saumon ont été abordés en considérant d'une part la température de l'eau et d'autre part le niveau d'abondance de cette espèce à ce stade de développement. Le juvénile de saumon est une espèce territoriale inféodé à des types habitats spécifiques (zones très courantes : habitats radiers et rapides) dont la disponibilité varie suivant les caractéristiques du cours d'eau. De fait, la croissance est densité-dépendante signifiant une relation inverse entre des taux de paramètres démographiques. Ainsi, un modèle de croissance de Von Bertalanffy a été développé dans un cadre Bayésien pour quantifier les effets relatifs de la variabilité de température et de celle de la densité de juvéniles de saumon sur la taille atteinte par les jeunes saumons à la fin de la première saison de croissance en utilisant un jeu de données collectées sur 20 ans. Cette croissance est apparue peu influencée par la variabilité de

température du cours d'eau. A l'inverse, elle apparaît fortement dépendante des fluctuations de densité des juvéniles présents sur le cours d'eau (Bal et al. 2011). Cette influence traduit l'importance de la capacité d'accueil d'un cours d'eau sur l'évolution de la population de saumon d'un cours d'eau et donc de l'importance du maintien d'un habitat fonctionnel suffisant. Ainsi, compte tenu d'un réchauffement plus faible dans les cours d'eau que dans l'air, la modification du régime thermique des petits fleuves rivières par le changement climatique n'apparaît pas comme le facteur de pression dominant capable d'affecter la croissance et les choix d'histoire de vie des juvéniles dans les années à venir (Fig. 4).

Conclusion : Importance des pressions locales anthropiques sur la dynamique des cours d'eau et de ses différents compartiments. Ainsi, ces études débouchent sur une conclusion essentielle à savoir que les facteurs locaux et les facteurs anthropiques liés à l'impact des activités humaines sur les cours d'eau, et notamment l'agriculture, jouent un rôle fort sur l'évolution (1) de la croissance des juvéniles trait d'histoire de vie essentiel dans le développement d'une trajectoire individuelle et (2) de l'habitat aquatique paramètre structurant l'organisation du peuplement ichthyologique. Ceci signifie alors que l'impact du changement climatique direct sur les petits fleuves et leurs compartiments physiques et biologiques ne peut pas être considéré pour l'instant comme un facteur majeur d'évolution dans les prochaines années. En fait, il faut considérer à l'avance que le changement climatique risque d'impacter moins les petits fleuves par effet direct mais plus par effet indirect ou retard via les modifications de l'occupation des sols et des pratiques agricoles sur les bassins. Néanmoins, l'impact du changement climatique sur les cours d'eau ne doit pas se résumer au seul effet du réchauffement mais doit prendre en compte une diminution probable des débits liée à une modification du régime et de l'abondance des précipitations. Cette diminution, associée à une augmentation de la température de l'eau, risque d'impacter fortement les milieux aquatiques courants. En effet, le régime hydrologique intervient directement et régulièrement dans la dynamique hydroécologique et constitue une variable explicative clé de la variabilité temporelle des cours d'eau. Il impose une modification saisonnière aux variables morphodynamiques considérées comme très structurantes pour la faune ichthyologique : vitesse du courant, hauteur d'eau et granulométrie du lit.

Références

- Baglinière J.L. & Champagnolle A., 1982. Densité des populations de Truite commune (*Salmo trutta* L.) et de juvéniles de Saumon atlantique (*Salmo salar* L.) sur le cours principal du Scouff (Bretagne) : préférences physiques et variations annuelles (1976-1980). *Acta Oecologica Oecologia Applicata*, 3, 241-256.
- Baglinière J.L., Denais L., Rivot E., Pordier J.P., Prévost E., Vauclin V., 2004. Length and age structure modifications of the Atlantic salmon (*Salmo salar*) populations of Brittany and Lower Normandy from 1972 to 2002. Technical Report, INRA-CSP, 24 p.
- Baglinière J.L. & Maisse G., 2002. La biologie de la Truite commune (*Salmo trutta* L.) dans la rivière Scouff, Bretagne : une synthèse des études de 1972 à 1997 sur le bassin du Scouff. INRA Productions Animales 15, 319-331.
- Bal G., 2011. Evolution des populations française de saumon atlantique (*Salmo salar* L.) et changement climatique. Thèse Université de Rennes I, 165 p.
- Bal G., Rivot E., Prévost E., Piau C. & Baglinière J.-L., 2011. Effect of water temperature and density of salmonid juveniles on growth of young-of-the-year Atlantic salmon *Salmo salar* L. *Journal of Fish Biology*, doi:10.1111/j.1095-8649.2011.02902.x.
- Daufrêne M. & Boët P., 2007. Climate change impacts on structure and diversity of fish communities in rivers. *Global Change Biology* 13, 1-12.
- Femeau E., Ombredane D. & Baglinière J.L., 2001. Ecologie des poissons en hydrosystèmes continentaux. In "Atlas des poissons d'eau douce", Keitt P. et Allard J. (Coords), Patrimoines naturels, 47, 36-55.
- Heino J., R. Virkkala & Toivonen H., 2009. Climate change and freshwater biodiversity: detected patterns, future trends and adaptations in northern regions. *Biological Reviews* 84, 39-54.

- Lassalle G., Béguier M., Beaulaton L. & Rochard E., 2008. Diadromous fish conservation plans need to consider global warming issues: An approach using biogeographical models. *Biological Conservation* 141, 1105-1118.
- Levêque C., 1995. L'habitat : Être au bon endroit au bon moment ? *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 337/338/339, 9-20.
- Malavoi J. R. & Soucheon Y., 2002. Description standardisée des principaux faciès d'écoulement observables en rivière : clé de détermination qualitative et mesures physiques. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture* 365/366, 357-372.
- Massa F., Bagliniere J.L., Prunet P. & Grimaldi C., 2000. Survie embryon-larvaire de la truite (*Salmo trutta*) et conditions climatiques dans la frayère. *Cybum*, 24 (3) suppl., 129-140.
- McCormick S. D., Lerner D. T., Monette M.Y., Nieves-Puigdollier K., Kelly J. T. & Björnsson B. Th., 2009. Taking it with You When You Go: How Perturbations to the Freshwater Environment, Including Temperature, Dams, and Contaminants, Affect Marine Survival of Salmon. *American Fisheries Society Symposium*, 69, 195-214.
- Ombredane D., Rougeron N., Tiphaneau M., Bagliniere J.L. & Richard A., 2010. Recolonisation de trois fleuves bas-normands par les migrateurs amphihalins. Rapport d'avancement 2ème année 2009-2010. INRA UMR ESE, Agence de l'Eau Seine-Normandie, Conseil Régional de Basse-Normandie, 101 p. Poff N. & Allan J.D., 1995. Functional organization of stream fish assemblages in relation to hydrological variability. *Ecology* 76, 606-627.
- Poff N. & Allan J.D., 1995. Functional organization of stream fish assemblages in relation to hydrological variability. *Ecology* 76, 606-627.
- Poff N.L., Brinson M.M. & Day J.W., 2002. Potential impacts on inland freshwater and coastal ecosystems in the United States. *Aquatic Ecosystems and Global Change*. Pew Center on global change, 44 p.
- Pringle C., 2003. What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important? *Hydrological processes*, 17, 2685-2689.
- Roussel J.-M., 2007. Carry-over effect in brown trout (*Salmo trutta*): hypoxia on embryos impairs predation avoidance by alevins in experimental channels. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 64: 786-792.).
- Scheurer K., Alewell C., Banninger D. & Burkhardt-Holm P., 2009. Climate and land-use changes affecting river sediment and brown trout in alpine countries—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 16, 232-242.

Augmentation du gaz carbonique dans l'atmosphère: les plantes réagissent !

L'augmentation continue du gaz carbonique (CO₂) dans l'atmosphère influe directement sur les conditions climatiques en augmentant le **forçage radiatif**, c'est-à-dire la part de l'énergie reçue par le système terre vis-à-vis de l'énergie perdue. Cela provoque le réchauffement atmosphérique (le traditionnel « effet de serre ») et l'augmentation de l'évapotranspiration, qui dépend notamment de la température. Cette augmentation du CO₂ influe également sur le système climatique à travers ses effets sur la physiologie des plantes. Cette influence est appelée **forçage physiologique** (BETTS et al., 2007) : la fermeture relative des stomates de nombreux végétaux avec l'augmentation de la concentration en CO₂ augmente l'efficacité de l'eau (même production de biomasse pour moins d'eau consommée), donc réduit la transpiration, et laisse ainsi plus d'eau dans les sols. Cet effet est particulièrement important pour la plupart des plantes et tous les arbres (dites plantes dites en C3) et plus faible pour les cultures comme le maïs (plantes dites en C4).

Ce forçage, connu des physiologistes, les a conduit à intégrer ce facteur lors de la simulation de l'effet du changement climatique sur les principales espèces en France (BRISSON, 2010). (BRISSON, 2010) propose ainsi un facteur correctif pour le calcul de l'évapotranspiration de référence (ETO) qui prend en compte l'effet de cette augmentation du CO₂. Cette correction n'est pas anecdotique : pour un taux de CO₂ de 370 ppm et un ETO initial de 500 mm, l'ETO passe à une valeur de 426 mm avec un doublement de CO₂, soit une baisse de 15% de l'ETO. L'augmentation du CO₂ pourrait ainsi conduire paradoxalement à une augmentation ou à une moins grande diminution de l'eau stockée dans les sols, et de l'eau disponible pour la recharge des nappes et pour l'écoulement.

Cependant la complexité des processus mis en jeu par le changement climatique ne s'arrête pas là : cet effet ne s'exprime pas en tout temps; Lorsque le sol est sec et ne peut pas répondre à la demande évaporatoire, l'évapotranspiration réelle est alors inférieure à ETO, et contrôlée non pas par cette valeur d'ETO, mais par la quantité d'eau contenue dans le sol, comme cela est montré dans cet ouvrage par exemple par Lamy et Lemerrier. Dans les sols irrigués par contre ce processus va jouer à plein. Cette complexité est illustrée ici par des effets de régulation liés à des rétroactions négatives (c'est-à-dire contre-balançant un processus en jeu). Dans d'autres cas il y aura au contraire des effets de synergie.

L'importance de ce forçage physiologique sur les ressources en eau à l'échelle de bassins versants doit encore être évaluée (HUNTINGTON, 2008). (GEDNEY et al., 2006) ont récemment montré une augmentation de l'écoulement des fleuves au niveau mondial pendant le XXI^{ème} siècle, malgré l'augmentation des prélèvements par l'homme. L'explication donnée à cela, à travers un modèle de processus, est en grande partie l'effet du forçage physiologique. Nous présentons ci-dessous 2 illustrations régionales de ce forçage physiologique. La première montre les conséquences de cet effet sur l'évapotranspiration, cumulée sur la saison chaude (d'Avril à fin Septembre) pour 3 sites contrastés. On constate un effacement de l'effet du changement climatique sur l'ETO, qui reste stable dans le futur.

La seconde montre de façon plus détaillée, mois par mois, sur une station, l'effet du forçage physiologique sur l'évapotranspiration de référence (ETO), dans le futur proche.

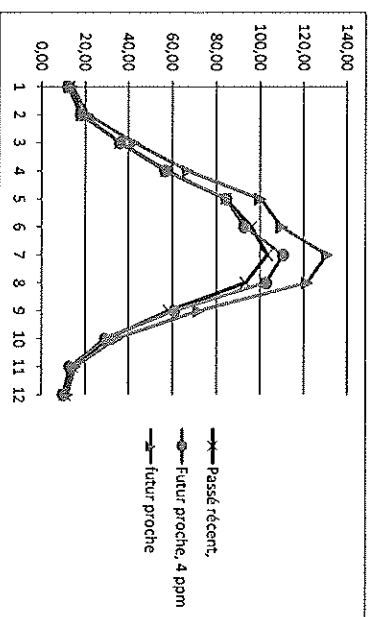
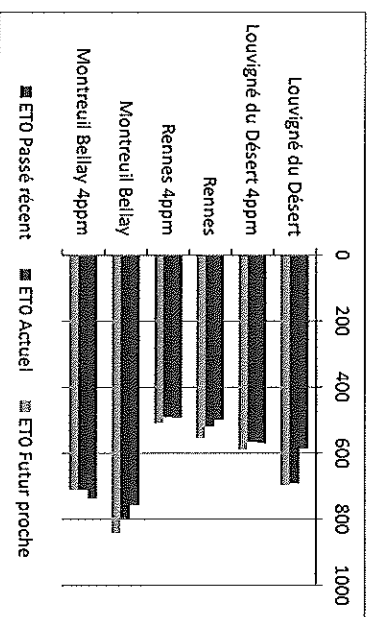


Figure. Evolution dans le futur proche de l'évapotranspiration de référence calculée d'une part selon la formule de Penman Monteith (futur proche), et d'autre part selon la formule ajoutant l'influence du CO₂ sur ETO pour un accroissement du CO₂ de 4ppm/an (futur proche, 4ppm). Les valeurs représentées sont la moyenne sur 30 ans.

a) (en haut) valeurs moyennes sur les mois d'Avril à Septembre, pour 3 stations Nord Bretagne, Bassin de Rennes et Pays de Loire

b) (en bas) Evolution mensuelle pour la station de Rennes.

Becher, O., Jones, A., and Betts, R., 2005. Climate response to the physiological impact of carbon dioxide on plants in the Met Office Unified Model HadCM3. *Climate Dynamics* 32, 237-249.

Betts, R. A., Becher, O., Collins, M., Cox, P. M., Falloon, P. D., Godfrey, N., Hemming, D. L., Huntingford, C., Jones, C. D., Saxon, D. M., R., and Webb, M. J., 2007. Projected increase in continental runoff due to plant responses to increasing carbon dioxide. *Nature* 448, 1037-1041.

Brissin, N., 2010. Description des modèles agronomiques et forestiers et mise en oeuvre. In: Brissin N., L., F. (Ed.), *Live vert du projet climater*. INRA-ADFC, Angers.

Godfrey, N., Cox, P. M., Betts, R. A., Becher, O., Huntingford, C., and Stott, P. A., 2006. Detection of a direct carbon dioxide effect in continental river runoff records. *Nature* 439, 835-838.

Huntingford, T. G., 2008. CO₂-induced suppression of transpiration cannot explain increasing runoff. *Hydrol. Process.* 22, 311-314.

Ces annexes sont à destination des instances d'évaluation et ne doivent pas être diffusées sans l'accord préalable écrit de leurs auteurs.

message complémentaire

"Des analyses sont en cours pour évaluer le biais introduit par les séries climatiques simulées sur les simulations de jours disponibles. Pour cela nous comparons les résultats de simulation entre 2004 et 2009 de la série observée et de la série simulée ALB, pour le poste de Louvigné du Désert. Les premiers résultats montrent une sur-estimation des jours disponibles au printemps et une concordance pour l'automne. Ce biais est à confirmer et nous demandons donc de ne pas porter une importance trop grande aux résultats numériques des simulations, mais de considérer uniquement les grandes tendances."

Observation des changements d'occupation et d'utilisation des sols par télédétection dans le Grand Ouest

Samuel Corgne, Laurence Hubert-Moy, Rémi Lecerf, Alban Thomas, Pauline Dusseux, Olivier Planchon

Les changements d'occupation et d'utilisation des sols ont des conséquences avérées sur l'environnement et sur le climat (Lobell *et al.*, 2006). Dans les régions caractérisées par une agriculture prédominante, les changements d'occupation des sols sont très fortement liés aux changements de pratiques agricoles, tels que l'implantation de prairies à la place de cultures ou la mise en place d'un couvert végétal en hiver (Thenail et Baudry, 2001). Ces changements de pratiques agricoles sont motivés par des facteurs locaux comme le choix des successions culturales et des assolements par les agriculteurs, mais aussi par les politiques locales, nationales et européennes mises en place (Vannier *et al.*, 2011; Houet *et al.*, 2008.). Plusieurs études récentes ont montré les relations complexes existant entre le changement climatique et les changements d'occupation des sols (Fisher *et al.*, 2005). Elles mettent en évidence que ces changements apparaissent tour à tour comme un des facteurs explicatifs du changement climatique et comme une conséquence de ce dernier (Lobell et Field, 2007).

La télédétection est aujourd'hui un outil d'observation couramment privilégié pour étudier les changements d'occupation des sols. La plupart des inventaires des espaces agricoles ou forestiers, tels que l'enquête TerUti-LUCAS ou la base de données CORINE Land Cover (Co-Ordination of Information on the Environment) sont réalisés avec des images satellitaires optiques à haute résolution spatiale, qui sont formées de pixels ayant une taille comprise entre 10 et 30 mètres. Si la précision de ces images est suffisante pour réaliser des inventaires de l'occupation des sols à une échelle parcellaire, elles présentent deux contraintes majeures pour caractériser finement l'évolution du couvert végétal afin d'étudier sa relation avec le climat : seules quelques images sont exploitables par an en raison d'une résolution temporelle trop faible des capteurs qui les enregistrent et de la présence de nuages, et chacune d'entre elles ne couvre qu'une partie du territoire régional, ce qui entraîne des décalages d'acquisition préjudiciables pour la réalisation d'inventaires homogènes. Or, il existe des séries temporelles d'images à moyenne résolution spatiale, actuellement sous-exploitées, qui permettent d'étudier les changements d'occupation des sols et de caractériser finement l'évolution du couvert végétal à l'échelle de grandes parcelles ou d'îlots parcellaires sur le territoire national, avec une répétitivité quasi-quotidienne (Baret *et al.*, 2007 ; Lecerf *et al.*, 2008). Dans la mesure où ces séries d'images à moyenne résolution spatiale sont disponibles depuis l'année 2000, il est envisageable de chercher à étudier la relation entre les changements d'occupation du sol et la variabilité climatique sur la dernière décennie à l'échelle régionale ou supra-régionale, et ceci à une échelle infra ou inter-annuelle.

Dans le cadre du PSDR-GO, nous avons exploité la complémentarité des images à moyenne et à haute résolution spatiales pour identifier, caractériser et suivre les changements d'occupation des sols depuis 2000 à deux échelles (Figure 1) : nous avons d'abord étudié la dynamique de la végétation à partir de plusieurs indicateurs à l'échelle du Grand Ouest, qui englobe les régions Bretagne, Pays de

Figure 1. Localisation de la zone d'étude (le Grand Ouest) et des sites d'étude

Suivi des changements d'occupation des sols par télédétection à l'échelle du Grand Ouest

La télédétection permet d'estimer des variables biophysiques révélatrices de l'état et du fonctionnement de la couverture végétale. L'identification des changements inter et intra-annuels de la végétation observés dans le Grand Ouest sur la période 2000-2010 à travers l'analyse de variables biophysiques dérivées des séries temporelles d'images MODIS a nécessité au préalable l'élaboration d'une chaîne d'acquisition et de traitement automatique d'images.

Les séries temporelles d'images MODIS

Le capteur MODIS placé sur le satellite EOS-AM1 (Terra) fournit des images de moyenne résolution spatiale de la quasi-totalité de la surface terrestre tous les 1 à 2 jours. La taille des pixels composant les images étant comprise entre 250m*250m et 1 Km*1Km, il est possible de réaliser des cartographies à une échelle quasi-parcellaire, ou au moins à celle de l'ilot parcellaire dans des paysages agricoles très fragmentés, avec la résolution spatiale la plus fine. La fréquence d'acquisition élevée des images permet d'observer un suivi régulier de la végétation, en particulier d'observer sa dynamique saisonnière. Les images MODIS acquises par le satellite Terra, lancée en 1999 et opérationnel depuis mars 2000, permettent ainsi d'effectuer un suivi des surfaces terrestres sur les dix dernières années.

Toutefois, les images brutes du capteur MODIS ne sont pas directement exploitables pour caractériser et suivre la dynamique de la couverture végétale, car elles sont affectées par des déformations géométriques et atmosphériques. Par ailleurs, pour identifier des dynamiques inter et intra-annuelles de la végétation il est nécessaire de disposer de séries temporelles d'indicateurs de ces dynamiques. Afin de constituer ces séries temporelles à partir des images MODIS, nous avons élaboré une chaîne de traitement d'images complète qui comprend plusieurs étapes. Les trois premières étapes visent à effectuer les prétraitements des images. La première étape consiste à télécharger les produits MODIS L1B, qui sont des images de luminance journalières non géoréférencées (<http://landsweb1.nascom.nasa.gov/>), et à sélectionner automatiquement les images couvrant tout ou partie de la zone d'étude qui ne sont pas affectées par une couverture nuageuse (Ackerman *et al.*, 2002 ; Abdel Latif *et al.*, 2008). La deuxième étape correspond à l'application d'un modèle de normalisation des valeurs numériques des images en passant des valeurs de luminance à des valeurs de réflectance au sol (Veronot *et al.*, 2002). Au cours de la troisième étape, les images sont corrigées géométriquement et géoréférencées dans le même système de projection, en l'occurrence ici le Lambert 2 étendu, afin d'être superposables.

Les étapes suivantes ont pour objectif de constituer des séries temporelles d'indicateurs de la dynamique de la végétation, qui sont ici des variables biophysiques. Ces dernières comprennent par exemple l'indice de surface foliaire ou LAI (Leaf Area Index), qui est la quantité de feuilles vertes par unité de surface, le fAPAR (fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation) qui correspond à la fraction du rayonnement photosynthétiquement actif absorbée par la végétation ou encore le fCOVER qui est la fraction de couverture végétale des sols, c'est-à-dire la surface couverte par de la végétation par unité de surface. Ces variables peuvent être dérivées des images de télédétection soit de façon empirique en calculant des indices de végétation, soit en appliquant des modèles de transfert radiatif des couverts végétaux qui visent à modéliser les interactions entre le rayonnement électromagnétique et la matière au niveau de la structure du couvert végétal (Lecot *et al.*, 2008). Comme

les méthodes empiriques ne permettent pas d'établir un lien constant dans le temps et dans l'espace entre un indice de végétation et des variables biophysiques, nous avons choisi d'appliquer un couplage de modèles de transfert radiatif pour transformer les images de réflectance au sol en variables biophysiques. Ainsi, l'estimation d'une variable telle que le taux de couverture du sol par la végétation à partir d'un modèle de transfert radiatif est généralisable. Le couplage du modèle de transfert radiatif des feuilles PROSPECT avec le modèle de transfert radiatif des couverts SAIL, qui est utilisé ici présente l'avantage de modéliser la végétation en prenant en considération l'ensemble des éléments de la surface terrestre (Baret *et al.*, 2007; Jacquemoud et Baret, 1990; Verhoef, 1984). En outre, il permet d'effectuer une inversion sur des images satellitaires pour estimer l'ensemble ou une partie des variables biophysiques servant à estimer les valeurs de réflectance en mode direct. Ainsi, ces modèles sont utilisés pour simuler la réflectance à partir de différents paramètres biophysiques des feuilles et de la structure des couverts. Leur inversion permet d'obtenir des variables biophysiques à partir des valeurs de réflectance. Cette inversion a été effectuée ici à l'aide d'un réseau de neurones (Lecot, 2008). L'étape suivante vise à constituer des séries temporelles de variables biophysiques continues et cohérentes. Pour cela, un masque a été appliqué sur les valeurs aberrantes liées notamment à la présence des ombres portées de nuages, avant d'estimer les valeurs manquantes par interpolation, et de lier les séries temporelles à l'aide de fonctions robustes (Lecot *et al.*, 2008).

Enfin, la dernière étape consiste à calculer des métriques temporelles à partir des séries temporelles de variables biophysiques précédemment obtenues, afin de mettre en évidence la phénologie des couverts végétaux. Par exemple, des métriques temporelles peuvent être calculées à partir des séries temporelles de fCOVER pour déterminer les dates auxquelles la végétation commence et termine sa croissance ou la date à laquelle l'activité photosynthétique atteint son maximum (Figure 2).

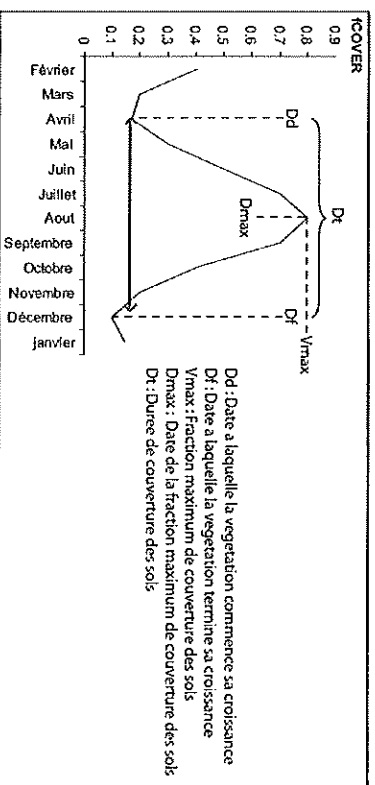


Figure 2. Représentation graphique des métriques temporelles annuelles calculées à partir des valeurs de fCOVER dérivées des images MODIS

L'ensemble de cette chaîne de prétraitements et traitements a été automatisée afin d'assurer la reproductibilité de l'approche méthodologique développée ici. La mise à jour, sur la zone d'étude, de la série temporelle de variables biophysiques s'effectue grâce au téléchargement quotidien des produits MODIS.

Les dynamiques de la végétation appréhendées à travers l'analyse de l'évolution de la fraction de couvert végétal dérivées des images MODIS

L'étude de la dynamique de la couverture végétale sur le Grand Ouest sur la période 2000-2011 est effectuée ici à travers l'analyse d'une des variables biophysiques calculées à partir des séries temporelles MODIS et des métriques temporelles qui en ont été dérivées. Le choix a porté sur le fCOVER, car cette variable biophysique permet d'appréhender de façon synthétique les différentes phases de croissance de la végétation à travers l'évolution du recouvrement du sol par celle-ci. Parmi les métriques temporelles calculées (Figure 2), nous nous sommes attachés à analyser plus particulièrement la date de fin de croissance de la végétation. L'analyse de l'évolution du fCOVER à l'échelle du Grand Ouest met en évidence de fortes variations au niveau de la présence du couvert végétal en hiver. Ainsi, le taux de couverture végétale est particulièrement élevé durant l'hiver 2006/2007 qui a été doux et pluvieux (Figure 3). En revanche, ce taux est très faible au cours des deux hivers suivants, à l'instar de la situation observée au cours de l'hiver 2003-2004. Ceci peut s'expliquer par le climat, par les pratiques agricoles, et par une conjonction des deux. Les agriculteurs peuvent ne pas avoir implanté d'intercultures ou dans le cas contraire, ils peuvent l'avoir implanté tardivement (ce peut être pour des raisons climatiques), ou encore les conditions climatiques de l'automne et du début de l'hiver ne sont pas favorables à la croissance de la végétation.

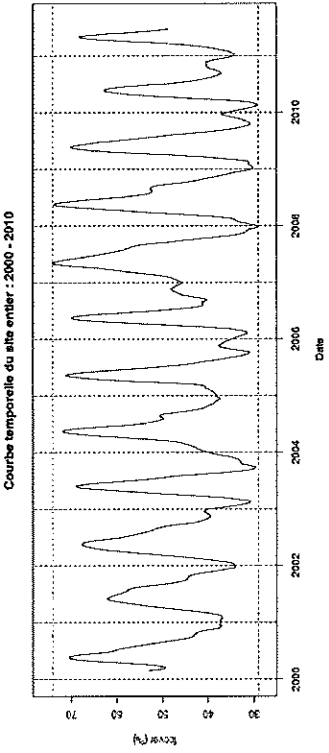


Figure 3. Evolution de la fraction de couverture végétale (fCOVER) sur l'ensemble du Grand-Ouest de mars 2000 à mars 2011.

L'analyse de la dynamique spatio-temporelle de l'évolution de la date de fin de croissance de la végétation vue par MODIS sur le Grand-Ouest de 2001 à 2010 montre un gradient relativement marqué entre la frange océanique nord-ouest, caractérisée par une date de fin de croissance prolongée (entre 300 et 350 jours), et les régions du sud-est pour lesquelles cette dernière varie de 250 à 300 jours (Figure 4). L'ouest de la Bretagne et la Basse-Normandie se distinguent ainsi nettement de l'est de la Bretagne (Bassin de Rennes), des Pays de la Loire et du Poitou-Charentes. Si ces deux ensembles se différencient d'un point de vue climatique, ils se distinguent également par des systèmes agricoles et des modes d'usage des sols spécifiques, ce qui explique en partie cette dichotomie : l'utilisation des sols de la frange nord-ouest (Bretagne occidentale et Basse Normandie) est effet dominée par les prairies, et le sud-est (Bassin de Rennes, Poitou-Charentes, Pays de la Loire) par les cultures céréalières.

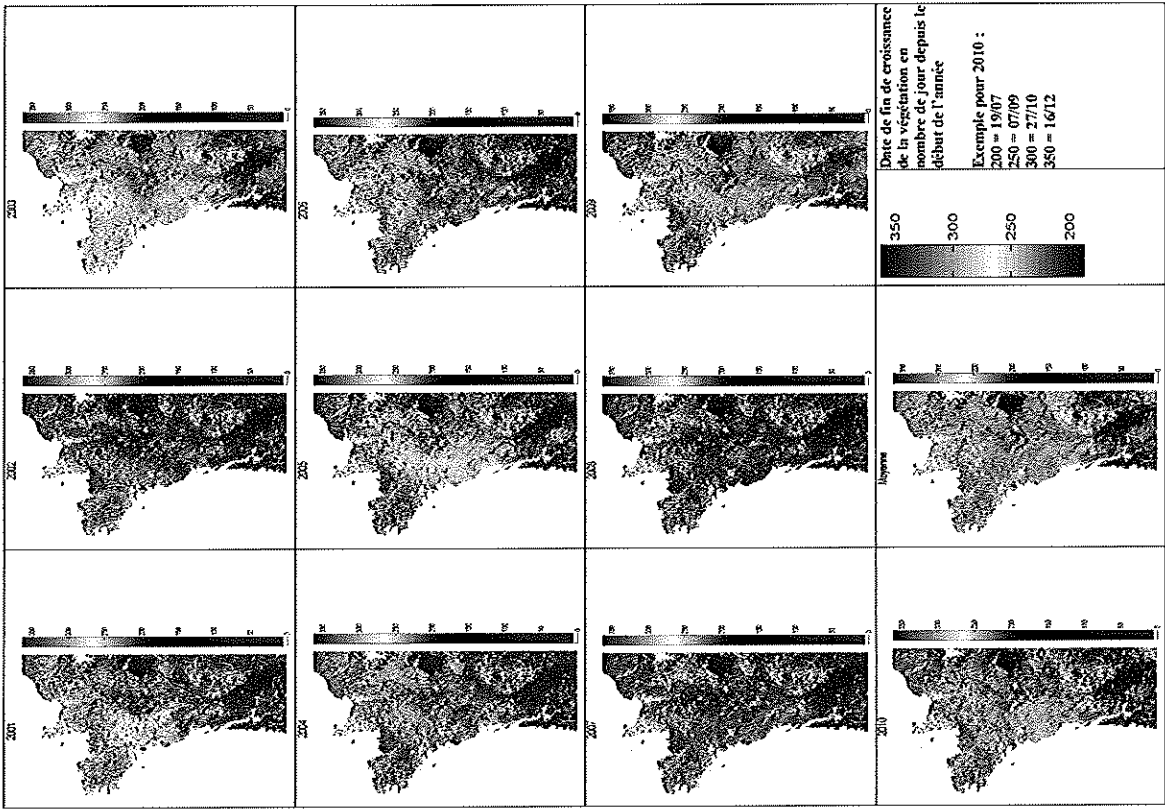


Figure 4. Date de fin de croissance de la végétation vue par MODIS sur le Grand-Ouest de 2001 à 2010

L'analyse de cette métrique met également en évidence l'impact de la variabilité climatique sur la couverture végétale. Ainsi, les années sèches de 2005, 2006 et 2010 ressortent bien à cette échelle car elles sont caractérisées par une sénescence relativement précoce de la végétation. En 2005, année marquée par une sécheresse estivale, la date de fin de croissance de la végétation était avancée au 250ème jour de l'année (début septembre), tandis que pour des années humides et relativement fraîches telles que 2007 et 2008, la date de fin de croissance n'est intervenue qu'après le mois d'octobre. On remarque aussi que les sécheresses s'observent par une fin d'activité chlorophyllienne précoce en Bretagne et Basse-Normandie pour l'année 2003, et sur les régions Poitou-Charentes, Pays de la Loire, et sur le bassin de Rannes pour les années 2005 et 2006.

Suivi des changements d'occupation des sols par télédétection à l'échelle des sites d'étude

Après avoir étudié les dynamiques de la couverture végétale à l'échelle du Grand-Ouest à partir des séries temporelles de fCOVER dérivées des images MODIS, nous avons cherché à les analyser à une échelle locale. Pour cela, deux sources de données ont été successivement utilisées : les séries temporelles de fCOVER dérivées des images MODIS calculées à l'échelle de chacun des sites d'étude retenus sur le Grand Ouest (Figure 1) et des séries temporelles de fCOVER dérivées des images satellitaires à haute résolution spatiale calculées sur deux des six sites. Ces séries temporelles de fCOVER ont été analysées en les confrontant à des cartographies d'occupation et d'utilisation des sols réalisées à l'échelle parcellaire sur les six sites sur une période de quelques années à partir de données satellitaires à haute et très haute résolution spatiale. Deux images par an en moyenne ont été traitées afin de produire différents indicateurs tels que le ratio prairies/cultures ou le taux de couverture hivernale des sols.

A partir des séries temporelles de fCOVER dérivées des images MODIS

Nous présentons ici les analyses effectuées sur les bassins versants du Yar et de la Vie et du Jaumay et sur l'AOC de Saumur-Angers.

Exemple du bassin-versant du Yar

Le bassin-versant du Yar, d'une superficie de 62 km², est localisé dans les Côtes d'Armor, sur le littoral nord de la Bretagne (Figure 5). Majoritairement agricole, il contribue au développement des algues vertes dans la baie de Plastin-les-Grèves en fournissant les nutriments nécessaires au développement de ces dernières. Ainsi, à partir de 1995, le Conseil Général des Côtes d'Armor a lancé un diagnostic sur les bassins versants de la Lize de Grève comprenant des études spécifiques sur le volet agricole. Parmi celles-ci, un inventaire annuel de l'occupation des sols est réalisé à l'échelle parcellaire depuis 1996-97 à partir d'images satellitaires à haute et très haute résolution spatiale (Corgne, 2004 ; Kallé et al., 2008). Sur ce bassin, orienté majoritairement vers l'élevage bovin, on observe une dominance de prairies temporaires et de cultures fourragères.

L'analyse de l'évolution du fCOVER calculé à partir des images MODIS sur le bassin-versant de mars 2000 à mars 2011, montre que le maximum de taux de couverture végétale est enregistré sur une période qui varie de mai à septembre (Figure 6). Les cartes d'occupation et d'utilisation des sols

réalisées à partir de données satellitaires plus précises, avec une résolution spatiale inférieure ou égale à 20 mètres, validées par des observations effectuées sur le terrain, montrent que cette période correspond à la croissance des céréales, le blé et le maïs arrivant respectivement à maturité à partir des mois de mai et de septembre. Par ailleurs, le bassin-versant comprend une part majoritaire de prairies au sein de sa Surface Agricole Utile (environ 65% en moyenne), ce qui explique que les taux minimum de couverture végétale observés apparaissent relativement élevés, la fraction minimum de couvert étant voisine de 40%. D'un façon générale, les précipitations régulières enregistrées sur ce bassin versant contribuent à maintenir l'activité chlorophyllienne des prairies sur toute l'année. Ainsi, sur l'ensemble de la série, on remarque bien l'impact du manque d'eau lors de l'été 2003. La forte baisse des taux de couverture végétale observée est due à l'absence d'irrigation du maïs. Les précipitations peu abondantes et la chaleur de l'été 2003 se sont manifestées par un stress hydrique et une forte baisse de l'activité chlorophyllienne des prairies.

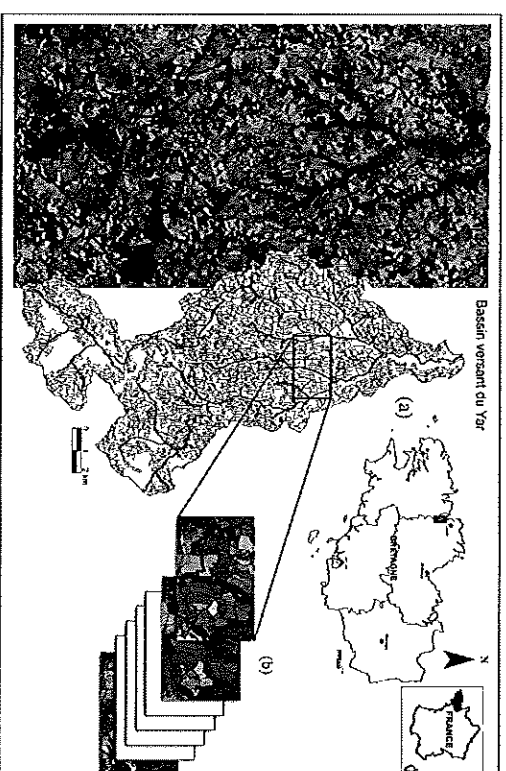


Figure 5. Localisation du site d'étude (a) et exemple d'une série d'images satellites à haute résolution spatiale acquise en 2010 sur la zone d'étude (b)

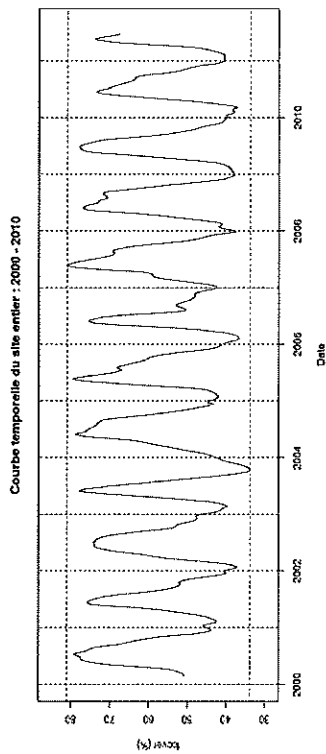


Figure 6. Evolution de la fraction de couverture végétale (COVER) sur le bassin-versant du Yar de mars 2000 à octobre 2011.

Exemple des bassins-versants de la Vie et du Jaumay

Le bassin-versant de la Vie et du Jaumay, localisé en Vendée au cœur de la façade atlantique, couvre 782 Km². Caractérisé par une forte diversité des milieux et des usages, ce bassin versant à dominante rurale est soumis à une urbanisation historique située sur la bande littorale (Saint-Gilles-Croix-de-Vie) et à proximité de l'agglomération Yonnaise, et plus récente sur les franges des marais. Les terres agricoles sont occupées à plus de 40% par les céréales (maïs compris), le reste étant couvert par des prairies, permanentes ou temporaires. Face à une dégradation de la ressource en eau liée à l'irrigation (principalement pour le maïs) et à l'apport d'engrais et de pesticides, le SAGE du bassin versant de la Vie et du Jaumay, adopté par la Commission Locale de l'Eau fin 2009, vise entre autres à permettre une meilleure gestion qualitative et quantitative de l'eau couplée à la préservation et à la gestion des milieux aquatiques. Parmi les différentes actions définies par le SAGE, deux études ont été effectuées sur la cartographie des changements d'occupation des sols et l'analyse du climat (Herrault et Corgne, 2010 ; Etienne *et al.*, 2010). Sur ce bassin versant, la variabilité climatique a une influence beaucoup plus marquée sur les variations inter et intra-annuelles de la couverture végétale que sur les sites bretons (Figure 7). Ainsi, les étés secs se distinguent nettement des étés bien arrosés, les taux de couverture végétale étant inférieurs à 30% pour les étés secs (2003, 2005, 2009, 2010) et supérieurs à 30% pour les étés où des précipitations suffisamment abondantes ont limité l'impact du stress hydrique sur la croissance de la végétation. L'évolution de la couverture végétale durant l'hiver 2006/2007 (doux et pluvieux) se distingue nettement des autres hivers, avec un fort taux de couverture végétale, à l'instar de ce qui a été observé à l'échelle du Grand Ouest, tandis que le taux de couverture végétale était moins élevé sur le bassin-versant du Yar, en raison de la diminution de l'implantation d'intercultures sur ce dernier est hiver-là.

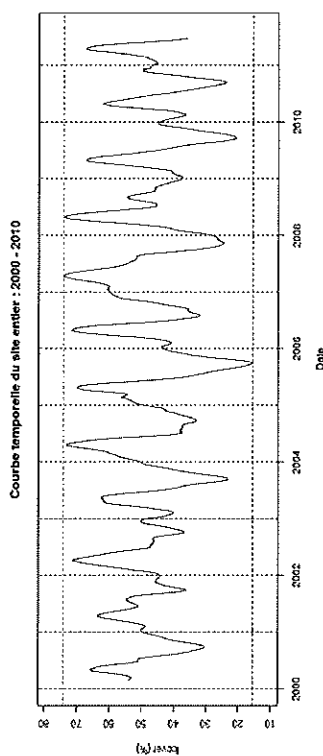


Figure 7. Evolution de la fraction de couverture végétale (COVER) sur le bassin-versant Vie-Jaumay de mars 2000 à mars 2011

Exemple de l'AOC de Saumur-Angers

L'AOC de Saumur-Angers qui est située dans le Maine-et-Loire, entre Saumur et Montsoreau, fait partie du vignoble de la vallée de la Loire. Le vignoble de l'AOC de Saumur-Angers couvre 33 840 hectares. Ce site, qui est monocultural, est particulièrement intéressant à étudier car les changements observés sur les variables biophysiques sont étroitement liés aux variations des températures et des précipitations. Les figures 8 et 9, qui présentent l'évolution estivale et annuelle du fCOVER sur la période 2000-2010 permettent ainsi d'identifier les hivers 2000-2001 et 2006-2007 (particulièrement doux et pluvieux) qui contribuent à augmenter l'activité chlorophyllienne et les taux de couverture végétale. La canicule de l'été 2003 est caractérisée par une faible activité photosynthétique bien visible également. En 2005, année la plus sèche enregistrée entre 2000 et 2010, l'automne est caractérisé par un manque d'eau et on observe une forte diminution de la couverture végétale, potentiellement en lien avec un stress hydrique important qui impacte directement l'activité chlorophyllienne. Enfin, pour l'hiver 2005/2006, plus froid que la normale avec des températures particulièrement basses dès le mois de novembre, on observe une très faible activité chlorophyllienne et un faible taux de couverture des sols de l'automne 2005 à la fin de l'hiver 2005/2006.

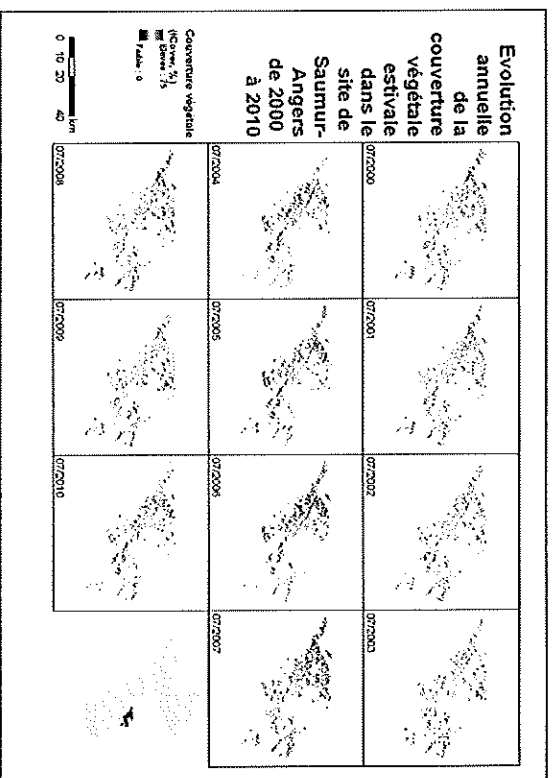


Figure 8. Carte géographique de l'évolution estivale de la couverture végétale de 2000 à 2010, sur le site de Saumur-Angers

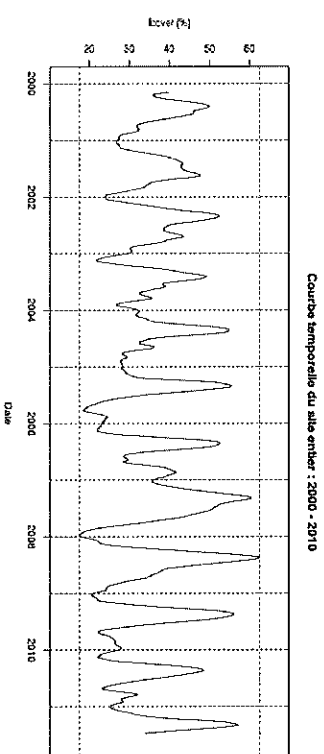


Figure 9. Evolution de la fraction de couverture végétale (FCOVER) sur le site de Saumur-Angers de mars 2000 à mars 2011

Les dynamiques de la végétation appréhendées à partir des séries temporelles de FCOVER et de LAI dérivées d'images à haute résolution spatiale

Les prairies sont très sensibles au changement climatique en général et aux aléas climatiques en particulier (Vigneau-Lousteau et Huyghe, 2008). La croissance de la prairie débute lorsque les

températures moyennes sont positives et supérieures à 5-6°C, c'est-à-dire au printemps et se termine lorsque ces conditions de température et les conditions de teneur en eau minimale du sol ne sont plus satisfaites. Au cours de cette période de croissance, les prairies peuvent être exploitées différemment, soit par pâturage, par fauche (précoce pour l'ensilage ou l'ensilage, tardif pour la production de foin) ou par exploitation mixte, ici avec une association de pâturage et de fauche, celle-ci étant parfois une variable d'ajustement lorsque la végétation se développe trop rapidement par rapport aux besoins en pâturage des troupeaux. L'intensité d'exploitation (durée du pâturage, nombre de fauches dans l'année) varie selon l'objectif souhaité par l'agriculteur par rapport à la parcelle en question, le climat, les besoins en herbe, le type de prairie et l'état de surface de la prairie. La gestion spatio-temporelle des prairies représente donc un indicateur bioclimatique intéressant à étudier.

La dynamique infra-annuelle du couvert végétal a été estimée en 2010 sur le bassin-versant du Yar avec une série d'images satellitaires à haute résolution spatiale afin de déterminer le mode de gestion des prairies (le pâturage, la fauche et l'exploitation mixte combinant le pâturage et la fauche), et leur lien entre ces modes de gestion et le climat. Pour cela, plusieurs variables biophysiques ont été calculées pour chaque parcelle en prairie sur l'ensemble du bassin versant à partir de cinq images SPOT en appliquant le couplage des modèles PROSPECT et SAIL, utilisés précédemment pour produire les séries temporelles de variables biophysiques à partir des images MODIS (Dussaux *et al.*, 2011). La calibration et la validation du traitement des images ont été effectuées à partir d'observations directes et d'enquêtes réalisées sur le terrain. Deux variables sont présentées ici, le LAI et le FCOVER.

L'analyse des profils temporels du LAI et du FCOVER permet de distinguer les trois modes de gestion étudiés (Figure 10) : Concernant les prairies pâturées (Figure 10a), les variables montrent une croissance, puis une décroissance régulière autour du mois de juin, avec un léger pic de croissance (LAI) ou un plateau (FCOVER). Cette évolution peut être mise en relation avec les modalités de pâturage. La mise en pâture débute progressivement entre mars et avril. Les animaux sont déplacés régulièrement au sein du paddock au cours de la saison pour permettre à la prairie de repousser pour un nouveau passage le mois suivant. Durant la saison estivale, la croissance de la prairie diminue, ceci étant lié aux conditions climatiques moins favorables. Concernant les prairies fauchées, le profil varie selon le nombre de fauches effectuées dans l'année. Selon les exploitants, le nombre de fauches peut être différent. Pour certains, deux fauches sont réalisées au cours de l'année, tandis que pour d'autres, et selon les conditions climatiques, quatre fauches peuvent être réalisées. Dans le cas étudié (Figure 10b), le nombre d'images satellitaires acquises au cours de la saison limite l'étude du nombre de fauches observables au cours de la période. Un pic de croissance peut être observé début juin, suivi d'une forte baisse des deux variables, ce qui suggère le processus suivant : une fauche mi-juin, suivie d'une nouvelle croissance, puis d'une nouvelle fauche en septembre. Le fort déficit de précipitation enregistré en 2010 a entraîné une faible repousse de l'herbe après la fauche du mois de juin, ce qui explique que les agriculteurs n'ont pas fauché avant le mois de septembre. Enfin, les parcelles de prairies à exploitation mixte montrent une forte croissance entre mars et juin (Figure 10c). Le pic de croissance est atteint en juin. Ensuite, on observe une décroissance plus élevée que dans le cas d'une prairie seulement pâturée ou seulement fauchée. À partir du mois de juillet, la croissance des prairies à exploitation mixte reprend, mais de façon modérée.

- Abdel Latif A., Leefer R., Mercier G., Hubert-Moy L., 2008. Low Resolution Time Series Analysis With Erroneous Data. *IEEE Trans. On Geosciences and Remote Sensing*, 46, 7, pp. 2083-2096.
- Ackerman S., Strabala K., Menzel P., Frey R., Moeller C., Gumley L., Baum B., Wezel Seeman S., Zhang H., 2002. *Discriminating clear-sky from cloud with MODIS Algorithm theoretical basis document (MOD35)*. Doc. ATBD-MOD-06, 112 p.
- Baret F., Hagolle O., Geiger B., Bicheron P., Miras B., Hue M., Berthelot B., Nito F., Weiss M., Samain O., Roujean J.L., M. Leroy, 2007. LAI, FAPAR and fCOVER CYCLOPES global products derived from VEGETATION. Part 1: principles of the algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 110, 3, pp. 275-286.
- Corgne S., 2004. Hiérarchisation des facteurs structurant les dynamiques pluriannuelles des sols nus hivernaux Application au bassin versant du Yar (Bretagne). *Norix*, 193, pp.17-29.
- Dussaux P., Hubert-Moy L., Leefer R., Corpeti T., Gong X., 2011. Identification of grazed and mown grasslands using a time-series of high-spatial-resolution remote sensing images. *Multitemp 2011, 6th International Workshop on the Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images*, Trento, Italy, 12-14 July 2011, pp. 145-148.
- Etienne L., Corgne S., Planchon O., 2010. *Analyse climatique en Vendée. Application au SAGE de la Vie et du Janney*. Rapport d'étude, COSTEL UMR CNRS 6554 LETG, Université Rennes 2, 70 p.
- Fischer G., Shah M., Tubiello F.N., van Velhuizen H., 2005. Socio-economic and climate change impacts on agriculture: an integrated assessment, 1990-2080. *Phil. Trans. Royal. Soc. B*, 360, 2067-2073, doi:10.1098/rstb.2005.1744.
- Herrault P.A., Corgne S., 2010. *Analyse de l'occupation du sol et du réseau bocager sur le bassin de la Vie, du Janney et du Ligneron à partir de données de télédétection*. Rapport d'étude, COSTEL UMR CNRS 6554 LETG, Université Rennes 2, 14 p.
- Houet T., Hubert-Moy L., Marchand J.P., Corgne S., 2008. Approche systématique du fonctionnement d'un territoire agricole bocager. *Espace géographique*, 3/08, 3, pp. 270-286.
- Jacquemoud S., Baret F., 1990. PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment*, 34, 2, pp. 75-91.
- Kallel A., Le Hégarat-Masle S., Hubert-Moy L., Ottle C., 2008. Fusion of vegetation indices using continuous belief functions and cautious-adaptive combination rule. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 46, 5, 1499-1513.
- Leefer R., 2008. *Suivi des changements d'occupation et d'utilisation des sols d'origine anthropique et climatique à l'échelle régionale par télédétection moyenne résolution (Application à la Bretagne)*. Thèse de Géographie, Université Rennes 2, 326 p.
- Leefer R., Hubert-Moy L., Corpeti T., Baret F., Latif B. A., Nicolas H., 2008. Estimating Biophysical Variables at 250 M with Reconstructed EOS/MODIS Time Series to Monitor Fragmented Landscapes. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2008, IEEE International*, Boston, MA, États-Unis d'Amérique, II-954-II-957.
- Lobell D.B., Field C.B., Cahill K.N., Bonfilis C., 2006. Impacts of future climate change on California perennial crop yields: Model projections with climate and crop uncertainties. *Agricultural and Forest Meteorology*, 141, pp. 208-18.
- Lobell D.B., Field C.B., 2007. Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming. IOP Publishing Ltd, *Environmental Research Letters*, 2, 1, 7 p.

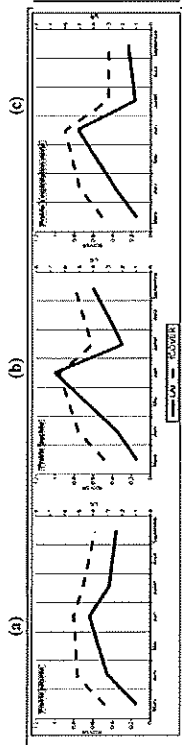


Figure 10. Discrimination des trois modes de gestion des prairies sur le bassin versant du Yar selon les profils moyens de LAI et fCOVER calculés sur toutes les prairies du bassin versant pour l'année 2010

D'après l'analyse des profils temporels des variables biophysiques dérivées des images de télédétection, l'activité agricole sur les prairies en Bretagne commence mi-mars et s'achève en octobre, ce qui est confirmé par les enquêtes réalisées auprès des agriculteurs. Cependant, la période de croissance et donc d'exploitation des prairies devrait être allongée avec le changement climatique et l'augmentation des températures. En effet, la période d'exploitation pourrait débuter plus tôt dans l'année et se terminer plus tardivement en fin d'année, permettant ainsi une multiplication des activités agricoles opérées sur les parcelles. En outre, l'augmentation des températures ainsi que la baisse de la pluviométrie engendrerait des effets négatifs sur la croissance de la végétation au cours de la période estivale. Ceci se traduirait par une baisse, voire une absence de croissance de la végétation à cette période de l'année et entraînerait donc un déficit de production en herbe pour les troupeaux. Ainsi, le changement climatique pourrait entraîner une augmentation de la productivité des prairies au printemps et un déficit de croissance en été.

L'utilisation de la télédétection et des images à haute résolution spatiale nous permet d'appréhender les différentes dynamiques de couvert prairial en fonction de leur mode de gestion à l'échelle parcellaire. Le changement climatique peut entraîner une modification de l'importance relative des trois modes de gestion identifiés, puisque la sensibilité de la croissance des prairies au climat au cours de l'année diffère selon ces modes. En comparant les informations spatialisées sur la gestion des prairies avec des données climatiques, il devient alors possible d'estimer les productions en herbe et de prévoir les déficits pouvant être encourus selon le climat.

Conclusion

L'étude des changements d'occupation et d'utilisation des sols par télédétection sur le Grand Ouest dans le cadre du programme Climaster a permis de mettre en évidence des dynamiques inter et intra-annuelles de la végétation à l'échelle régionale sur le Grand-ouest et à l'échelle locale sur six sites tests. Ces dynamiques ont été appréhendées à travers l'analyse des profils temporels de la fraction de végétation couvrant le sol et des cartes montrant l'évolution de la date de fin de croissance de la végétation. A l'échelle du Grand Ouest, les résultats montrent clairement l'impact de la variabilité climatique sur les changements d'occupation des sols. A l'échelle locale, en plus de la variabilité climatique, d'autres facteurs tels que les politiques environnementales, le changement de système d'exploitation agricole ou le contexte économique, seront à prendre en compte pour expliquer des changements d'occupation et d'utilisation des sols. L'application de l'approche développée ici sur de plus longues séries temporelles permettrait d'étudier les relations entre les changements d'occupation des sols et le climat en termes de changements climatiques, et non plus seulement en termes de variabilité climatique.

Therail C., Baudry J., 2001. *Modélisation des systèmes techniques agricoles contribuant aux dynamiques des structures paysagères: de la parcelle à l'exploitation agricole et au paysage*.

Hubert-Moy L., éd., Etude des changements d'utilisation et d'occupation du sol par télédétection: échelles et modèles, Séminaire de l'UMR Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique, décembre 2001, 16-24.

Vannier C., Hubert-Moy L., Nabucet J., 2011. Analyse spatiale de la dynamique de l'occupation du sol aux échelles de la parcelle et de l'ilot parcellaire : Application en paysage agricole bocager. *Revue Internationale de Géomatique*, Eds inv. Corgne et Quetol, Vol. 21 - n° 3/2011, pp. 359-380.

Vigneau-Lousteau L., Huyghe C., 2008. *Stratégies Fourragères*, Editions France Agricole, Paris, 336p.

Verhoef W., 1984. Light scattering by leaf layers with applications to canopy reflectance modelling: The SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 16, 2, pp. 125-141.

Vermote E. F., El Saleous N. Z., C. O. Justice, 2002. Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: first results. *Remote Sensing of Environment*, 83, 1-2, pp. 97-111.

Glossaire

AOC : Appellation d'Origine Contrôlée.

MODIS : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. Capteurs spatiaux de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) lancés en 1999 et 2002, ils sont caractérisés par 36 bandes spectrales 36, et une résolution temporelle (répétitivité) de 1 à 2 jours. Les images sont composées de pixels d'une taille variant entre 250mX250m et 1000mX1000m.

Résolution spatiale : La résolution spatiale d'un capteur désigne la taille minimum des objets pouvant être distingués et mesurés au sol. Elle correspond au produit de la résolution angulaire par la distance entre le capteur et la surface terrestre. Toutefois, dans la majeure partie des études de télédétection, la résolution spatiale fait référence au pas d'échantillonnage ou taille d'un pixel d'une image.

Résolution temporelle : La résolution temporelle (ou répétitivité) désigne la fréquence avec laquelle un capteur acquiert une image sur un même site d'étude à l'issue d'un cycle orbital complet.

fCOVER : Variable biophysique décrivant la fraction de couverture des sols couverte par de la végétation verte par unité de surface.

Luminance : Intensité du flux radiatif émis ou réfléchi par une portion de la surface de la Terre, tel qu'elle est mesurée par un capteur, qui se mesure en W.m⁻².sr⁻¹.m⁻¹ (watt par mètre carré par stéradian et par mètre).

Reflectance : Rapport entre le flux l'énergie réfléchi et le flux d'énergie incidente. La réflectance s'exprime généralement en pourcentage. La réflectance bidirectionnelle met en relation la réflexion par la surface d'une cible (ou portion de la surface terrestre) avec la réflexion par une surface lambertienne qui serait observée à l'emplacement de la cible.

Variable biophysique : Variable qui caractérise la couverture végétale de surface en termes d'état et de fonctionnement.

Adaptation stratégique ou tactique : l'évolution climatique dans les élevages laitiers du Grand Ouest

Grundy Van Tilbergh, V., Vertes, F., Léon, A.S., Aussens, E. et Thénail, C.

Version 31 octobre 2011

Introduction

Les éleveurs laitiers du Grand Ouest (GO) perçoivent-ils et intègrent-ils dans la gestion de leur exploitation, les évolutions climatiques¹ telles que les climatologues les décrivent ? Pour répondre à cette question, nous avons centré nos recherches sur les élevages laitiers, en raison de leur importance dans le GO en termes de nombre de professionnels et de surfaces gérées. De plus ces élevages, par leurs besoins en fourrage, sont plus que d'autres sensibles aux caractéristiques des sols et aux évolutions climatiques. Grossièrement, l'évolution climatique se traduit dans le GO par une augmentation des températures moyennes annuelles et une diminution de la pluviométrie estivale, mais de façon variable selon les zones climatiques qui le compose. On peut donc attendre une variété de réponse des éleveurs. La finalité de cette étude, avec les autres volets de Climaster, est d'identifier des pistes de méthodes (indicateurs, scénarios...) i) pour accompagner les éleveurs laitiers du GO dans leur adaptation aux évolutions climatiques, ii) pour en évaluer les conséquences sur l'utilisation des terres et l'environnement aux échelles de territoires locaux.

Trois grands types d'approche des évolutions liées au climat ont balisé notre recherche. La première approche s'appuie sur l'étude des modes d'adaptation (effectives, ou possibles) des éleveurs, au niveau de leurs systèmes fourragers à base de maïs irrigué (peu représentés dans le GO sauf en Poitou-Charente), et plus largement au niveau de leurs différentes pratiques jusqu'à leur système d'exploitation (Andrieu *et al.*, 2008 ; Felten *et al.*, 2010). La seconde approche aborde les réponses des éleveurs face aux sécheresses intenses rencontrées certaines années au cours de la dernière décennie (Lemaire et Pflimlin, 2007). La troisième approche teste par expérimentation et/ou modélisation la résistance et la productivité de différents systèmes de cultures et prairies vis-à-vis d'évolutions climatiques (Amigues *et al.*, 2006 ; Lemaire et Pflimlin, 2007 ; Brisson, 2010 ; Moreau *et al.*, 2010).

La particularité de l'approche développée dans la cadre de la recherche « Climaster » est d'étudier le lien entre les pratiques agricoles et l'évolution climatique en fondant l'analyse sur le point de vue des agriculteurs, dans une grande région, le GO, encore peu investiguée de ce point de vue. Trois types d'interrogations structurent plus particulièrement notre réflexion : les agriculteurs du GO ont-ils déjà perçu une évolution climatique ? L'ont-ils intégrée au pilotage de leur système d'exploitation et selon quelles modalités ?

¹ Dans cet article, nous utiliserons i) le terme d' « évolution climatique » lorsqu'il ne s'agira en rien de préjuger de l'explication de la transformation des climats, ii) le terme de « changement climatique », lorsque nous mentionnerons les théories auxquelles les agriculteurs font référence pour expliquer les évolutions climatiques (chapitre 2.2.).

1^{ère} partie. Quelle démarche pour comprendre les interactions entre évolutions du climat et des élevages ?

Dans un premier temps, ce sont les conséquences de l'évolution climatique sur les pratiques agricoles et les modes d'organisation des élevages qui seront analysées, permettant de délimiter le champ des possibles investigués par les éleveurs. Dans une deuxième étape les réflexions porteront sur les voies suivies par les éleveurs pour développer une adaptation aux évolutions climatiques selon diverses modalités. Dans une troisième

Les types de pratiques et de systèmes techniques analysés

Nous avons choisi d'orienter notre travail sur les itinéraires techniques du blé et du maïs, les systèmes fourragers, ainsi que certaines dimensions de la gestion territoriale de l'exploitation. Ce choix répond à l'objectif suivant : cibler des pratiques qui soient i) communes à tous les exploitants, importantes pour l'élaboration des productions en exploitations laitières et pour leur fonctionnement, ii) potentiellement « aux avant-postes » des réponses des agriculteurs aux évolutions climatiques, et iii) dont les évolutions peuvent avoir des conséquences significatives sur l'utilisation des terres et les ressources naturelles, étudiées dans d'autres volets du projet Climaster.

On désigne par **itinéraire technique (ITK)** la combinaison logique et ordonnée dans le temps des opérations techniques (labour, semis, etc.) pour conduire une culture en vue d'obtenir une production (Doré et Meynard, 2006). Les cultures de maïs fourrage (affouragement du troupeau) et de blé d'hiver (litière, complément alimentaire, vente de grain) sont communes dans les élevages laitiers du Grand Ouest. Nous avons fait l'hypothèse que les réponses des agriculteurs pouvaient être particulièrement significatives sur ces pratiques. En effet, l'augmentation générale des températures provoque une avancée des stades phénologiques des deux espèces. Cela aurait pu amener les agriculteurs à avancer les dates de semis pour éviter le stress hydrique d'été par exemple ou les conduire à faire des choix de variétés de précocité différente (Amigues *et al.*, 2006). Le développement de maladies, ravageurs et/ou adventices avec la température aurait pu influencer le choix des traitements phytosanitaires (Amigues *et al.*, 2006). De telles évolutions sont susceptibles de modifier l'utilisation de ressources comme l'eau (ex : irrigation), ou les couvertures végétales du sol aux échelles locales (couverture hivernale des sols, etc.) si elles sont largement mises en œuvre.

Le **système fourrage** est l'ensemble organisé des moyens de productions (surfaces, espèces, variétés...), des processus décisionnels et des actes techniques destinés à produire des ressources végétales pour l'alimentation des herbivores (Moreau *et al.*, 2009). Les éleveurs auraient pu faire évoluer leurs cultures fourragères, avec l'introduction de cultures plus résistantes à la sécheresse que le maïs comme la luzerne et le sorgho, et/ou de Mélanges Céréales Protéagineux Immatures (MCPPI) à ensiler tôt en saison. ii) la modification de la composition en espèces des prairies (Lemaire et Pflimlin, 2007). La sécurisation du système fourrage est une préoccupation partagée par tous les éleveurs en cohérence avec leurs objectifs de production laitière. Quels que soient les couverts végétaux choisis, on pouvait imaginer une évolution des moyens de sécurisation, par exemple via l'accroissement des stocks fourragers, ce qui suppose de raisonner également sur les modes, capacités de stockage et quantités à stocker (Andrieu *et al.*, 2008).

La **gestion territoriale d'une exploitation agricole** est l'organisation dans l'espace des systèmes techniques de gestion du territoire de l'exploitation agricole, concernant l'utilisation, l'entretien des terres ou bien encore les aménagements parcelaires (agrandissement d'îlots, plantation ou maintien de haies, etc.) (Martin *et al.*, 2006). Cette distribution des systèmes techniques est raisonnée en fonction de la diversité relative des types de terrain (plus ou moins en pente, sableux, mouillant, etc.), des surfaces et formes des parcelles, de leur dispersion et accessibilité relativement aux bâtiments, etc. En réponse à une évolution climatique, les agriculteurs auraient pu faire évoluer l'organisation spatiale de la conduite des cultures, voire des modes d'utilisation des terres, si des terres sèches devenaient trop limitantes par exemple. De nouveaux raisonnements d'aménagement auraient pu apparaître pour l'irrigation, ou la protection par des haies des animaux en pâture, par exemple. A des échelles locales, ces changements auraient pu entraîner des modifications significatives de l'utilisation des terres par exemple entre les zones de fond de vallée, les pentes et les plateaux.

Adaptation des éleveurs

La notion d'adaptation, peu évidente à définir, se conçoit par rapport à un environnement (Godard, 2010). L'environnement biophysique comme l'environnement socio-économique et technique au sein duquel exerce un agriculteur ne lui préexiste pas. C'est l'agriculteur qui le construit, lui donne forme, à travers son action et en lui affectant un ensemble de significations. De plus, l'environnement de l'exploitation n'est pas neutre dans cette opération. Par exemple, le milieu physique réagit à une nouvelle culture, tout comme une nouvelle technique transforme le système d'exploitation. Ainsi, l'adaptation désigne un système d'interactions entre un exploitant et l'environnement qu'il a construit, ce système résultant de l'action de l'exploitant. O. Godard oppose deux types d'adaptation : l'adaptation anticipative, pour devancer les modifications du climat et ses conséquences sur les systèmes d'exploitation, et l'adaptation réactive, se mettant en place après des événements climatiques particuliers (Godard, 2010).

Cette opposition rejoint celle proposée par M. de Certeau à propos des manières de faire, de mener des actions (de Certeau, 1980). Il a identifié, d'un côté, des **actions stratégiques** reposant sur le calcul des rapports de force qui devient possible à partir du moment où un sujet (qui peut être une organisation comme une entreprise) est doté d'une capacité d'action propre, corollaire à l'existence d'un lieu d'exercice du pouvoir. C'est de ce lieu que sont gérées les relations avec les « cibles » (par exemple les clients). D'un autre côté, l'auteur distingue des **actions tactiques** qui jouent avec le terrain qui leur est imposé, elles sont « mouvement dans l'espace contrôlé par l'ennemi ». Elles font du coup par coup pour saisir au vol les opportunités conjoncturelles. Ces deux types d'actions ne traduisent pas le même rapport au temps. L'action stratégique se conçoit dans une indépendance par rapport à la variabilité des circonstances, c'est ainsi qu'elle permet une anticipation de l'action ; l'action tactique est soumise aux aléas des conjonctures particulières. Ainsi, pour adapter le système de production à son environnement l'éleveur fait des choix, contraints par ces deux modes d'action, en fonction d'un certain nombre de facteurs qu'il reste à déterminer.

Interroger les éleveurs laitiers du Grand Ouest

Trois zones d'étude principales, **représentent les contrastes climatiques les plus caractéristiques du GO**, ont été choisies avec l'appui des climatologues. Il s'agit du Centre

Ouest Bretagne (COB, Côtes d'Armor), caractérisé par un climat humide et peu d'amplitude thermique, du Haut Anjou (Maine et Loire) caractérisé par de fortes amplitudes thermiques liées à des étés chauds, et du Perche (Orne) caractérisé par de fortes amplitudes thermiques liées à des hivers froids. De plus, ces trois zones abritent des bassins de production laitière, donc potentiellement une grande diversité d'exploitations laitières. Nous nous sommes appuyés notamment sur les réseaux de conseil laiter pour rencontrer une diversité de situations d'agriculteurs, en termes de part de l'élevage laiter dans la production, d'âge des éleveurs et de structures d'exploitation (y compris des territoires des exploitations). L'objectif de ce dispositif était double :

- repérer, à travers la diversité des exploitations agricoles étudiées, une diversité de formes de raisonnement des agriculteurs pour modéliser la décision en élevage.
- évaluer, via le choix de zones climatiques contrastées, la dimension déterminante du facteur climatique dans le raisonnement des éleveurs.

Pour étayer cette approche, nous avons également étudié cinq élevages de la Vienne (représentatifs des systèmes de production du Département) en Région Poitou-Charentes. La Vienne est une région sensible aux pénuries d'eau. Les surfaces en maïs de la région, ce qui contraste avec les trois autres régions étudiées. Les informations recueillies auprès des agriculteurs de la Vienne ont été analysées indépendamment de celles recueillies dans les zones climatiques plus au nord et sont utilisées en contrepoint dans la discussion.

Comme le montre le tableau suivant, le travail de terrain s'est déroulé en deux grandes étapes correspondant aux deux méthodes d'enquêtes mises en œuvre pour collecter des données agronomiques puis sociologiques (tableau 1).

Tableau 1 : Les enquêtes de terrain

	1. Enquête agronomique (2010)	2. Enquête sociologique (2011)
Effectif	56 exploitations agricoles (EA)	Retour dans 24 EA
Objectifs	Connaitre les changements dans les pratiques agricoles depuis 10 ans et les raisonnements des éleveurs	Connaitre la façon dont les éleveurs perçoivent et intègrent la variabilité climatique à leur système de production
Méthode	Entretiens dirigés, questions sur des données pour la plupart techniques	Entretiens compréhensifs, collectes des représentations des éleveurs
Thèmes abordés	- Description de la structure des EA - Les systèmes fourragers pour 33	La trajectoire de l'éleveur, le pilotage du système de production, les

² En 2010, « le maïs occupe les deux-tiers des 148000 ha de la surface irriguée totale » en Poitou-Charente » (résultats du recensement agricole de 2010, Agreste Poitou-Charente n°20, septembre 2011).

³ Dans plusieurs grandes études récentes sur les évolutions climatiques, cette région est d'ailleurs plutôt référencée dans le « Sud-Ouest » ou « Grand Sud-Ouest », avec l'Aquitaine et Midi-Pyrénées (Amigues, J.P., Debatte, P., Tier, B., Lemaire, G., Seguin, F., Tardieu, F., Thomas, A., 2006. Sécheresse et agriculture: réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective. Synthèse du rapport d'expertise réalisé par l'INRA à la demande du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche. INRA, Paris, p. 72. Brisson, N. (ed), 2010. Présentation des méthodes et résultats du projet Climator INRA, Arvalis, Versailles.).

	éleveurs (Aussems, 2010) - Les itinéraires techniques et la gestion territoriale pour 28 éleveurs (Léon, 2010)	changements depuis + de 10 ans, la perception du climat et de son évolution, la gestion de la sécheresse
--	---	--

De plus, des entretiens ont été menés (par téléphone ou en face à face) auprès de techniciens de coopératives conseillers en cultures, ou de responsables de Coopératives d'Utilisation du Matériel Agricole (CUMA) pour chaque département. En effet, les entretiens reposant beaucoup sur la mémoire (les changements à l'échelle de plus de 10 ans), il est apparu nécessaire de pouvoir renforcer l'objectivation des données en croisant les points de vue.

Parmi les 56 exploitations agricoles étudiées, 18 exploitations sont de COB, 20 de Haut-Anjou et 18 du Perche. La caractérisation de l'orientation des productions par la typologie des OTEX⁴, montre une prédominance d'exploitations de type « élevage laitier spécialisé » (otex 41 ; très majoritaire en COB) et « élevage bovin lait-viande » (otex 43). Trois autres types sont présents, qui signalent une diversification de la production avec d'autres élevages d'herbivores (otex 71 « polyélevage à orientation herbivores ») de granivores (otex 72 « polyélevage à orientation granivores ») ou des cultures de vente (otex 81 « grandes cultures et herbivores »). En termes de structure de la main-d'œuvre : c'est dans le Haut-Anjou (où les exploitations étudiées étaient le plus souvent en statut individuel) que la main-d'œuvre est la moins nombreuse (1,7 Unité Travail Annuel – UTA, en moyenne), et en COB (où 68% des exploitations étudiées étaient en statut de société) que la main-d'œuvre est la plus nombreuse (2,5 UTA en moyenne). C'est dans le Perche que l'on trouve la Surface Agricole Utile (SAU) moyenne la plus forte (137 ha) et en Haut Anjou la SAU moyenne la plus faible (83 ha) mais avec à chaque fois une variabilité importante (plus ou moins 55 ha assez forte avec souvent deux grands sites de localisation, et des îlots⁵ de 7 à 9,5 ha en moyenne. En termes d'assolement (en moyenne), les exploitations étudiées du Perche se distinguent par une moindre proportion de Surface Fourragère Principale (62% de la SAU est en SFP) mais une part de prairies permanentes plus importante qu'ailleurs (53 % de la SFP). Les Prairies Temporaires dominent en COB (SFP = 71% SAU, PT = 56% SFP) et le Haut Anjou est intermédiaire (SFP = 67% SAU, PT = 53 % SFP). Enfin les céréales et le maïs (ensilage et grain) représentent plus de 50% de la SAU en Haut-Anjou et dans le Perche, et 46 % en COB, où les prairies prédominent. Les terrains des exploitations agricoles sont plutôt vallonnés en COB et dans le Perche. Les textures des sols sont variées dans les exploitations, l'hétérogénéité la plus forte étant rencontrée dans les exploitations du Perche ; on trouve une dominante limoneuse en Haut-Anjou, et un partage des terres entre dominante sableuse et dominante limoneuse pour les exploitations en COB.

2^{ème} partie. Les éleveurs du Grand Ouest et l'évolution climatique

⁴ Orientation Technico-économique des Exploitations (OTEX) selon le poids économique des différentes productions dans l'exploitation. Les OTEX sont établies en références à des critères régionaux, et selon des règles de construction typologique européenne (<http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/definitions/otex-mbs/>)

⁵ Un îlot est une pièce de terre d'un seul tenant, qui peut être constitué de une ou plusieurs parcelle(s) d'usage.

2.1. Place du climat dans les raisonnements d'évolution des pratiques agricoles

Le tableau 2 synthétise les changements d'itinéraires techniques en blé et maïs réalisés par les 28 agriculteurs interrogés sur ce thème, et les raisons qu'ils expriment pour ces changements. Les critères de raisonnement sont ensuite regroupés par grands ensembles C'est la raison principale donnée par l'éleveur qui est comptée ; si un éleveur donne deux raisons principales, son exploitation est comptée deux fois avec une pondération de moitié.

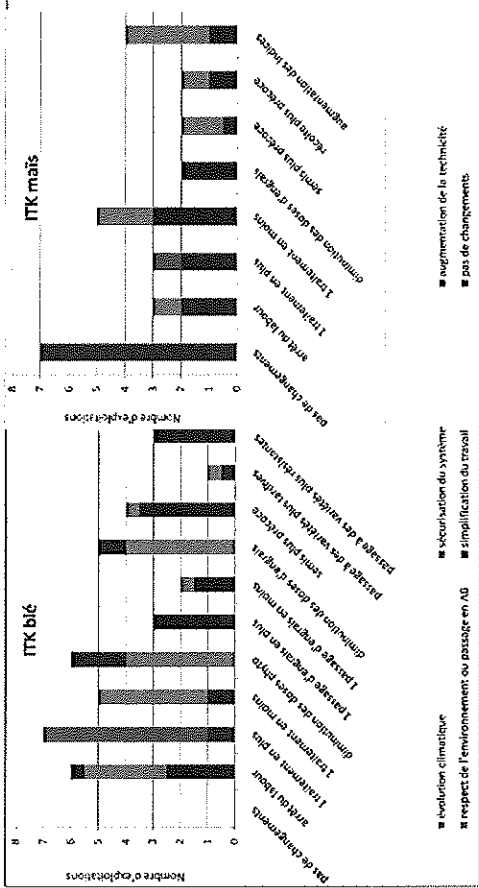


Tableau 2: Les modifications des ITK du blé et du maïs depuis 10 ans pour 28 exploitations

En 10 ans, les 28 exploitants interrogés ont changé au moins un élément dans l'ITK du blé, et 21 dans l'ITK du maïs. Les changements sont plus nombreux dans l'ITK du blé, qui inclut davantage d'opérations techniques. Les agriculteurs ont relié la plupart des changements à des raisons économiques et d'organisation du travail (sécurisation du système, augmentation de la technicité et simplification du travail). D'autres changements, comme la diminution des doses de produits phytosanitaires et l'arrêt du labour, sont justifiés par des raisons environnementales ou par un passage en Agriculture Biologique. Les exploitants évoquent peu l'évolution du climat comme explication aux changements effectués ; ils l'évoquent, pour le maïs, à propos des dates de récoltes et de semis plus précoces et du passage à des variétés plus tardives. Cependant pour la plupart des agriculteurs, c'est d'abord l'évolution de la génétique des variétés proposées qui permet de semer plus tôt.

Sur les 33 éleveurs plus particulièrement interrogés sur leur système fourrager (Aussems, 2010 ; Vertès *et al.*, 2011), 5 ont un système « herbager » (maïs : < 20% SFP), 14 ont un système « maïs-herbe » (maïs : 20-35% SFP), 9 ont un système « maïs important » (maïs :

35-50% SFP) et 5 ont un système « maïs prédominant » (maïs : 50-100% SFP). Les exploitations sont très diverses en termes de rapport entre la surface potentiellement accessible au pâturage des vaches laitières et la densité de ce pâturage (en litre de lait par SAU). Pour la majorité de ces éleveurs, le maïs est le premier élément de sécurité du système fourrager. Il permet également de simplifier l'organisation de l'alimentation du troupeau, notamment pour les grands élevages. Les éleveurs herbagers ont **remplacé les prairies de courte durée** (Ray grass italien Rgi maintenu une année et demi au maximum) **par des prairies de plus longue durée**, et ont **largement remplacé les prairies semées en mélange de Ray grass anglais et trèfle blanc (RGA-TB), par des prairies multi-espèces plus complexes**. Ce choix permet d'allonger la période de pâturage en été grâce aux espèces plus résistantes à la sécheresse (fétuque élevée, luzerne, etc.). Il est apparu à la suite de la sécheresse de 2003 où les prairies de RGA-TB ont été rapidement « grillées ». Mais les éleveurs évoquent également l'intérêt de pouvoir adapter ces mélanges à la diversité des sols. Bien que la grande majorité des élevages soient **autonomes en fourrage**, 4 éleveurs achètent des fourrages tous les ans, et 10 occasionnellement. **Ce se sont les éleveurs « herbagers » et « maïs-herbe » qui sont le moins autonomes en fourrages** alors qu'il s'agit de leur objectif majeur (60% de ces élevages ont moins d'un mois en stock d'avance, contre 25% pour les 2 systèmes « maïs »). Par ailleurs 7 éleveurs ont choisi de **développer des mélanges céréales-protéagineux(MCPT)** afin de compléter les stocks lorsqu'ils apparaissent insuffisants.

Les 28 agriculteurs interrogés sur la **gestion territoriale de leur exploitation**, différencient dans l'espace les modes d'utilisation des terres et les ITK pour chaque culture en fonction de la diversité des conditions pédoclimatiques et structurales de leur territoire d'exploitation. Les éleveurs interrogés en Haut-Anjou disposent de terres relativement mouillantes qu'ils utilisent en prairies permanentes. Les changements ont été recensés avec les éleveurs au niveau de chacun de leurs fliots (tableau 3). En nombre d'fliots, la majorité des **changements effectués concernent les prairies** avec la mise en rotations culturales de prairies (25 fliots) ou l'inverse (13 fliots), sans différence significative entre les trois zones. L'abandon du pâturage au profit de la fauche est le troisième grand type d'évolution (7 fliots).

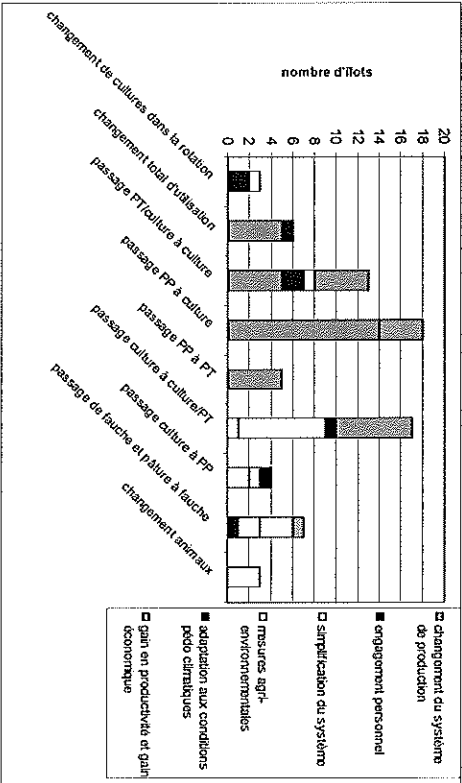


Tableau 3 : Les changements dans la gestion territoriale de 28 exploitations

Le raisonnement le plus fréquent est la recherche d'un gain de productivité et d'un gain économique (notamment pour le passage de prairies à cultures ou de prairie permanente à prairie temporaire). Le second raisonnement est une recherche de simplification du travail (ex : passage en fauche seule). Le troisième type de raisonnement est lié à un changement dans le système de production (ex : augmentation des cultures de céréales pour l'alimentation d'un atelier granivore). Le raisonnement d'une meilleure adaptation aux conditions pédoclimatiques apparaît dans les quelques cas de changement de succession culturales. Il s'agit dans ces cas d'une meilleure adaptation aux conditions existantes, et non d'une adaptation à une évolution climatique qui s'exprimerait de façon différente sur le territoire de l'exploitation.

Les plantations ou arasements de haies ont été étudiés sur une plus longue période pour pouvoir les prendre en compte (20 ans). Pour les exploitations des trois zones, 20% des fliots ont été concernés par une modification dans l'aménagement des haies. Il s'agit surtout d'arasements, justifiés par une simplification du travail. L'évolution du climat n'est pas un facteur de raisonnement des agriculteurs dans l'évolution de la gestion des bordures de champs (même si on évoque la protection des cultures au vent et des animaux en pâturage).

2.2. Perception de l'évolution climatique et adaptation des systèmes d'exploitation

Sur plus d'une décennie, tous les agriculteurs ont constaté une évolution climatique en termes, soit de modifications directes des paramètres climatiques, soit de changements agronomiques (modification des dates des semences ou des récoltes). Ainsi, 20 des 24 agriculteurs interrogés par entretien compréhensif ont constaté une avancée des dates de récolte du maïs et du blé de deux à trois semaines, depuis leur installation ou même depuis

l'époque de leurs parents. Toutefois, la reconnaissance d'une évolution climatique et d'une modification des dates de semis et de récoltes ne préjugent en rien de la nature du lien que les exploitants construisent entre ces deux constats. Pour les agriculteurs concernés, l'explication la plus fréquemment avancée pour expliquer ce lien reste l'évolution génétique des variétés que les semenciers mettent sur le marché, à l'image de ce qui est fait pour accroître les performances du troupeau.

Dès qu'il s'agit de qualifier l'évolution climatique les avis divergent, mais la plupart des agriculteurs s'accordent à percevoir une transformation du régime des pluies (tableau 4). Cette appréciation est relativement convergente avec l'avis des climatologues.

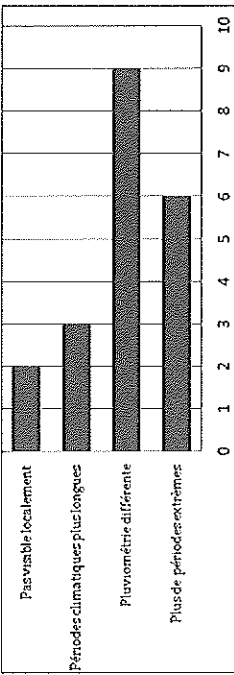


Tableau 4 : Evolution climatique

Les distinctions les plus fortes entre les exploitants apparaissent dans la justification de cette évolution. Le lien entre l'évolution climatique et la théorie du changement climatique est effectué par 5 exploitants ; 2 autres reconnaissent l'existence du changement climatique, mais pensent qu'ils n'ont pas assez de recul pour affirmer l'évolution qu'ils constatent au changement climatique plus global (Tableau 5). Les autres exploitants proposent, soit une autre théorie, celle du cycle lié selon eux aux glaciations/réchauffements successifs, soit pas de théorie du tout, s'en tenant au constat de l'évolution du climat. Enfin, la relation de causalité est inversée chez 2 exploitants. Selon eux, ce sont les exploitations agricoles qui sont de plus en plus vulnérables au climat en raison de l'évolution des systèmes de production. En rapportant la variation de ces justifications au niveau d'études de l'exploitant, il peut être constaté que la théorie du changement climatique qui reconnaît le rôle de l'homme dans le changement climatique est plutôt partagée par les exploitants ayant un niveau d'étude BTS/ingénieur, les autres exploitants ayant plutôt tendance à privilégier la théorie du cycle ou ne fournissant pas d'explication spécifique.

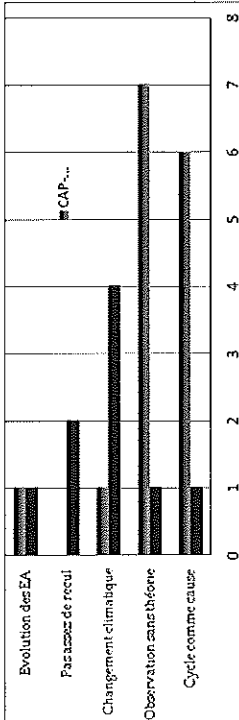


Tableau 5 : Explications de l'évolution climatique

Plus globalement, 2 pôles peuvent être dégagés dans la perception de l'évolution climatique. On trouve ainsi, d'un côté les exploitants dont la perception de l'évolution climatique renvoie à celle du changement climatique, c'est-à-dire défendant l'idée que l'homme joue un rôle dans cette évolution. Ils sont 7 sur 24 et la plupart sont diplômés du supérieur. Ce qui n'est pas le cas de 13 des 15 exploitants qui réfèrent l'évolution climatique à une autre théorie dans laquelle l'homme ne joue aucun rôle ou qui s'en tiennent au seul constat de l'évolution. Des facteurs comme l'intégration sociale des éleveurs ou leur système fourrager ont été également pris en compte pour étudier la variation de la perception de l'évolution climatique et l'adoption de la théorie du changement climatique. Le niveau d'étude reste le principal facteur expliquant cette variation.

Les évolutions les plus significatives des élevages s'inscrivent dans les tendances statistiques lourdes de restructuration des élevages laitiers avec augmentation de la SAU, des quotas laitiers (issus des terres reprises à d'autres élevages disparus), des troupeaux, et des investissements dans les bâtiments pour répondre aux nouvelles normes réglementaires. Le manque de disponibilité foncière lors des agrandissements conduit souvent à une dispersion des terres et des contraintes accrues de surfaces accessibles pour la pâture, ceci renforçant la trajectoire de certains élevages vers un système davantage fondé sur le maïs fourrager. A l'intérieur de cette évolution générale, certains élevages effectuent néanmoins une transition vers des systèmes AB ou de diminution des intrants. Ainsi, à l'échelle de deux décennies, tous les agriculteurs interrogés ont effectué de grandes transformations dans leur système d'exploitation, principalement pour des raisons économiques ou d'organisation du travail. L'évolution climatique est rarement désignée comme responsable d'un changement sur l'exploitation, même si 4 agriculteurs (sur les 24 interrogés par entretien compréhensif) justifient les transformations qu'ils envisagent à moyen terme (rachats de terre et arrêt de la production laitière) en partie par cette évolution. Nous n'avons pas trouvé de différences significatives entre les trois zones climatiques. D'après le raisonnement des agriculteurs, le facteur climatique n'est pas déterminant, c'est la synergie d'un ensemble de facteurs, dont l'évolution climatique, qui aboutit à un changement sur les exploitations.

3^{ème} partie. Les chemins de l'adaptation

La discussion portera sur deux points : le pilotage par l'éleveur vis-à-vis de l'évolution climatique, et la façon dont ce pilotage s'exprime dans les systèmes d'exploitations.

3.1. L'évolution climatique dans la conduite du système d'exploitation

Le premier constat dressé par cette étude est la difficulté d'identifier le rôle du facteur climatique dans les changements survenus sur les exploitations où il apparaît à côté d'autres facteurs dans les perceptions et raisonnements des éleveurs. Plus généralement, l'éleveur semble s'adapter à son environnement sans en faire de « découpage » selon différents facteurs causaux (Delbos et Jorion, 1984). Il procède par ajustements successifs à partir d'une connaissance globale de son système de production. L'adaptation du système de production n'est pas orientée par le facteur climatique, mais par l'adéquation entre les

ressources et les besoins alimentaires du troupeau (Andrieu *et al.*, 2008) dont le facteur climatique devient un élément de la composition. Si l'évolution climatique est une nouveauté, en revanche la variabilité climatique est une donnée de base dans le travail de tout agriculteur, elle est un paramètre fort de la constitution du stock fourrage jusqu'au pilotage de l'ensemble de l'élevage. L'intégration par l'éleveur de la variabilité climatique dans son pilotage, pourrait lui permettre d'intégrer secondairement l'évolution climatique, même si celle-ci est rarement identifiée comme changement climatique.

L'adéquation entre ressources et besoins alimentaires est généralement effectuée en routine en jouant sur les stocks quand la situation se tend (même si l'on a constaté une grande variabilité de ces stocks entre exploitations et systèmes fourragers), mais d'autres types d'ajustements peuvent être nécessaires. Pour comprendre comment s'effectuent ces ajustements, il a été demandé aux éleveurs d'expliquer comment ils avaient géré la sécheresse de 2010. Trois catégories d'actions ont pu être ainsi identifiées : i) celles qui permettent d'internaliser les conséquences de la sécheresse sur le système de production (en augmentant la part de fourrages disponibles par la fauchage des dérobés ou des refus, en pâturant des surfaces initialement prévues pour des récoltes, etc.), ii) celles qui permettent d'externaliser ses conséquences (achat de fourrages, adhésion à des assurances contre les aléas climatiques et, en dernier ressort, diminution de la ration alimentaire du troupeau voire décapitalisation partielle du troupeau) et iii) des actions mixtes, à la fois, d'internalisation et d'externalisation des conséquences de la sécheresse. Cette classification renvoie à celle adoptée par A. Magnan (Magnan, 2009). Dans la plupart des cas, les éleveurs ont préféré mettre en place des actions mixtes. Les plus souvent rencontrées combinent l'achat, le déstockage et l'augmentation de la production de fourrage. La plupart de ces ajustements s'effectuant à la fois au coup par coup et en continu dès que l'exploitant discerne l'existence de difficultés pour adapter les ressources aux besoins alimentaires du troupeau. Plus précisément, deux échelles temporelles d'ajustement peuvent être identifiées : celles fondant des raisonnements interannuels (une année sur l'autre) et celles portant sur les pas de temps « intra-campagne » en fonction de la situation locale.

La gestion de la sécheresse, en tant que phénomène climatique exceptionnel, montre les modalités d'intégration du facteur climatique au système de production. Les éleveurs interrogés dans le Grand Ouest l'intègrent dans des actions tactiques ; ce facteur n'oriente pas (encore ?) le système de production. Cette gestion renvoie à la perception de la variable climatique par les éleveurs. Seuls certains éleveurs familiarisés à la démarche scientifique (laquelle décompose les phénomènes) identifient une évolution climatique durable et qui s'accroît, ce qui nécessiterait peut-être un jour une transition entre l'action tactique et l'action stratégique planifiée. La situation des agriculteurs interrogés dans la Vienne présente un contraste de ce point de vue. Ces éleveurs ont tous spontanément parlé d'évolution climatique et ont développé diverses adaptations : variétés, espèces⁴ ou modes d'irrigation moins consommateurs d'eau, extension de la surface en prairies, ou au contraire maximisation des cultures de vente et achat de fourrages. Ces résultats sont cohérents avec ceux d'études récentes, dans cette région où la gestion quantitative de l'eau est problématique depuis plusieurs années déjà (Amigues *et al.*, 2006; Brissou, 2010). Cette

⁴ Par exemple des essais de cultures de sorgho ont été effectués, des MCP ont été introduits dans les systèmes fourragers.

transition semble avoir déjà été effectuée par ces éleveurs de la Vienne pour lesquels la nécessité de l'irrigation a rendu indispensable une action stratégique planifiée car elle nécessitait une coordination d'actions importante et l'identification du facteur climatique en tant que tel pour calculer les besoins.

3.2. Conséquences de l'adaptation climatique sur la spécialisation des élevages

Les résultats mettent en exergue la forte diversité des systèmes d'exploitation et de leurs trajectoires d'évolution, en termes de systèmes techniques mais aussi de structures d'exploitation et de raisonnements des éleveurs. Une diversité de situations était attendue compte tenu de notre choix de dispositif d'échantillonnage des exploitations agricoles, mais elle est ici très significative ; par ailleurs nous pensions trouver des différences significatives entre les trois zones climatiques investiguées, ce qui n'a pas été le cas. Compte tenu à la fois de la grande diversité des situations, de la faiblesse numérique de l'échantillon (étude qualitative) et de l'impact encore relatif de l'évolution climatique sur les systèmes d'exploitation, nous n'avons pas dégagé un facteur déterminant expliquant la gestion de l'évolution climatique par les éleveurs. Le seul facteur qui semble interférer concerne le niveau d'étude de l'exploitant, mais avec des nuances. En effet, pour le moment ce facteur rend compte de la différenciation dans la prise de conscience du changement climatique (évolution et explication de cette évolution). Toutefois, l'analyse n'a pu être menée plus loin, à savoir distinguer des grands types de réponses à l'évolution climatique, en l'absence d'une adaptation conduite par les éleveurs pour répondre spécifiquement aux modifications du climat. Pour le moment et dans les régions enquêtées, la réponse des éleveurs par ajustements successifs de leurs pratiques à la variabilité climatique reste suffisante. Néanmoins, l'agrégation de ces ajustements successifs peuvent permettre de dessiner des évolutions.

L'orientation des systèmes fourragers est ainsi apparue fortement structurante de la diversité des exploitations sur un gradient allant de la prédominance du maïs à la prédominance des herbages. Interrogeant les éleveurs sur la sécheresse de 2010, nous avons pu constater que l'essentiel des ajustements pour les éleveurs herbagers et surtout ceux ayant pour objectif d'augmenter la production de fourrage par des actions d'internalisation (fauchage des refus et des cultures dérobées par exemple) reposait sur une exploitation plus fine de la variabilité des conditions de production (dans le temps et sur leur territoire d'exploitation). Les éleveurs ayant une part importante de maïs en culture préfèrent si possible transformer le maïs grain en ensilage. Les éleveurs herbagers ont des possibilités très réduites de convertir ainsi une récolte de vente en fourrages pour les animaux. Certains éleveurs herbagers envisagent alors, pour desservir les contraintes de leur système de production, d'acquiescer de nouvelles prairies tandis que les éleveurs à « dominante maïs » privilégient l'acquisition de nouvelles terres pour la culture de céréales. Ainsi, les stratégies qui se mettent en place laissent à penser qu'elles renforcent plutôt la spécialisation des exploitations vers un système fourrager à « dominante maïs » ou « à dominante herbagère », dessinant ainsi des gammes possibles d'évolution des systèmes d'exploitations très différentes avec des facteurs limitant la production également distincts.

Le deuxième élément à prendre en compte dans l'analyse du lien entre l'évolution climatique et la spécialisation des élevages concerne l'effet de seuil induit par l'augmentation de la variabilité climatique dans des élevages déjà très contraints par une synergie de

facteurs. Dans certains élevages, nous avons pu noter que l'exploitant pensait arrêter à terme l'atelier lait. Dans ce choix, les sécheresses estivales répétitives depuis le début des années 2000 jouaient un rôle, mais jamais comme facteur déclenchant. Ce qui semble se dessiner ici, c'est que la variabilité climatique peut se transformer chez certains éleveurs en une augmentation des contraintes jugées alors insupportables par l'éleveur, le conduisant à envisager, pour le moment, de profondes modifications de son système de production. Il reste à savoir si ces transformations se concrétiseront dans un futur plus ou moins proches.

En tout état de cause, l'évolution climatique constatée par les éleveurs, même si elle se traduit peu dans une évolution des pratiques, commence déjà à limiter les changements envisageables au sein des exploitations.

Conclusion

Cette étude qualitative a permis de caractériser une diversité de façons de percevoir les évolutions climatiques et de raisonner la gestion et l'évolution des systèmes d'exploitation, par les éleveurs laitiers de l'Ouest (Bretagne, Basse-Normandie, Pays de Loire). Même si beaucoup d'éleveurs constatent une évolution climatique, elle ne constitue pas encore une préoccupation majeure pour eux, au contraire des éleveurs rencontrés en Poitou-Charente, pour lesquels l'irrigation des cultures de maïs et la gestion quantitative de l'eau est une réalité depuis plusieurs années déjà. Le mode d'action des éleveurs de l'Ouest repose sur la gestion tactique de l'évolution climatique, qu'ils intègrent en fait dans la gestion de la variabilité climatique, paramètre fondamental de leur métier. Cela se traduit par une modification de certaines de leurs pratiques sans identification isolée du facteur climatique (dates de semis, de récolte, changements de variétés, d'espèces, de combinaisons d'espèces fourragères, etc.).

Ces réponses des agriculteurs nous interrogent sur leur prise en compte des évolutions futures du climat en cas d'aggravation. Nous avons montré une certaine tendance à la spécialisation des systèmes fourragers, vers le « tout maïs » ou vers le « tout herbager ». Ces deux orientations productives définissent des seuils au-delà desquels les ajustements ne seront plus suffisants pour assurer l'adéquation en ressources et besoins alimentaires. En effet, si les déficits hydriques estivaux ne permettent plus de rentabiliser la culture du maïs ou de maintenir un herbager productif, la question de la transition entre action tactique et action stratégique se posera avec acuité pour ces deux systèmes spécialisés. Cette spécialisation définit ainsi de nouvelles vulnérabilités. Ce peut être les dépendances des élevages à la capacité des filières à produire de nouvelles semences de maïs ou à la disponibilité du foncier. De même, la spécialisation de systèmes fourragers peut diminuer les marges de manœuvre pour tirer partie de l'hétérogénéité des types de terrain d'exploitations qui s'agrandissent. La volatilité des prix peut être exacerbée par l'évolution climatique, rendant peu durables des systèmes de productions recourant à de fréquents achats de fourrages. Plus largement, la transition vers une action stratégique peut être retardée par la mise en place de coordinations auxquelles les éleveurs ne sont plus ou pas habitués. Cependant, la prise de conscience des éleveurs, leur sensibilisation au changement climatique et leur formation, en termes de diversité des solutions possibles, sont manifestement des éléments importants pour améliorer la durabilité de leurs exploitations. Il

ne s'agit pas là d'être dans une « injonction » pour la flexibilité des élevages, mais de mieux comprendre les ressorts de leurs réponses à la variabilité climatique pour aider à préparer des solutions alternatives : ceci dépasse la question climatique, mais celle-ci intervient déjà comme un révélateur pour les systèmes d'exploitation de l'Ouest.

Remerciements

Nous tenons à remercier, en tout premier lieu, les éleveurs qui ont accepté de passer du temps avec des enquêteurs et de mobiliser passé, présent et futur pour répondre à une voire 2 enquêtes successives, mais également tous les conseillers agricoles sollicités qui nous ont permis par leur collaboration d'accéder à une diversité d'élevages tout en nous transmettant de nombreuses informations indispensables dans la conduite de cette recherche.

Bibliographie

- Amigues, J.P., Debaeke, P., Iber, B., Lemaire, G., Seguin, B., Tardieu, F., Thomas, A., 2006. Sécheresse et agriculture: réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective. Synthèse du rapport d'expertise réalisé par l'INRA à la demande du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche. INRA, Paris, p. 72.
- Andrieu, N., Coléno, F., Duru, M., 2008. L'organisation du système fourrager, source de flexibilité face aux variations climatiques. In: Dedieu, B., Chia, E., Lederc, B., Moulin, C.H., Tichit, M. (Eds.), L'élevage en mouvement: flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores. Quae, Versailles, pp. 95-111.
- Aussems, E., 2010. Place du changement climatique parmi les facteurs d'évolution des systèmes fourragers dans les élevages laitiers du Grand Ouest de la France. Agronomie. ESA, École Supérieure d'Agriculture d'Angers, Quimper, Angers, p. 135p + annexes.
- Brisson, N. (Ed), 2010. Présentation des méthodes et résultats du projet Climator INRA, Arvails, Versailles.
- de Certeau, M., 1980. L'invention du quotidien, 1. Arts de faire. Gallimard, Paris, Paris.
- Delbos, G., Jorion, P., 1984. La transmission des savoirs. Éditions de la Maison des sciences de l'homme, Paris.
- Doré, T., Meynard, J.M., 2006. Itinéraire technique, système de culture: de la compréhension du fonctionnement du champ cultivé à l'évolution des pratiques agricoles. Introduction. In: Doré, T., Le bail, M., Martin, P., Ney, B., Roger-Estrade, J. (Eds.), L'agronomie aujourd'hui. Quae, Versailles, pp. 33-41.
- Felten, B., Martin, G., Theau, J.P., Thenard, V., Magne, M.A., Duru, M., 2010. Conception de systèmes d'élevage adaptés au changement climatique. Projet Climoforel, Midi-Pyrénées Série Les Focus PSDR3, p. 12.
- Godard, O., 2010. Cette ambiguë adaptation au changement climatique. Nature, Science et Société 18, 287-297.
- Lemaire, G., Pflimlin, A., 2007. Les sécheresses passées et à venir: quels impacts et quelles adaptations pour les systèmes fourragers? Fourrages 190, 163-180.
- Léon, A.S., 2010. Influence des changements climatiques sur la gestion territoriale des exploitations de polyculture-élevage. ENITA de Bordeaux. Rennes - Bordeaux, p. 117 + annexes.
- Magnan, A., 2009. Proposition d'une trame de recherche pour appréhender la capacité d'adaptation au changement climatique. Vertigo, Volume 9, Numéro 3, URL : <http://vertigo.revues.org/9189>; DOI : 10.4000/vertigo.9189.
- Martin, P., Joannon, A., Mignolet, C., Soucière, V., Thenail, C., 2006. Chapitre 10. Systèmes de culture et territoires: cas des questions environnementales. In: Doré, T., Le bail, M., Martin, P., Ney, B., Roger-Estrade, J. (Eds.), L'agronomie aujourd'hui. Éditions Quae, pp. 253-283.
- Moreau, J.C., Delaby, L., Duru, M., Guérin, G., 2009. Démarches et outils de conseil autour du système fourrager: évolutions et concepts. Fourrages 200, 565-586.

Moreau, J.C., Poisson, S., Gate, P., Lacroix, B., Lorgeou, J., Ruget, F., 2010. Impacts du changement climatique sur les systèmes d'élevage et les grandes cultures : résultats du programme ACTIA 2007-2009. In: Brisson, N. (Ed.), INRA, Arvails, Versailles, pp. 48-51.

Vertès, F., Léon, A.S., Aussems, E., van Tilbeurgh, V., Thenail, C., 2011. Place du changement climatique parmi les facteurs d'adaptation des systèmes fourragers dans les élevages laitiers du grand ouest de la France. Poster. 18e journées 3R Rencontres Recherches Ruminants la Villette, Paris, p. 1.

Changement climatique et vigne dans le Grand Ouest (Pays de Loire)

Gérard Barbeau

Des températures en augmentation sans réduction sensible de la pluviosité annuelle.

En Pays de Loire, les températures moyennes, minimales et maximales ont augmenté significativement entre 1950 et 2010. Au cours de cette période, la température moyenne annuelle a augmenté de 1.3 C à Nantes et à Saumur.   Angers, elle a augmenté plus vite encore, de 1.5  C. Ce réchauffement observé en Pays de Loire s'est traduit par une augmentation plus significative des températures minimales que des maximales, ce qui caractérise un climat o c anique. L'évolution du comportement de la température moyenne des stations météo de Nantes, Angers et Saumur, montre un important changement, à partir de 1980 pour les températures moyennes de Nantes et de 1987 pour celles d'Angers et Saumur (Bonnefoy *et al.*, 2010). On observe ainsi une évolution de la température moyenne de 11.4  C pour la période pré-rupture (1950/1986)   12.4 C pour la période post-rupture (1987/2010) pour Angers, de 11.8  C   12.7  C pour Saumur.

Tableau 1. Augmentation moyenne par saison entre 1950 et 2010 sur 3 stations météo en Pays de Loire

Température moyenne (�C)	Printemps	�t�	Automne	Hiver
	Mars - Mai	Juin - Août	Sept. - Nov.	Déc. - Fév.
Nantes	+1.1	+1.6	+1.0	+1.1
Angers	+1.4	+2.0	+1.4	+1.4
Saumur	+1.2	+1.7	+1.2	+1.3

Un indice utilisé en viticulture permet de classer les climats par catégorie allant du plus froid au plus chaud. Il s'agit de l'indice de Huglin (IH) qui prend en compte les températures moyennes et maximales du 1 r avril au 30 septembre selon la formule :

$$IH = \sum [(Tm-10) + (Tx-10)/2] * k$$

où Tm est la température moyenne, Tx la température maximale et k un coefficient de longueur du jour, fonction de la latitude.

Selon cet indice, le climat des vignobles en Pays de Loire est passé de frais à tempéré pour les sites de Nantes et d'Angers, voire à tempéré chaud pour le site de Saumur.

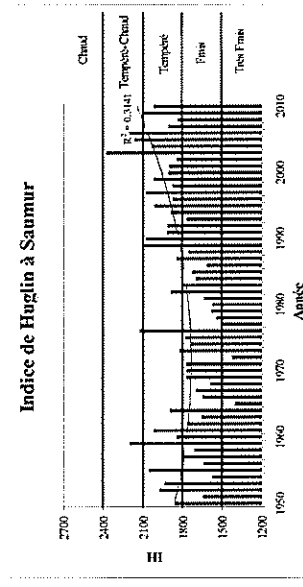


Figure 1. Evolution de l'indice de Huglin (IH)   Saumur, de 1950 à 2010. (Source données : Météo France)

Depuis la fin des années 80, d'un point de vue climatique, la viticulture du Grand Ouest connaît une situation plutôt favorable à la production de raisins et à l'élaboration de vins de qualité. Si l'on fait exception de quelques années plus difficiles (gel de 1991, abondante pluviométrie des années 2000 et 2007), l'ensemble des années se caractérise par des sommes de température élevées pendant la période végétative. L'augmentation été de 262 degrés-jours à Nantes, 338   Angers et 273 à Saumur sur la période 1950 - 2010. Par contre la pluviométrie est rest e assez stable dans le temps, si ce n'est qu'elle présente de plus en plus des amplitudes importantes d'une année à l'autre. Les températures ayant augmenté, la demande climatique est plus forte d'où une évapotranspiration plus élevée et des cas de stress hydrique plus fréquents. Cette situation contraste fortement avec celle des années 1956 - 1986 où les sommes des températures étaient nettement plus basses (  l'exception de 1976). Il faut toutefois signaler que la période précédente (1945 - 1955) avait aussi connu un climat plus clément. La notoriété des vins de 1945, 1947 et 1949, en particulier des vins liquoreux des coteaux du Layon, en témoigne encore aujourd'hui.

Des vendanges plus pr c ces et une m illeure qualité de raisins et de vins.

Depuis une vingtaine d'années, le cycle de la vigne s'est modifié. Les dates des stades phénologiques (débournement, floraison, véraison) ainsi que les dates de vendanges ont été avancées. Cette avance est de l'ordre de 10 à 20 jours selon les cépages. Désormais la majeure partie de la récolte a lieu en septembre alors qu'auparavant elle débutait fin septembre pour se poursuivre jusqu'à fin octobre. La figure 2 concernant la période 1976-2011 illustre bien la rupture de 1987 : auparavant les dates de récolte étaient la plupart du temps plus tardives que la moyenne de la période alors qu'après 1987, les dates sont devenues plus pr c ces. Il convient cependant de noter que la date de récolte ne correspond pas à un stade physiologique particulier mais   un compromis entre la maturité du raisin, l'organisation des chantiers de récolte et les conditions climatiques de l'année. Il faut signaler également que les conditions climatiques étant devenues plus favorables, les viticulteurs retardent le plus possible la date de vendange pour atteindre une maturité optimale, ce qui n'était pas le cas auparavant.

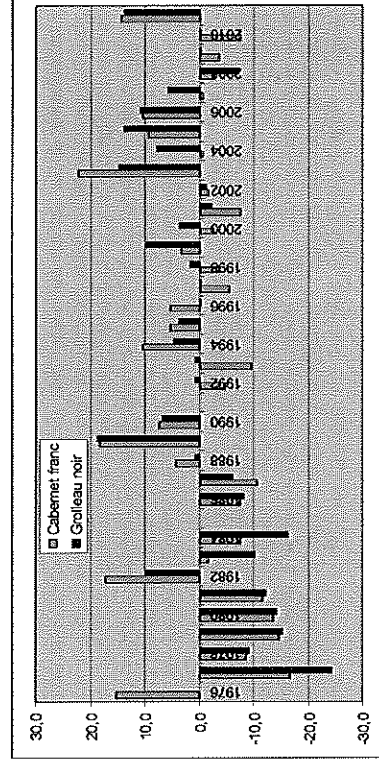


Figure 2.  carts en jours à la moyenne 1976-2011 des dates de vendanges du Grolleau noir (cépage précoce) et du Cabernet franc (cépage plus tardif)   la station expérimentale INRA de Montreuil-Bellay (49) au sud de Saumur.

Une autre conséquence du changement climatique est que maintenant, le feuillage de la vigne reste en place plusieurs semaines, voire jusqu'à 2 mois après la vendange, alors que dans les années 60-70, la récolte correspondait souvent à la chute des feuilles.

L'avancée du cycle de la vigne s'est accompagnée d'une amélioration qualitative du raisin. En effet, d'une part le développement végétatif a lieu dans une période de l'année où l'activité photosynthétique est plus performante (avril – mai – juin : jeunes feuilles, rayonnement important et absence de stress hydrique) et, d'autre part, le cycle de fructification (juin – septembre) bénéficie de températures plus élevées favorables à la synthèse des sucres et à une diminution de l'acidité des baies. On constate ainsi une augmentation systématique de la teneur en sucre du raisin et une diminution de son acidité, quel que soit le cépage et le bassin de production (Neebling, 2010). Ceci se traduit automatiquement par une augmentation de l'indice de maturité (calculé comme étant le rapport sucres / acidité totale), indice traditionnellement utilisé pour déterminer la date de vendange.

Tableau 2. Evolution de la qualité des raisins de 5 cépages cultivés en Pays de Loire (Source données : CA 44 : ATV 49)

Bassin viticole (N°département)	Cépage (nombre de parcelles)	Série temporelle	Teneur en sucre (g/L)	Degré d'alcool potentiel	Acidité Totale (g H ₂ SO ₄ /L)
Muscadet (44)	Médon de Bourgogne (20)	1986-2009	+24,1 *	+1,4*	-0,7
Anjou (49)	Grolleau noir (5)	1981-2010	+36,5 ***	+2,2*	-2,0 *
Anjou (49)	Canay (6)	1981-2010	+25,0 *	+1,5*	-1,2 *
Anjou (49)	Chabernet franc (10)	1981-2010	+46,6 ***	+2,8*	-2,2 *
Anjou (49)	Chenin (8)	1981-2010	+38,2 **	+2,2*	-2,0 *
Anjou (49)	Sauvignon blanc (2)	1981-2010	+38,9 ***	+2,3*	-1,0
Saumurais (49)	Chenin blanc (2)	1981-2010	+38,0**	+2,3*	-3,0**
Saumurais (49)	Cabernet franc (4)	1981-2010	+54,4 ***	+3,2*	-2,0 **

* P<0,05, ** P<0,01 et *** P<0,001 respectivement. Note : 1° d'alcool équivalent à 16,83g/L de sucre.

Des pratiques en évolution. Quel impact sur la qualité ?

Si l'avancée du cycle de la vigne est directement imputable au changement climatique, l'amélioration de la qualité du raisin, bien qu'amplement justifiée d'un point de vue physiologique, fait encore débat. En effet, au cours des 30 dernières années, le souci de plus en plus prégnant de « faire de la qualité » plutôt que de la « quantité » a conduit à modifier un certain nombre de pratiques viticoles. C'est ainsi que l'on a cherché à contrôler la vigueur de la vigne et à limiter le rendement parce que de nombreuses études montraient que cela allait dans le sens d'une amélioration de la qualité. Différentes pratiques ont été mises en œuvre, dont les plus notables sont : l'enherbement des interlignes avec des graminées plus ou moins concurrentes, l'ébourgeonnage systématique des cepes (suppression de tous les bourgeons et jeunes pousses se développant à côté des bourgeons laissés lors de la taille) ainsi que l'éclaircissage des grappes quelques semaines avant la vendange. L'enherbement réduit effectivement la vigueur, donc la plante consacre plus d'énergie à alimenter les baies qu'à produire de nouvelles pousses ; l'ébourgeonnage limite le nombre de rameaux et donc de grappes ; enfin l'éclaircissage supprime les grappes considérées comme surmaturées. Toutes ces pratiques contribuent à favoriser l'accumulation des métabolites issus de la photosynthèse dans les baies de raisins et donc à améliorer la qualité. Ceci dit, l'exemple de l'année 2003, où en Pays de Loire les fortes températures n'ont pas été accompagnées de sécheresse contrairement aux autres régions françaises, montre que l'effet température prédomine amplement sur les pratiques, celles-ci n'intervenant que comme éléments de correction.

Le changement climatique est ressenti par une majorité de viticulteurs. Dès 2002, une enquête fut effectuée sous les auspices du PIR (Poisdam Institute for Climate Impact Research) pour évaluer la perception qu'avaient les viticulteurs du changement climatique. La majorité des 57 viticulteurs du Val de Loire ayant répondu à l'enquête avait noté un changement. Certains éléments du climat sont cités de manière récurrente : une augmentation de la fréquence des épisodes de sécheresse, des saisons végétatives plus longues et plus chaudes, et de manière générale des événements extrêmes plus fréquents. Plus de la moitié d'entre eux considéraient que ce changement était globalement positif pour la viticulture ; il se traduisait par une avancée des stades phénologiques et de la date de vendange et une amélioration de la qualité des raisins et des vins, sans affecter la quantité. Toutefois, il était suspecté de favoriser la pression de certains parasites et maladies (Battaglini et al., 2009).

Plus récemment, une enquête sur les pratiques des viticulteurs (Barbeau C., 2011 – non publiée), quel que soit leur mode de production (conventionnel, intégré ou biologique), a mis en exergue la sensibilité de certaines pratiques viticoles aux conditions météorologiques, en particulier le travail du sol au printemps, les traitements phytosanitaires contre les parasites et maladies et la récolte. Les traitements phytosanitaires constituent la pratique la plus sensible. Elle dépend en effet de nombreux facteurs météorologiques : absence de pluie dans les 2 heures qui suivent le traitement, vitesse du vent inférieure à 19 km/h, température de l'air comprise entre 10 et 25°C, hygrométrie comprise entre 60% et 95%, faible durée d'humectation des feuilles... La combinaison de ces facteurs détermine le nombre de jours agromonomiquement disponibles pour effectuer cette pratique, laquelle peut donc être sérieusement affectée par une modification du climat. Il est toutefois difficile d'analyser les effets récents du changement climatique car, d'une part les données disponibles sur les fréquences de traitement, les doses appliquées et les horaires d'application ne datent que d'une dizaine d'années et d'autre part les équipements et molécules utilisés sont en rapide évolution.

Conclusions

Depuis la fin des années 80, la viticulture du Grand Ouest se trouve dans un contexte climatique favorable, où les différents cépages traditionnellement cultivés peuvent exprimer toutes leurs potentialités. Si, auparavant, la Loire était considérée comme la limite septentrionale de la culture de la vigne dans le Grand Ouest, car certaines années les raisins mûrissaient avec difficulté, ce n'est plus vrai aujourd'hui. Par contre de nouveaux problèmes apparaissent : augmentation importante de la teneur en sucres conduisant à des vins trop alcoolisés, décalage croissant entre la maturité technologique (rapport sucres / acidité) et la maturité phénologique des raisins rouges ou la maturité aromatique des raisins blancs, obligeant à mettre en œuvre de nouveaux indicateurs de la maturité globale (ex. développement rapide de la dégradation de baies à la parcelle). La date de vendange devient de plus en plus une variable particulièrement sensible car elle correspond à un équilibre sucres / acides / composés phénologiques / arômes qui va déterminer le mode de vinification et le type de vin à élaborer. Cette question ne se pose pas avec la même acuité auparavant car l'accumulation du sucre dans les baies était plus lente, la récolte plus tardive, et il arrivait un moment où, coûte que coûte il fallait récolter, parce que les conditions climatiques devenaient défavorables et que la vendange se détériorait.

D'autres problèmes commencent à pointer : augmentation de la fréquence de saisons particulièrement sèches (soit le printemps, soit l'été, ou les deux) induisant parfois des stress hydriques sévères dans des parcelles de vigne implantées sur des sols superficiels ou à faible réserve en eau.

En ce qui concerne la qualité du raisin, différents cas de figure se présentent : les cépages précoces (Mélon de Bourgogne, Chardonnay, Grolleau, Gamay) voient leur date de véraison avancer à la mi-août, à une période où les faibles amplitudes thermiques jour/nuit ne sont pas favorables à une bonne synthèse des anthocyanes (pigments rouges) pour les cépages rouges et des arômes pour les cépages blancs. Par contre, les cépages plus tardifs (Cabernet franc, Cabernet sauvignon, Chenin) bénéficient de meilleures conditions pour atteindre leur pleine maturité, le défi devenant celui du choix de la date de vendange mentionnée ci-dessus.

Pour le moment, la nouvelle situation est plutôt favorable en ce qui concerne certains problèmes sanitaires : la pression de maladies telles que le mildiou (*Plasmopara viticola*) et l'oïdium (*Uncinula necator*) diminue (à l'exception de l'année 2007) ainsi que la pourriture grise sur grappes (*Botrytis cinerea*). Là, encore le changement climatique n'est pas seul en cause : l'amélioration des pratiques viticoles et la nature des nouvelles molécules fongicides mises en œuvre jouent un rôle non négligeable, mais difficilement quantifiable.

Perspectives

Et si la température continue d'augmenter ? Dans le scénario A1B du GIEC, considéré comme modéré et assez réaliste à l'horizon 2030, les conditions climatiques du Grand Ouest devraient continuer à être favorables à la culture de la vigne pour la production de raisins et de vins de qualité. L'exemple de cépages comme le Cabernet franc, le Cabernet sauvignon et le Chenin cultivés dans des zones climatiques plus chaudes (Afrique du Sud, Argentine) montre que l'on peut continuer à obtenir des vins de qualité même si la température moyenne augmente de 2°C. Cependant, il faudra procéder à des adaptations à différents niveaux : adaptation des pratiques sur les vignes en place, pour réduire l'évapotranspiration du sol et de la vigne. L'enherbement systématique des inter-rangs est déjà remis en cause dans des sols où la réserve en eau est insuffisante au profit du travail du sol dans les inter-rangs et sous les ceps. L'effeuillage de la zone des grappes sera à effectuer avec précaution pour éviter les grillures de grappes (cas de 1998). Des modifications de certains systèmes de taille pourraient être envisagées pour compenser l'augmentation de la vigueur résultant de l'abandon de l'enherbement des inter-rangs au profit du travail du sol ; c'est ainsi que la taille en Guyot simple pourrait être progressivement remplacée par la taille en cordon de Royat car cette dernière contribue à réduire la vigueur.

D'ici 2030, toujours dans le scénario A1B, les nouvelles plantations devront prendre en compte l'évolution du climat. C'est ainsi que les sols plus profonds et/ou à réserve en eau plus importante seront à privilégier, de même que des expositions plus orientées Nord – Nord-Est.

Pour plusieurs vignobles du Grand Ouest, la cartographie des terroirs viticoles réalisée à partir de 1994 constitue un socle solide pour raisonner le choix des terrains qui seront les plus aptes à la culture de la vigne dans les prochaines décennies : l'orientation, la pente, la profondeur de sol, la réserve en eau, le choix du porte-greffe seront en effet des facteurs clés pour l'implantation des parcelles à replanter. Les bons terroirs de demain ne seront peut-être pas les mêmes qu'aujourd'hui.

Tant pour les vignes déjà en place que pour les nouvelles plantations, l'idée qui prévaut est que les dates de vendanges actuelles ne doivent pas être plus avancées qu'elles ne le sont maintenant, car ce serait au détriment de la qualité. Il faut donc essayer de privilégier un allongement du cycle de la vigne en jouant à la fois sur plusieurs paramètres tels que l'augmentation de la disponibilité en eau du sol, le choix de porte-greffe plus puissants et plus résistants à la sécheresse, la sélection de clones à cycle plus long. D'autres pratiques ponctuelles peuvent également être mises en œuvre telles qu'une date de taille plus

tardive. Dans des scénarii plus contraignants que le A1B, et de toutes façons au-delà de 2030, l'implantation de cépages plus adaptés devra être envisagée. Des études dans ce sens vont démarrer dans les toutes prochaines années, de façon à proposer des solutions à l'horizon 2030. Il faudra aussi concilier l'adaptabilité climatique des cépages avec les exigences en matière de protection de l'environnement : un programme national de création de nouvelles variétés durablement résistantes aux principales maladies de la vigne est en cours. Les premières inscriptions au catalogue officiel devraient avoir lieu à partir de 2016.

Bibliographie

- Barbeau C., 2010.** Méthodes et modèles pour le calcul des jours agronomiquement disponibles pour les travaux agricoles. *Synthèse bibliographique*. Projet PSDR CLIMASTER 11pp.
- Barbeau C., 2011.** Jours agronomiquement disponibles en viticulture. Exemple des traitements phytosanitaires à Montreuil-Bellay. *Rapport d'étude*. Projet PSDR CLIMASTER. 47pp + annexes
- Barbeau G., 2007.** Climat et vigne en moyenne vallée de la Loire, France. *Congrès sur le climat et la viticulture, Saragosse, Espagne*, 10-14 avril 2007, seconde session "climat et terroir", communication orale. Actes pp 96-101.
- Barbeau G*, Coulon C*, Neethling E*, Bonnefoy C**, Quénel H., 2011.** Le changement climatique et les interactions sol-climat. *Revue française de géologie*. N°168.
- Battaglini A., Barbeau G., Bindl M., Badeck F-W., 2009.** European winegrowers' perceptions of climate change impact and options for adaptation. *Regional Environmental Change*. 9 (2), pp. 61-73.
- Bonnefoy C., Quénel H., Barbeau G. et Madelin M., 2009.** Analyse multiscalaire des températures dans le vignoble du Val de Loire. *XXIIème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*. Roumanie, août 2009. Actes dans *Geographia Technica*. Numéro spécial 2009, p 85-90
- Bonnefoy C., Quénel H., Planchon O., Barbeau G., 2010.** Températures et indices bioclimatiques dans le vignoble du Val de Loire dans un contexte de changement climatique. *EchoGéo* numéro 14 (2010). Septembre 2010 - Novembre 2010. Editeur : UMR 8586 PRODIG. <http://echogeo.revues.org/12146>
- Coulon C., Quénel H., García de Cortázar Atauri I., Barbeau G., 2009.** La modélisation : un outil de pilotage du couple climat - vigne? *Revue française d'œnologie*. N° 235 – avril-mai 2009, p15-22.
- Neethling G., 2010.** La relation entre le milieu physique et la qualité des raisins : évolutions et perspectives. *Mémoire de Fin d'étude*. International Master Vintage, Groupe-ESA

Impact du changement climatique sur l'organisation du travail dans les exploitations agricoles : une analyse au travers de la notion de jour disponible

Alexandre Jouanon, Christine Barbeau, Gérard Barbeau, + à voir Vincent Halluine, Robert Trochard, Nicolas Schermann, J.L. Giteau, N. Gouverec, A. Cozanne

Introduction

Dans ce chapitre nous présentons une analyse des conséquences du changement climatique sur l'organisation du travail dans les exploitations agricoles. Dans cette introduction nous expliquons en quoi le changement climatique peut avoir des répercussions sur l'organisation du travail dans les exploitations agricoles et nous détaillons l'approche mise en œuvre pour analyser ces répercussions. Puis dans les parties 2 et 3 nous illustrons cette approche sur deux cas d'étude : les exploitations de polyculture élevage laitier en Bretagne et les exploitations viticoles en Pays de Loire.

Organisation du travail, climat et jours disponibles

Les choix de productions végétales de l'agriculteur dépendent en partie de sa capacité à réaliser dans de bonnes conditions agronomiques les différentes opérations culturales nécessaires à la conduite de ces productions végétales (Papy, F., 2001). Par bonne conditions agronomiques nous entendons : 1. intervenir au bon moment par rapport au développement de la plante (par exemple fertiliser une culture au moment de sa phase de croissance) ; 2. intervenir dans de bonnes conditions climatiques qui ne compromettent pas le rendement futur de la production (par exemple ne pas intervenir dans une parcelle trop humide car le sol sera alors tassé durablement). Par ailleurs, la capacité pour l'agriculteur à intervenir dans ces conditions est fonction : 1. des ses ressources en travail de l'exploitation (matériel et main d'œuvre) qui lui permettent ou non de réaliser plusieurs tâches séquentiellement ou simultanément, à une vitesse plus ou moins importante ; 2. des conditions météorologiques et du type de sol qui vont déterminer les jours disponibles par type d'opération culturale, c'est à dire les jours permettant d'intervenir dans de bonnes conditions agronomiques (illustration : chantiers récolte automne dans de bonne / mauvaises conditions, figure 1). Le changement climatique peut donc avoir un double impact sur l'organisation du travail. D'une part il peut modifier la phénologie des espèces végétales cultivées (cf chapitre Climatier et vignes) et en conséquence les périodes d'intervention. D'autre part il peut modifier les jours disponibles : par exemple le décalage des précipitations en période automnale peut diminuer le nombre de jours où le sol est suffisamment ressuyé pour réaliser un semis. C'est ce point que nous avons étudié et que nous détaillons dans ce chapitre. L'objectif de notre approche est d'apporter des éléments prospectifs sur cette notion de jour disponible afin d'aider les agriculteurs et ceux qui les accompagnent, dans leur réflexion sur l'évolution de leurs exploitations agricoles à long terme. Jours disponibles : quelques notions

La notion de jour disponible est relativement ancienne. Dès 1848 (de Gasparin A.E.P., 1848) évalué les jours travaillables par un agriculteur en enlevant les jours qui ne permettent pas de rentrer dans la parcelle avec des animaux de trait (sol détrempé par exemple) et les jours qui ne permettent pas d'obtenir un résultat satisfaisant (labourer une terre gelée par exemple). On retrouve dans ces deux critères la formalisation des chercheurs anglo-saxons qui distinguent deux composantes de la disponibilité d'un jour pour les travaux agricoles : la « trajectabilité » (traffability) qui est la capacité d'un sol à fournir suffisamment de résistance à un engin

Quelles fermes d'élevage pour Midi-Pyrénées en 2050 ? Éléments de méthodes et aperçu des résultats

Guillaume Martin^{1*}, Benoît Felten¹, Marie-Angéline Maigne¹, Jean-Pierre Theau¹, Vincent Thérard¹, Michel Duru¹

¹ : INRA, UMR 1248 AGIR, F-31326 Castanet Tolosan, France
*: courriel: guillaume.martin@oumhouise.inra.fr ; téléphone: 05 61 28 54 52

Le changement climatique est une source de changements de natures différentes (climatique, socio-économique, institutionnel). Afin d'assurer leur pérennité, les fermes d'élevage doivent s'adapter à ces changements pour en atténuer les conséquences néfastes et exploiter les opportunités qu'ils génèrent. Afin de mieux comprendre les adaptations mises en œuvre par le monde agricole, nous avons conduit une étude prospective à l'horizon 2050 en Midi-Pyrénées dans le cadre du projet PSDR Climfour.

Travailler à l'horizon 2050 induit évidemment une incertitude élevée sur le contexte de l'élevage. Les connaissances nécessaires pour traiter ces questions sont fragmentaires, partielles. Les chercheurs seuls, de même que les acteurs du monde agricole seuls ne peuvent prétendre avoir une vision suffisamment intégrée de l'ensemble des éléments de contexte. Par conséquent, nous avons construit un dispositif de recherche participative avec un ensemble d'acteurs régionaux concernés par la problématique.

Notre travail s'est organisé en deux grandes phases, la première de scénarisation du contexte de l'élevage à l'horizon 2050, la seconde de conception de fermes d'élevage adaptées à ce contexte. Ces deux phases ont nécessité l'organisation d'ateliers de travail avec les acteurs du monde agricole et de réunions de travail entre chercheurs visant à analyser et synthétiser le contenu d'un atelier participatif et à préparer le suivant. Elles se sont appuyées sur l'élaboration de divers supports de réflexion visant à alimenter les analyses et stimuler les discussions au cours des ateliers.

Pour la première phase de notre travail, seul le scénario climatique A1B du GIEC a été retenu dans la mesure où les différences entre scénarios climatiques sont minimes à l'horizon 2050. En parallèle, deux scénarios de possibles changements de contexte en Midi-Pyrénées ont été élaborés avec des acteurs institutionnels, industriels et associatifs. Des scénarios narratifs préexistants pour la filière lait en Midi-Pyrénées ont été discutés, restructurés et enrichis. Le premier scénario dit « global » repose sur la poursuite d'une libéralisation des échanges à l'échelle mondiale nécessitant à l'échelle locale un renforcement de la compétitivité de l'élevage, par exemple par la production de lait à haute valeur technologique (par ex. à destination de l'industrie cosmétique). Le second scénario dit « local » s'appuie sur la possibilité d'une relocalisation de la production agricole conjuguée à de fortes attentes sociétales vis-à-vis de l'agriculture qui sont rémunérées. A l'échelle locale, l'élevage est donc comptifié dès lors qu'il satisfait ces attentes.

Les deux scénarios ont ensuite été développés pour aboutir à des types de fermes d'élevage viables économiquement. A partir d'un modèle conceptuel d'un système d'élevage élaboré par les chercheurs, les acteurs impliqués dans les ateliers ont définis les principales caractéristiques de ces types de fermes d'élevage, à savoir le revenu de l'éleveur, la surface agricole utile, la taille du troupeau, etc. Différentes analyses réalisées par les chercheurs à l'issue des ateliers ont permis de s'assurer de la cohérence des types de fermes d'élevage élaborés, en vérifiant par exemple l'adéquation entre les charges opérationnelles, le prix du lait et le revenu de l'éleveur.

La seconde phase de notre travail a débuté par la comparaison du climat passé et du scénario climatique pour 2050 retenu afin de caractériser l'ampleur du changement induit. Des

simulations ont ensuite été réalisées à l'aide de modèles de croissance de l'herbe et de modèles de cultures pour estimer l'effet du changement climatique sur la production fourragère et le rendement des cultures. Pour les prairies, la distribution saisonnière de la croissance et les contraintes agronomiques telles que la portance des sols ont été évaluées. Ces analyses ont ensuite été présentées et discutées au cours d'ateliers avec des acteurs du développement agricole et des éleveurs. Ainsi, en exprimant les conséquences du changement climatique en termes de conséquences sur la production fourragère, les éleveurs ont significativement mieux mesuré son ampleur. S'en est suivie la présentation des scénarios et en particulier des types de fermes d'élevage adaptées à chaque scénario élaborés par le premier groupe d'acteurs.

Le processus de conception de fermes d'élevage *per se* s'est appuyé sur un jeu de plateau utilisant des modèles de simulation, le rami fourrager. Ce jeu se compose entre autres de baguettes correspondant à une diversité de combinaisons entre des types de prairies ou des cultures fourragères et leurs modes de gestion (par ex. pâturage ou fauche puis pâturage). Elles représentent, pour un contexte pédoclimatique donné, la disponibilité en fourrages utilisables pour le pâturage ou la constitution de stocks au fil de l'année. Les scénarios définissant la productivité et la taille du troupeau, concevoir un système revient alors à déterminer une date de vêlage, un ensemble de rations, puis à sélectionner un nombre limité de baguettes et à leur allouer des surfaces. Les joueurs procèdent donc de façon itérative, et ce jusqu'à identifier l'assemblage de types de prairies et de cultures fourragères et leurs modes de gestion qui permettent de satisfaire les besoins alimentaires du troupeau. Les discussions autour du processus de conception permettent de préciser les modalités de gestion des fermes d'élevage conçues, et de discuter leur faisabilité compte tenu des contraintes sur l'utilisation des surfaces, la disponibilité de la main d'œuvre, etc.

Cette démarche a été mise en œuvre pour des fermes d'élevage herbager de bovins laitiers et allaitants situés respectivement en piémont pyrénéen et en moyenne montagne pyrénéenne. Il en ressort que les changements envisagés modifient profondément le projet de production, la structure et la gestion de ces fermes. Par exemple, avec le scénario « local », les fermes d'élevage de bovins laitiers répartiraient les vélages sur l'année alors que les éleveurs les groupent à l'automne à l'heure actuelle. Le maïs fourrager représente actuellement environ un tiers des surfaces. Il serait entièrement remplacé par des prairies. Ces prairies étant rendues plus précoces par le changement climatique, la part des prés de fauche pâturés en début de printemps s'accroîtrait fortement pour mieux maîtriser la croissance de l'herbe. Les discussions entre éleveurs se projetant à l'horizon 2050 qui accompagnaient cette réflexion les ont conduits à pointer l'intérêt de cultures fourragères et de modes de gestion pour s'adapter dès aujourd'hui au changement climatique.

Pour en savoir plus :

Martin, G., Felten, B., Duru, M., 2011. Forage rummy: A game to support the participatory design of adapted livestock systems. *Environmental Modelling & Software* 26, 1442-1453.

Duru, M., Felten, B., Theau, J.P., Martin, G., 2011. Designing and evaluating supports for enhancing learning about adaptation of grassland-based livestock systems to climate change. Accepted in *Regional Environmental Change*.

Felten, B., Duru, M., Martin, G., Sautier, M., 2011. Changement climatique en Midi-Pyrénées et conséquences sur la croissance de l'herbe. Disponible à : <http://www4.inra.fr/psdr-midi-pyrenees/Projets-de-recherche/CLIMFOURTEL/telechargement>

Felten, B., Martin, G., Theau, J.P., Thenard, V., Maigne, M.A., Duru, M., 2010. Conception de systèmes d'élevage adaptés au changement climatique. Disponible à : <http://www4.inra.fr/psdr-midi-pyrenees/Projets-de-recherche/CLIMFOURTEL/telechargement>

agricole et à ne pas subir de tassement sous le poids de celui-ci, et la « travailabilité » (workability) qui désigne l'aptitude d'un sol à produire un résultat agronomiquement souhaitable sous l'action des outils mécaniques. (Rounsevell M.D.A., 1993)

Par ailleurs, dès 1955 (Kreher G., 1955)¹ pose que les jours disponibles varient selon :

- la nature des travaux à effectuer, puisque tous ne sont pas sensibles de la même manière aux conditions météorologiques ;
- les conditions météorologiques ;
- les sols, dont la nature et la structure conditionnent le fonctionnement hydrique et mécanique ;
- les équipements, dont les puissances et les capacités sont très variables.

Diverses approches d'estimation des jours disponibles ont été mises en œuvre progressivement depuis les années 60. Tout d'abord une estimation par observation directe réalisée par les agriculteurs (Reboul, C., 1964). Les statistiques sur les jours disponibles ainsi obtenus ne sont alors pas extrapolables à d'autres climats et d'autres sols. Puis des relations statistiques entre les jours disponibles observés et la pluviométrie ont été proposées (Al Hamchari, M.-C. et al., 1975). Dans ce cas une extrapolation avec d'autres séries pluviométriques est envisageable, mais les relations établies sont dépendantes du type de sol sur lequel ont été réalisées les notations de jours disponibles. Enfin, des modèles simulant les jours disponibles sur la base d'une modélisation du fonctionnement hydrique du sol ont été mis au point (Earl, R., 1997). Avec ces modèles une extrapolation est possible dans des situations pédo-climatiques différentes de celles ayant permis le développement initial du modèle. C'est cette approche que nous avons adoptée dans les deux cas d'étude que nous présentons.

Cas d'étude Bretagne

Nous présentons ici les résultats d'une étude que nous avons réalisés sur les cultures de maïs, de blé et les prairies, qui sont les trois occupations du sol principales de Bretagne, et en particulier des systèmes de polyculture-élevage laitiers qui dominent parmi les systèmes d'exploitation bretons. Nous exposons dans une première partie la méthode mise en œuvre et dans une seconde partie les résultats.

Méthode

Pour simuler les jours disponibles nous avons utilisé le modèle Jdispo développé par Arvalis (Gillet J.P., 1992). Il simule d'une part l'humidité journalière du sol en faisant le bilan journalier entre les précipitations, l'évapotranspiration, le stockage dans le sol et le transfert entre les différents compartiments du sol (Figure 2). D'autre part en fonction de cette humidité du sol simulée et des données météorologiques, il détermine si le jour est conseillé pour une opération culturale donnée, à risque ou déconseillé.

¹ Ce travail de Kreher est connu grâce à sa traduction et son étude réalisées par Claude Reboul en 1960 ; le texte

C. Reboul traduit étant cependant introuvable, les travaux attribués ici à Kreher sont tels qu'ils sont rapportés par dans ses articles ultérieurs.

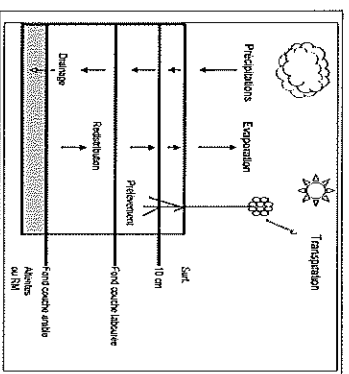


Figure 2. principe de simulation de l'humidité journalière du sol par le modèle Jédispo.

Les jours disponibles ont été simulés de 1970 à 2059 avec le scénario climatique A1B. Nous considérons trois périodes de 30 ans : le passé récent (1970-1999), le futur très proche (2000-2029) et le futur proche (2030-2059).

Nous avons travaillé sur un cas d'étude situé au nord de l'Ille-et-Vilaine, au sein du dispositif de recherche de la Zone Atelier d'Armorique². Il s'agit d'une zone où la production laitière domine. Nous disposons à la fois de données sur les sols permettant de paramétrer le modèle Jédispo et d'une régionalisation du scénario climatique A1B (station météorologique de Louvigné-du-Désert) nécessaire pour réaliser les simulations. Les deux sols considérés dans l'analyse sont : 1. un brunisol sain et profond (2,6 m en moyenne) et 2. un brunisol sain et superficiel (0,3 m en moyenne). Ces deux sols représentent xx % des sols de la ZAA.

Le choix des pratiques sur lesquelles l'analyse a porté a été raisonné en fonction des observations faites par les climatologues (lien partie climat). Ils ont montré en particulier que dans le Grand Ouest, les simulations avec le scénario A1B entraînent un décalage des précipitations à l'automne et au printemps, le tout couplé à une augmentation des températures. Nous avons donc focalisé notre étude sur les jours disponibles pour :

I. L'implantation et la récolte du maïs, en distinguant la récolte du maïs ensilage et celle du maïs grain.

II. L'implantation du blé en distinguant une période d'implantation précoce et une autre tardive. Nous n'avons pas considéré la récolte du blé qui a lieu en été, période durant laquelle à la fois la diminution des précipitations et l'augmentation des températures créent des conditions plus sèches et entraînent de fait une augmentation des jours disponibles pour cette opération culturale.

III. La récolte de l'herbe nécessitant un temps de séchage court (2 jours) ou long (5 jours) : nous avons pris en compte plusieurs périodes, y compris des périodes allant au-delà des périodes habituelles de récolte de l'herbe, à savoir le début de printemps et l'automne.

Résultats

² <http://osur.univ-rennes1.fr/zoneatelier-armorique/>

Les figures 4 à 7 récapitulent les résultats pour les trois types de production végétale. Dans chaque figure est rapporté le nombre de jours disponibles (cumulant les jours conseillés et à risque) pour chaque pratique analysée, ceci pour les 3 périodes, à savoir passée récente (PR), futur très proche (FTP) et futur proche (FP). Les résultats pour les jours conseillés seuls sont mentionnés dans le texte mais non reportés dans les figures. Nous ne présentons que les résultats pour le brunisol sain et profond, car les simulations donnent des résultats très proches pour le second sol superficiel. Les résultats se basent sur une analyse fréquentielle des 30 années de simulation de chaque période. Deux informations sont rapportées pour chaque des pratiques: le nombre minimum de jours disponibles 5 années sur 10 (dit dans la suite « fréquence disponibles ») et 8 années sur 10 (dit très fréquemment disponibles). Si nous prenons l'exemple de la figure 4 et du premier groupe d'histogramme concernant le semis du maïs sur la période d'avril :

- le premier histogramme indique que sur la période PR on pouvait avoir très fréquemment au moins 13 jours disponibles ;
- à l'inverse, le second histogramme indique que sur la même période il y eu fréquemment au moins 24 jours disponibles.

La fréquence 8 années sur 10 est généralement celle utilisée en terme de conseil pour le raisonnement de l'organisation du travail au sein de l'exploitation agricole. Les ressources en main d'œuvre et matériel sont généralement calibrées afin de garantir une certaine assurance de réalisation des chantiers dans de bonnes conditions agronomiques. La fréquence 1 année sur 2 donne une indication sur un nombre de jours disponibles sur lequel l'agriculteur peut compter mais avec un risque non négligeable de ne pas les observer. En reprenant l'exemple précédent, il indique que l'agriculteur peut très fréquemment compter sur 13 jours pour semer le maïs, mais qu'il aura fréquemment plus de souplesse, puisque au moins 11 jours disponibles de plus.

Résultats pour la culture du maïs

Concernant l'implantation du maïs les conditions devraient nettement s'améliorer puisque l'on passerait, 8 années sur 10, de 13 à 24 jours disponibles entre la période PR et FP. Dans le futur proche il y aurait plus de 30 jours disponibles une année sur deux. A noter que l'amélioration sera aussi importante pour les jours conseillés, puisqu'on passerait, 8 années sur 10 de 5 à 18 jours disponibles.

Pour la récolte, que ce soit en ensilage ou en grain le nombre de jours disponibles est important. On observerait pour les deux fréquences, une diminution dans le futur très proche, plus marquée pour la récolte en grain et une augmentation dans le futur proche, significative par rapport au futur très proche mais faible au regard du passé récent. Si on considère les jours conseillés, la situation resterait favorable pour l'ensilage puisque il y a 10 à 15 jours de moins, ce qui conduirait au pire à 25 jours disponibles 8 années sur 10 dans le FTP. En revanche pour la récolte en grain il n'y aurait que 5 jours disponibles conseillés pour le FTP, 8 années sur 10. La situation changerait donc peu pour les récoltes de maïs, contrairement au semis, si ce n'est dans le FTP pour la récolte en grain, en ne considérant que les jours conseillés.

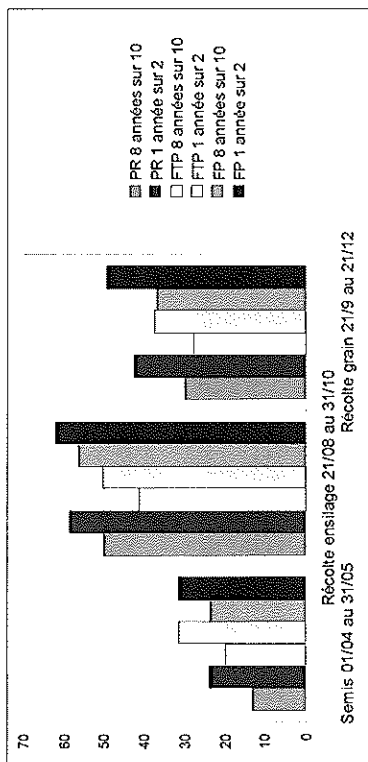


Figure 4. Résultats de simulation des jours disponibles pour la culture du maïs

Résultats pour la culture du blé

Concernant l'implantation du blé, le constat général est que les conditions devraient faiblement s'améliorer dans le futur lointain avec une légère dégradation dans le futur très proche. Par exemple pour un semis précoce, on aurait 8 années sur 10 et par rapport au passé récent, une diminution des jours disponibles de 4 jours dans le FTP et une augmentation de 4 jours dans le FP. La diminution est plus marquée une année sur deux (moins 6 jours). Les résultats portant sur les jours conseillés seuls font ressortir une différence de 10 jours par rapport au cumul jours conseillé et à risque : ainsi 8 années sur 10 dans le FTP il n'y aurait que 4 jours disponibles.

L'autre résultat important est que pour un semis tardif, 8 années sur 10 la situation peu favorable du PR le reste dans le FTP et FP : on passerait respectivement de 4 à 3 puis 6 jours disponibles. Dans le FP on pourrait compter sur 15 jours disponibles, mais seulement une année sur deux. Les résultats sur les jours conseillés ne montrent également aucun changement : aucun jours disponibles 8 années sur 10 et seulement 1 à 2 jours disponible 1 année sur 2, ceci sur les trois périodes.

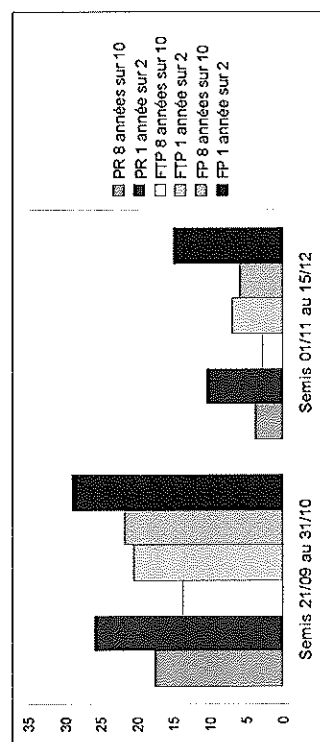


Figure 5. Résultats de simulation des jours disponibles pour l'implantation du blé.

Résultats pour les prairies

Concernant les récoltes nécessitant un temps de séchage court (ici 2 jours) nous avons testé le cas de récoltes plus précoces en mars, en lien avec une augmentation de la productivité des prairies à cette période. Le résultat est qu'il n'y aurait quasi pas de changement, sinon une dégradation dans le futur très proche : 8 années sur 10 on aurait en effet 3 jours de moins. A une période habituelle d'ensilage d'herbe (avril à mi-mai), le nombre de jours disponibles devrait en revanche augmenter, avec plus 6 jours disponibles 8 années sur 10 dans le FP par rapport au passé.

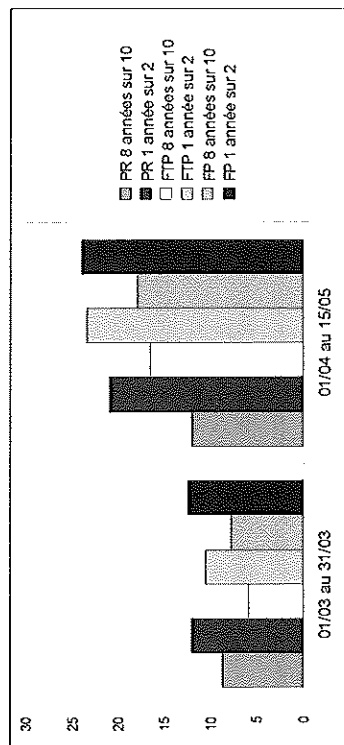


Figure 6. Résultats de simulation des jours disponibles pour la récolte d'herbe – séchage 2 jours.

Concernant une récolte en foin avec un temps de séchage de 5 jours, le résultat le plus marquant est une augmentation significative des jours disponibles qui pourrait avoir lieu sur la période estivale. Mais il est à noter que c'est également à cette période que la productivité des prairies devraient diminuer. Sur les deux autres périodes, on peut noter une légère augmentation 8 années sur 10 entre le passé récent et le FP, sur la période du 15/07 au 14/07. Sur cette même période l'augmentation est plus marquée 1 année sur 2 et ce surtout dans le FTP. Sur la période automnale, 8 années sur 10, on note peu de différence entre les le PR, FTP et FP.

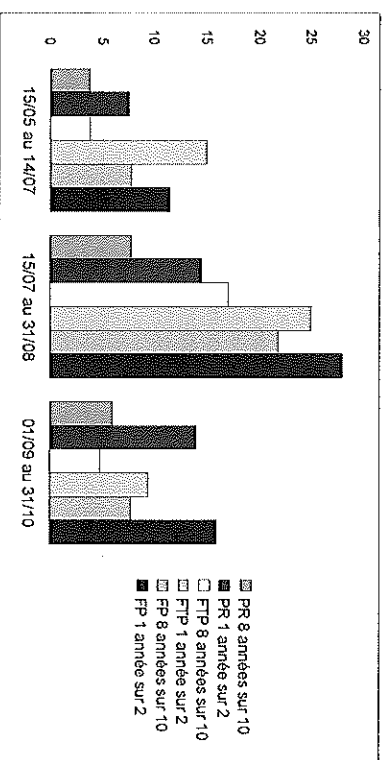


Figure 7. Résultats de simulation des jours disponibles pour la récolte d'haube – scéjage 5 jours .

Les JAD en viticulture dans un contexte climatique en rapide évolution.

Le climat et ses fluctuations sont une composante essentielle du travail du viticulteur. Tout l'art de ce dernier consiste justement à adapter ses pratiques pour tirer le meilleur parti des conditions météorologiques de l'année. C'est cette variabilité climatique interannuelle qui permet de distinguer des millésimes plus ou moins fameux. Ce lien est aujourd'hui exprimé à travers les variables de fonctionnement de la vigne – la précocité, l'alimentation en eau et le potentiel de vigueur – qui synthétisent l'influence des facteurs naturels de l'environnement sur la vigne et permettent d'estimer le potentiel de récolte (Mariat, R. et al., 2001).

Cependant, le changement climatique en cours risque de bouleverser les pratiques des viticulteurs. Depuis 1946, dans le vignoble du Val de Loire, la température moyenne a augmenté significativement de 1,3°C, tandis que les températures minimales et maximales se sont élevées respectivement de 1,4°C et 1,2°C (Neeching, G., 2010). De nombreux viticulteurs en Europe perçoivent déjà une augmentation de la fréquence des épisodes de sécheresse, des saisons végétatives plus longues et plus chaudes, et de manière générale des événements extrêmes plus fréquents (Battaglini A. et al., 2009).

Or une question a jusqu'à présent été laissée en suspens : celle de la faisabilité des pratiques viticoles sous de nouvelles conditions climatiques. En effet, comme toutes les pratiques agricoles, les pratiques viticoles sont soumises à des contraintes météorologiques qui déterminent le nombre de jours disponibles (JAD) pour travailler dans des conditions agronomiquement correctes. Les JAD n'avaient jamais été étudiés pour la vigne.

Une étude a donc été conduite en moyenne vallée de la Loire en 2011 avec deux objectifs : 1) évaluer l'impact de la variabilité climatique sur la fréquence et la répartition des JAD pour les pratiques viticoles 2) anticiper les variations à venir de ces JAD, sur la base de scénarios climatiques futurs.

Des pratiques viticoles nombreuses, plus ou moins sensibles aux aléas du climat

Dans une première étape, une enquête a été menée auprès des viticulteurs des appellations Anjou et Saumur, avec deux objectifs : 1) produire des références sur la sensibilité des pratiques viticoles aux aléas météorologiques ; 2) recueillir les données nécessaires au paramétrage des futurs modèles de JAD. L'enquête, élaborée avec des techniciens viticoles, portait sur une liste de 21 pratiques et trois modes de production : conventionnel, raisonné et biologique.

L'enquête a été menée auprès d'un échantillon de douze viticulteurs représentant les trois modes de production cités précédemment et la diversité des tailles d'exploitation : il était par ailleurs composé de viticulteurs ayant une réputation de bons praticiens, ce qui permet de formuler l'hypothèse qu'ils savent déterminer la meilleure période de travail ainsi que les meilleures conditions agronomiques pour chaque pratique.

L'enquête a révélé que les viticulteurs sont confrontés à un risque météorologique varié tout au long du cycle de la plante. Alors qu'en grandes cultures, la question de la portance des sols est centrale pour l'évaluation des jours disponibles, en viticulture de nombreuses opérations sur les parties aériennes de la plante sont pratiquées. Pour ces pratiques la portance des sols peut être moins prédominante, et d'autres contraintes météorologiques spécifiques interviennent. Dans ce contexte, le viticulteur peut rencontrer des situations critiques qui l'amènent à intervenir quand bien même les conditions ne sont pas favorables : c'est le cas des traitements phytosanitaires mais aussi des vendanges qui constituent l'aboutissement de l'itinéraire technique viticole.

Au terme de cette enquête, une pratique est apparue comme étant particulièrement sensible aux facteurs météorologiques, tous modes de production confondus : les traitements phytosanitaires. C'est donc cette pratique que nous avons retenue comme cadre à la modélisation des JAD.

Construction et paramétrage d'un modèle pour les traitements phytosanitaires

La majorité des traitements appliqués à la vigne, quel que soit le mode de production, vise deux maladies : le mildiou (*oomycète, Plasmopara viticola*) et l'oïdium (*champignon, Erysiphe necator*), susceptibles de sévir pendant toute la période végétative. Ce sont donc ces traitements que nous avons choisis de modéliser.

Les modalités d'application des traitements varient en fonction du mode de production, du risque épidémiologique et du niveau de risque accepté par les viticulteurs. En viticulture biologique seuls les produits de contact sont autorisés, tandis qu'en viticulture raisonnée ou conventionnelle les viticulteurs peuvent recourir aux produits systémiques, ce qui induit des stratégies d'application très différentes. Dans le cadre de notre modèle de JAD, nous ne cherchons pas à modéliser les dates d'intervention pour une protection optimale de la vigne, mais simplement les jours qui permettent une application agronomiquement correcte.

Les données de l'enquête ainsi que la recherche de références auprès des organismes techniques ont permis de définir des conditions agronomiquement correctes valables pour la plupart des produits considérés :

- une durée d'humectation faible voire nulle,
- une pluviométrie nulle pendant le traitement et 3h après le traitement,
- une température comprise entre 10°C et 22°C,
- une hygrométrie comprise entre 60% et 95%.

- une vitesse du vent inférieure à 19 km/h selon la réglementation, mais dans la pratique inférieure à 12 km/h voire 10 km/h afin de limiter réellement la dérive des produits (Henriot, F., 2003) (DRAF/SRPV DE LORRAINE, 2002).

Les viticulteurs traitent de préférence le soir ou au petit matin, périodes qui sont le plus fréquemment favorables, comme le démontrent les relevés de la station météorologique de Montreuil-Bellay (Figure). Nous avons donc défini deux plages horaires privilégiées pour les traitements : le matin de 5:00 à 10:00 et le soir de 19:00 à 00:00. Une journée est considérée comme disponible si au moins une des deux plages est disponible. Une plage horaire est disponible si, au cours de celle-ci, les variables climatiques se maintiennent à l'intérieur des valeurs seuils (Tableau 2).

Tableau 2. Paramètres et valeurs seuils du modèle

Paramètre	Unité	Limite inférieure	Limite supérieure
Durée d'humectation totale	h	-	0
Pluviométrie totale	mm	-	0
Température moyenne	°C	10	22
Hygrométrie moyenne	%	60	95
Vitesse moyenne du vent	km/h	-	12
Pluviométrie après 3h	mm	-	0

Le modèle a été appliqué aux données de la station INRA de Montreuil-Bellay de 1998 à 2010, sur la période du 1^{er} avril au 31 août. Les résultats montrent une grande variabilité du nombre de JAD, allant de 55 JAD pour l'année 2001 à 104 JAD pour 2009. Pour 2009, ces JAD se décomposent en 53 journées entières et 71 demi-journées isolées, soit un total de 137 demi-journées disponibles ; l'année 2001 offre proportionnellement moins de journées complètes (seulement 4, pour un total de 59 demi-journées).

En moyenne sur les treize années étudiées, la durée d'humectation est de loin le facteur le plus problématique avec 46% des occurrences de facteurs défavorables (graphique 2. Contribution des facteurs météorologiques aux occurrences défavorables (part du nombre total d'occurrences défavorables) dans les scénarii U60 et U80.). Les années les plus sèches (2005, 2006, 2010) semblent moins affectées par ce facteur. La température et la pluviométrie contribuent aux journées défavorables à proportions équivalentes (19% et 17%), suivies de l'hygrométrie (13%) et, en dernière position, du vent (5%).

Figure 2. Contribution des facteurs météorologiques aux occurrences défavorables (part du nombre total d'occurrences défavorables) dans les scénarii U60 et U80.

Validation du modèle pour les traitements phytosanitaires

Les JAD modélisés ont été comparés avec les dates des traitements anti-oidium et mildiou réalisées à Montreuil-Bellay depuis 1999. Sur un total de 115 traitements effectués, 32% l'ont été dans des jours considérés comme non disponibles d'après le modèle. La durée d'humectation représente 47% des occurrences de facteurs défavorables impliqués dans ces erreurs. Or ce paramètre n'est pas consensuel et une rosée fine peut être considérée comme

favorable. Par ailleurs, 46% des erreurs peuvent s'expliquer par des contraintes de temps entraînant des situations d'urgence : période de congés (16%) ou longue succession de jours indisponibles (30%). Ces éléments permettent de considérer que le modèle reproduit bien les critères d'appréciation des viticulteurs bons praticiens, sans toutefois reproduire les processus de décision qui peuvent les conduire à abaisser ces critères.

Les JAD à Montreuil-Bellay dans la perspective du changement climatique

Dans un dernier temps, l'étude a abordé la question de l'évolution des JAD au regard des scénarios climatiques futurs. Cependant, les modèles climatiques actuels ne fournissent pas de données simulées suffisamment précises pour utiliser le modèle JAD à cette fin.

Les données simulées peuvent en revanche servir à créer des variables synthétiques qui permettent de comparer des années entre elles (ex. la pluviométrie annuelle). Il est donc envisageable de créer plusieurs de ces variables synthétiques pour décrire le climat des années futures entre le 1^{er} avril et le 31 août et procéder de même avec les années réelles. Or nous disposons des JAD calculés pour les années 1998 à 2010, qui présentent des situations climatiques contrastées. Nous formulons alors l'hypothèse qu'en comparant le climat des années futures avec celui des années 1998-2010, nous pourrions en déduire le nombre de JAD pour les années futures.

Les données simulées utilisées sont issues du scénario climatique A1B du GIEC qui est, parmi les six élaborés par le GIEC, le plus conforme aux prévisions de l'Agence internationale de l'énergie. Les variables brutes exploitables sont la pluviométrie, la température minimale et la température maximale journalières.

Quatre variables ont été élaborées à partir de la pluviométrie : la pluviométrie totale (RR), le nombre de jours de pluie (JRR), l'indice de répartition de la pluviométrie (IRR), l'indice de répartition des jours de pluie (IJRR).

Trois variables ont été élaborées à partir des températures : le nombre de jours où la température minimale est inférieure à 10°C (JTh10), le nombre de jours où la température maximale est supérieure à 27°C (JT>27), la somme des températures supérieures ou égales à 10°C (ST10). Les indices JTh10 et JT>27 peuvent être interprétés respectivement comme le nombre de matinées fraîches et d'après-midi chauds.

Les sept descripteurs ainsi définis ont été calculés pour les années observées 1998-2010 et les années simulées 1960-2100.

Des analyses statistiques appropriées ont permis d'identifier des groupes d'années qui se ressemblent du point de vue climatique, matérialisés sur la figure. L'axe 1 représente de gauche à droite la flèche du temps mais également des températures croissantes et des pluviométries décroissantes ; l'axe 2 représente, de haut en bas, un nombre croissant de matinées fraîches.

Fig. 3. Représentation des groupes d'années simulées et réelles (ces dernières en rouge)

Un élément remarquable est l'absence d'années réelles pour représenter les groupes 4 et 7. Or, parmi les 36 années que contiennent ces deux groupes, 30 se situent après 2050. Autrement dit, aucune des années vécues entre 1998 et 2010 ne peut donner une représentation du climat très chaud et sec qui sera le plus fréquent à la fin du siècle, d'après le scénario A1B. Même l'année 2003, avec ses grandes chaleurs, reste en-deçà de ces deux groupes.

Les cinq groupes restant contiennent chacun au moins une année réelle et donc un nombre de JAD de référence. Dans le tableau, les années réelles ont été ordonnées en fonction de leur nombre de JAD et répétées par une couleur en fonction de leur groupe d'appartenance.

Tableau 3 : années classées par nombre décroissant de JAD et identifiées par leur groupe climatique d'appartenance.

La tentative pour en déduire un nombre de JAD représentatif de chaque groupe n'est pas concluante pour au moins deux raisons : d'une part, certains groupes climatiques, comme le groupe 3, sont trop peu représentés par des années réelles pour pouvoir tirer des conclusions fiables quant au nombre moyen de JAD ; d'autre part, la méthode de caractérisation du climat employée omet de toute évidence des facteurs importants de différenciation entre années : les groupes apparaissent étagés dans le classement des JAD ; le groupe 5, notamment, contient à la fois les meilleures et les pires années en termes de JAD.

Conclusion

Nos résultats pour le cas d'étude Breton montre que la situation resterait favorable au maïs avec une augmentation des JAD pour l'implantation et un niveau élevé de jours disponibles à l'automne même si une baisse pourrait se produire dans le FTP. Pour le blé les conditions d'implantation ne devraient que peu changer, ceci surtout pour des semis après le 1^{er} novembre. Enfin, concernant la prairie, l'évolution des jours disponibles ne suivraient pas la même logique que l'évolution de la productivité des prairies. En mars, aurait lieu une forte augmentation de la productivité (cf climato) et on observerait une stabilité des JAD à un niveau inférieur à 10 JAD 8 années sur 10, voir proche de 5 dans le FTP ; en été le nombre de JAD augmenterait fortement alors que la productivité des prairies serait en forte baisse.

A titre de comparaison (Cooper, G. et al. 1997) pour différentes situations pédo-climatiques en Ecosse ont simulés des tendances en partie comparables, à savoir : 1. une légère augmentation des JAD au printemps, ce qui rejoint nos résultats avec une amplitude moindre ; 2. en hiver une réduction significative des JAD due à une augmentation forte de la pluviométrie dans leur modèle climatique

Si ces tendances se confirment pour le maïs on peut penser que des semis plus précoces de maïs avec des variétés plus tardives pourront avoir lieu, à condition que l'augmentation des jours disponibles pour le semis soit également répartie sur la période d'avril-mai. Les simulations réalisées ne nous permettent pas de le vérifier compte tenu de l'incertitude sur les projections climatiques quotidiennes. Pour les prairies le développement de variétés plus résistantes à la sécheresse permettrait de maintenir un niveau de production en été et d'utiliser la souplesse des nombreux jours disponibles pour récolter du foin. Par ailleurs, pour intervenir rapidement en dehors des périodes favorables, comme le début de printemps, lorsque l'augmentation de productivité des prairies sera significative, un raisonnement des sera à conduire.

Concernant les résultats portant sur la vigne, la période 1998-2010 qui a servi de référence à cette étude, bien que restreinte, constitue tout de même un échantillon représentatif de la variabilité du climat actuel, allant du très frais et pluvieux au très chaud et sec. Pourtant, aucune de ces années n'est semblable à celles prédites par le scénario A1B après 2050. A cet horizon, il est difficile de prévoir quels seront les besoins des viticulteurs en matière de protection phytosanitaire. Les modèles de prévision des maladies en cours de développement (notamment à l'Institut français de la vigne et du vin – IFV) fourniront certainement des indications. D'ici là, le climat restera la plupart du temps dans la gamme de

variation connue jusqu'à présent et on peut raisonnablement penser que les JAD évolueront eux aussi dans la fourchette connue.

La modélisation des JAD nous a également appris que, sur la zone Ariège-Saumur, la durée d'humectation est le facteur le plus problématique pour les traitements phytosanitaires. Nous concevons alors que la modélisation des JAD peut, entre les mains des organismes de recherche sur les techniques et les matériels viticoles, devenir un formidable outil d'innovation. Nous pouvons imaginer développer des solutions techniques adaptées aux contextes locaux dans un effort de recherche dynamique au fur et à mesure que le climat évolue. Le préalable à tout cela reste, évidemment, l'amélioration des modèles climatiques et la mise à disposition de données simulées toujours plus précises.

Globalement ce travail a montré que la notion de jour agromonomiquement disponible constitue un indicateur sensible aux changements climatiques tels que modélisés par les climatologues. En ce sens il devrait permettre aux agriculteurs et plus largement au développement agricole d'intégrer le changement climatique dans leur raisonnement stratégique sur les orientations de leur système d'exploitation. Toutefois, nous ne le dirons jamais assez, ces résultats sont emprunts d'incertitude liée aux modèles climatiques, leur régionalisation et leur discrétisation au pas de temps journalier. En aucun cas ces résultats ne doivent être pris comme des prévisions, mais bien comme des tendances pour aider à réfléchir au futur. Par ailleurs la signification des ces résultats est à raisonner en fonction des évolutions des structures des exploitations. Comme nous l'avons souligné en introduction de ce chapitre, l'organisation du travail n'est pas qu'une question de jours disponibles. Si dans le futur les exploitations continuent de s'agrandir et la main d'œuvre agricole de diminuer, la situation au travail des agriculteurs pourrait se dégrader malgré une augmentation des jours disponibles.

Bibliographie

- Al Hamehri, M.-C., Desbrosses, B., Maamoun, M., 1975. Evaluation des jours disponibles à partir de statistiques météorologiques : un exemple dans le département de l'Aube. *Economie rurale* 106, 5-7.
- Battaglini A., Barbeau, G., Bindi, M., Badeck, F.W., 2009. European winegrowers' perceptions of climate change impact and options for adaptation. *Regional Environmental Change* 9, 61-73. fluence of a Changed Climate on Soil Workability and Available Workdays in Scotland
- Cooper, G., McGeachan, M.B., Vinten, A.J.A., 1997. The In nd. *ournal of Agricultural Engineering Research* 68, 253-269.
- DRA/FRPV DE LORRAINE, 2002. La diffusion des produits phytosanitaires dans le milieu. *Ficheenvironnement n° 4*.
- Earl, R., 1997. 1997. Prediction of trafficability and workability from soil moisture deficit. 40: 155-168. Soil and Tillage Research 40, 155-168.
- de Gasparin A.E.P., 1848. Cours d'agriculture. Librairie agricole de la maison rustique. ed. Paris, France.
- Gillet J.P., 1992. Simulations : une méthode de calcul des jours disponibles. *Perspectives Agricoles* 172, 95-98.
- Henriot, F., 2003. Traitements phytosanitaires. Quelles sont les conditions optimales d'application ? *Perspectives agricoles* 289, 52-56.
- Kocher G., 1955. Leistungszahlen für Arbeitsvorschläge und Der Arbeitsvorschlag im Bauernhof. Studienges. f. Landwirtschaftl. Arbeitswissenschaft. ed.

- Morlat, R., Barbeau G., Asselin, C., 2001. Facteurs naturels et humains des terroirs viticoles français : méthode d'étude et valorisation. Etudes et recherches sur les systèmes agraires et le développement 32, 111-127.
- Neethling, G., 2010. La relation entre le milieu physique et la qualité des raisins : évolutions et perspectives (Mémoire de fin d'étude). International Master Vintage, Groupe ESA, Angers, France.
- Papy, F., 2001. Interdépendance des systèmes de culture dans l'exploitation., in: Modélisation Des Agroécosystèmes Et Aide à La Décision, Collection Repères. INRA Editions /CIRAD, pp. 51-74.
- Reboul, C., 1964. Temps de travaux et jours disponibles en agriculture. Economie rurale 61, 55-80.
- Rounsevell M.D.A., 1993. A review of soil workability models and their limitations in temperate regions. Soil Use and Management 9, 15-21.

Ces annexes sont à destination des instances d'évaluation et ne doivent pas être diffusées sans l'accord préalable écrit de leurs auteurs.

Changement climatique et ressource en eau.

Quelle représentation du changement climatique ? Quelle prise en compte dans la gestion locale des problèmes liés à la ressource en eau ?

Elisabeth Michel-Guilhou
Université de Brest – Université Européenne de Bretagne (UEB) – Centre de Recherches en Psychologie, Cognition et Communication (CRPCC – EA 1285) – Institut des Sciences de l'Homme et de la Société (ISHS) – 20 rue Duguesne, CS 93837, 29238 Brest cedex 3.
Elisabeth.Michel-Guilhou@univ-brest.fr

Introduction

Le thème du changement climatique occupe aujourd'hui la scène publique. Il est l'objet d'enjeux, de discussions et de débats au sein desquels certains militent pour des changements profonds compte tenu de la gravité du phénomène alors que d'autres, au contraire, affichent leur indécision voire leur scepticisme. Il n'existe par conséquent pas d'opinion majoritaire commune sur ce thème (Spence et Pidgeon, 2009) qui devient source de conflits selon les groupes et leurs prises de position. Au sein de la communauté scientifique, la réalité d'une évolution rapide du climat depuis la moitié du siècle dernier et son origine anthropique font consensus (Brenchin, 2003 ; Liverman, 2007 ; Oreskes, 2004). Mais malgré les alertes scientifiques, la gravité du phénomène apparaît minorée par les personnes non scientifiquement averties, notamment en rapport à d'autres problèmes environnementaux dont les conséquences locales sont jugées plus importantes (Spence et Pidgeon, 2009) et plus immédiates. Les dimensions spatiale, temporelle et culturelle jouent alors un rôle majeur dans l'évaluation des questions environnementales et de leurs conséquences. Une analyse tenant compte de ces dimensions s'avère par conséquent indispensable pour comprendre la manière dont les individus s'approprient ce concept scientifique. C'est l'objet de cet article qui appréhende le changement climatique sous l'angle de la psychologie sociale et environnementale.

Concevoir le rapport de l'homme au changement climatique : Une approche psychosociale et environnementale

La psychologie environnementale s'intéresse au rapport de l'homme à son environnement. Elle se définit ainsi par l'étude du bien-être et du comportement humain en relation avec son environnement physique et social, et prend en considération la dimension temporelle et culturelle dans l'explication des transactions entre l'homme et son environnement (Legendre, 2005 ; Moser, 2009 ; Stokols et Altman, 1987). En ce sens, les caractéristiques sociales et physiques de l'espace mais également les facteurs individuels et sociaux tels que les représentations, les valeurs, les attitudes ou les appartenances de groupe en rapport à des comportements et la dimension temporelle sont pris en compte dans l'explication des rapports homme-environnement (Canter et Craik, 1981 ; Moser et Uzziell, 2003). La dimension temporelle, en relation avec la dimension spatiale, est particulièrement importante. Elle démontre toute la difficulté pour les individus de définir les problèmes environnementaux locaux en rapport aux problèmes environnementaux globaux (Uzzell, 2000) ainsi que leurs conséquences immédiates et à long terme (Hardin, 1968).

En outre, cette relation de l'homme à son environnement est médiatisée par notre représentation du monde. Cette représentation n'est pas individuelle mais sociale, c'est-à-dire qu'elle fait référence à des modèles collectifs de pensée, des façons d'appréhender le monde

collectivement. Ainsi, chaque personne, de par ses appartenances de groupe, se construit une représentation de la réalité qui lui permet de comprendre, d'interpréter, de maîtriser et de rendre signifiant le monde qui l'entoure. La théorie des représentations sociales a pour objet de comprendre et d'interpréter cette construction sociale de la réalité (Moskovic, 1976). En ce sens, cette approche s'intéresse à la manière dont les idéologies, les systèmes de croyances, de représentations, d'évaluations et de normes, autrement dit les systèmes de régulation justifient les rapports entre les groupes et les pratiques sociales. Elle cherche par conséquent à comprendre comment se construit la connaissance sociale et comment la pensée scientifique s'intègre au sens commun (Moskovic, 1976).

Les représentations sociales correspondent ainsi à différentes modalités de connaissances (e.g., éléments informatifs, cognitifs, normatifs, croyances) véhiculées par la société et partagées par un groupe social donné. C'est une forme de pensée sociale qui permet à l'individu d'appréhender son environnement et qui lui confère une vision du monde. Les représentations sociales sont donc une construction sociale de la réalité (Jodelet, 1999) qui a pour but de la rendre signifiante (Abric, 2001). Elles correspondent à la manière dont les membres d'un groupe se représentent mentalement un objet donné, abstrait ou concret. Elles sont dites « sociales » dans la mesure où elles sont le produit et le reflet de processus sociaux (e.g., interactions, communication de masse) et dans la mesure où elles sont partagées par les individus d'un même groupe auquel elles confèrent sa spécificité (Guineil, 1994). Par ailleurs, les représentations sociales sont fortement contextualisées et dépendent de l'ancrage social des groupes. Autrement dit, selon l'importance de l'enjeu pour les sujets, et selon leur insertion sociale, les prises de position individuelles envers l'objet varieront (Doise, 1992 ; Doise, 1985).

Le changement climatique étant source d'enjeux et de débats, mis en avant par certains groupes et minoré par d'autres, il ne peut être considéré comme une « réalité objective » et correspond de fait à une construction sociale de la réalité propre à chaque groupe. Il existe donc potentiellement autant de réalités que de communautés concernées par ce phénomène. Des études, basées sur la construction sociale de ce phénomène dans le sens commun, montrent un niveau modéré de connaissances des changements climatiques (Cabecinhas, Lázaro et Carvalho, 2008). En outre, lorsque le phénomène est comparé à d'autres problèmes environnementaux, il tend à être considéré comme moins important (Brenchin, 2003 ; Spence et Pidgeon, 2009). En conséquence, parce que les préoccupations des uns ne sont pas toujours celles des autres, lorsque les individus seront sollicités ou confrontés à ce sujet, ils activeront leurs propres représentations dépendantes de leur ancrage social (Doise, 1992).

Changement climatique et ressource en eau

Dans la continuité de ces études, la présente recherche s'intéresse à la manière dont ces acteurs, gestionnaires de l'environnement, se sont appropriés ce concept et plus particulièrement aux éventuelles variabilités individuelles qui peuvent apparaître entre eux selon leurs groupes d'appartenance. Ces acteurs locaux ont en charge l'élaboration et la mise en œuvre de Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE). Le SAGE est un document officiel qui définit les stratégies d'action et les pratiques à mettre en œuvre pour préserver localement la qualité de l'eau. L'objectif de ces gestionnaires est donc de définir les problèmes locaux et de proposer des actions pour les surmonter. Pour ce faire, ils se regroupent au sein d'une Commission Locale de l'Eau (CLE), constituée de 50% d'élus, 25% de représentants des usagers et 25% de représentants de l'Etat.

L'intérêt de travailler avec des acteurs, ayant en charge la gestion de l'eau, se justifie notamment par le lien scientifiquement attesté entre les modifications du climat et la ressource en eau (GIEC, 2007). Les scientifiques constatent ainsi une élévation du niveau de la mer. Ils constatent également une forte augmentation des précipitations dans certains

endroits du globe (par exemple dans le Nord de l'Europe) et une diminution dans d'autres endroits (par exemple en Méditerranée). Ces modifications du climat peuvent avoir des incidences sur la ressource en eau (problème de qualité de l'eau, de prolifération d'algues, d'intrusion d'eau salée, etc.). En outre, des suivis de longue durée témoignent de la réalité du changement climatique en Bretagne (Dupont et al., 2001 ; Jouan, 2005).

Les objectifs de l'étude

Partant de ces constats, et dans la perspective théorique proposée, nous nous sommes intéressés à la manière dont les gestionnaires de l'eau appréhendent et se représentent les changements climatiques. Notre objectif est d'identifier leur représentation sociale du changement climatique et d'identifier les éventuelles variabilités individuelles selon leurs appartenances de groupe (statut au sein de la CLE, âge, localisation des SAGE, etc.). Plus précisément, il s'agit de répondre aux questions suivantes : Quelles sont leurs connaissances du phénomène ? Y a-t-il ou non perception de modifications au niveau du climat ? Si oui, quels sont les indicateurs, les causes et les conséquences ? Quels sont les impacts probables, directs ou indirects, du changement climatique sur la ressource en eau ? Cette représentation fait-elle apparaître des distinctions selon les groupes d'acteurs concernés ?

Au final, la réponse à ces questions nous permettra de comprendre comment des décideurs qui ont en charge une gestion environnementale se positionnent par rapport au changement climatique, l'évaluation qu'ils en font et notamment en comparaison aux problèmes liés à la ressource en eau, en tenant compte de leurs appartenances de groupe.

La méthode

L'enquête : Procédure, étapes et échantillons

L'enquête porte sur la période 2009-2011. Elle s'est déroulée en deux grandes étapes auprès des SAGE du Grand Ouest, situés en Basse Normandie, Bretagne, Pays de la Loire et Poitou-Charentes (voir figure 1).

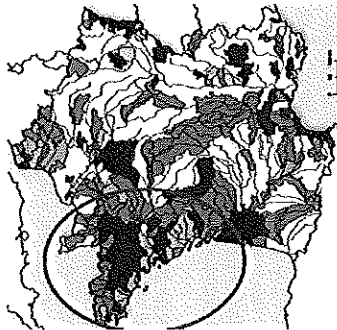


Figure 1 : Localisation des SAGE Bretons enquêtés¹

Dans une première étape (2009-2010), des entretiens de recherche semi-directifs ont été menés auprès de 49 membres de CLE participant aux SAGE Bas-Léon, Elorn, Odet (ces trois SAGE se situent exclusivement sur le département du Finistère) et au SAGE Vilaine qui s'étend sur 6 départements : l'Ille-et-Vilaine, le Morbihan, les Côtes d'Armor, la Loire Atlantique, le Maine-et-Loire et la Mayenne. Parmi les personnes enquêtées, 10 font partie du SAGE Elorn, 5 du SAGE Bas-Léon, 3 du SAGE Odet et 31 du SAGE Vilaine : 26 personnes sont des élus, 14 sont des représentants des usagers et 9 sont des représentants de l'Etat ; la moyenne d'âge des personnes est de 55 ans.

Dans une seconde étape (2011), à partir de ces premiers entretiens, nous avons élaboré un questionnaire, diffusé auprès de l'ensemble des SAGE du Grand Ouest, soit 56 SAGE, comprenant en moyenne 53 membres au sein de leur CLE. Le questionnaire a été transmis aux acteurs (définis comme toute personne ayant contribué à l'élaboration du SAGE : membre des CLE, groupes techniques, experts, etc.) par voie électronique par l'intermédiaire des coordinateurs des SAGE. Au total 75 questionnaires ont été recueillis. L'échantillon se compose de la manière suivante : 44% d'élus, 37% de représentants des usagers (sur-représentation), 19% de représentants de l'Etat ; les participants non membres de CLE constituent un quart de l'échantillon ; ce sont majoritairement des hommes (69%) ; la moyenne d'âge est de 49 ans, s'échelonnant entre 25 et 74 ans ; les personnes sont majoritairement de formation supérieure longue, autrement supérieure ou égale à Bac+5 (63%) ; et résultat non négligeable, un tiers des interviewés est membre d'au moins une association environnementale (36%).

Les outils d'enquête (guide d'entretien et questionnaires) portaient sur trois thématiques principales : l'eau, le changement climatique et le développement durable. Sur le thème de l'eau, les personnes mentionnaient les problématiques de l'eau traitées au sein de leur SAGE, les hiérarchisaient, évaluaient la ressource dans le temps et dans l'espace ainsi que les causes et conséquences des problèmes identifiés. Sur le thème du changement climatique, les interviewés évoquaient en premier lieu leurs connaissances et perceptions sur le sujet, puis les éventuelles relations de ce phénomène avec la ressource en eau, et plus précisément avec les problématiques traitées dans le SAGE. Il s'agissait également de tenter de situer le problème dans le temps et dans l'espace. Enfin, concernant le dernier thème, les personnes expliquaient leur point de vue sur le développement durable et son lien avec les problèmes environnementaux précédemment évoqués. Dans ce chapitre, nous centrerons essentiellement les résultats sur la partie concernant le changement climatique.

L'analyse des résultats

Les entretiens ont fait l'objet d'une retranscription intégrale et ont par la suite été soumis à une analyse des données textuelles assistée par ordinateur à l'aide du logiciel Alceste (Kalamailikis, 2000 ; Reinert, 1990), appuyée d'une analyse de contenu thématique manuelle. L'analyse textuelle à l'aide du logiciel Alceste permet d'appréhender les discours dans leur intégralité et d'en dégager des grandes thématiques. Le logiciel utilise la méthode de la Classification Descendante Hiérarchique (CDH) en procédant par fractionnements successifs du texte, permettant de dégager un nombre limité de classes de mots représentatifs du discours. Ces classes sont constituées en fonction des cooccurrences des mots. Chaque terme au sein d'une classe est associé à un khi-deux qui indique, pour ce terme, son lien statistique, plus ou moins fort, avec la classe. A partir des classes constituées par le logiciel, le chercheur interprète chacune d'entre elles en mettant en avant la thématique principale qui s'en dégage. Alceste est une méthode exploratoire du contenu du discours. Pour permettre une analyse approfondie, cette méthode a été complétée par une analyse thématique manuelle, notamment en ce qui concerne l'analyse de la dimension temporelle associée aux problématiques environnementales étudiées.

¹ Source : http://nesteau.eaufrance.fr/sites/default/files/cartes/sage/sage_situation.pdf

Résultats L'étude qualitative

Les résultats de l'analyse Alceste sont présentés au sein de la figure 2.

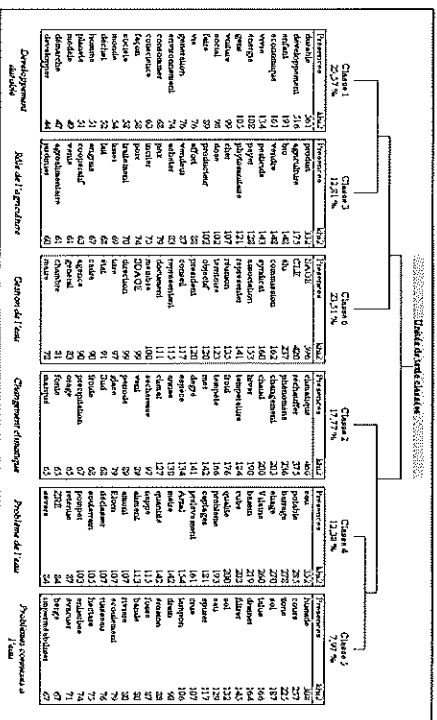


Figure 2 : Résultat de la CDH (Alceste) et interprétation thématique des classes

Sur la base de 68% de contenu du corpus classé, la classification descendante hiérarchique (CDH) met en exergue six classes qui permettent de dégager les principales thématiques dans le discours des 49 membres de CLE interviewés. La classe 1, qui regroupe 23,57% du contenu du discours analysé, porte sur le sujet du développement durable : la classe 3 traite du rôle de l'agriculture (12,81%) ; la classe 6 évoque la gestion de l'eau et le rôle fonctionnement des SAGE (23,51%) ; la classe 2 fait référence aux changements climatiques (17,77%) ; les classes 4 et 5 portent toutes les deux sur la thématique de l'eau, la classe 4 étant centrée sur les problèmes de l'eau (12,38%), la classe 5 sur les problèmes connexes (7,97%). En outre, nous observons que la CDH oppose deux principaux questionnements dans le discours : l'un a trait aux problématiques environnementales (changement climatique et ressource en eau) et l'autre porte sur la gestion de ces problèmes (SAGE, développement durable, rôle de l'agriculture). Nous allons nous intéresser plus particulièrement à la représentation du changement climatique.

Globalement, à l'appui de l'analyse manuelle, la définition du changement climatique renvoie essentiellement à la description du phénomène et de ses effets. Il est associé au réchauffement, à une évolution des températures de l'air et/ou de l'eau. De ce fait, dans les

discours, le changement climatique devient le « réchauffement climatique » dont on est informé par les voyes médiatiques. Sont également évoqués les phénomènes de sécheresses, de modifications de la biodiversité, d'aggravation ou d'accentuation des phénomènes climatiques (orages, tempêtes, ouragans...) de montée des eaux ou encore de fonte des glaces.

Pour la grande majorité des interviewés, le changement climatique est une réalité, c'est un phénomène qui existe. Néanmoins, à travers l'explicitation et la définition qu'ils en donnent, on voit que les interviewés ont des conceptions différentes de ce phénomène. Les interviewés se réfèrent à des notions telles que les « sécheresses, orages, tempêtes, etc. », les gestionnaires de l'eau expriment également leurs doutes et leurs incertitudes. Globalement, le changement climatique se résume à une modification du climat mais localement les interviewés évaluent différemment les impacts (plus ou moins de vent, plus ou moins d'orages, etc.). Et bien qu'ils affirment leur confiance en la science et s'appuient sur elle pour fonder leurs croyances, ils n'hésitent pas à noter leurs doutes dans les incertitudes scientifiques. Ainsi, même si plus de la moitié des acteurs exprime sa confiance en la science et que la suprématie de la parole scientifique est mise en avant « *si les scientifiques le disent...* », paradoxalement un tiers des personnes met en avant ses failles. Les interviewés reprochent aux scientifiques de ne pas être d'accord entre eux. Et Claude Allègre devient alors la figure de l'opposition, du « scientifique détracteur », par rapport auquel les gestionnaires ont des prises de position partagées, entre ceux qui doutent et ceux qui adhèrent à ses propos.

L'expression de ces incertitudes rend le problème difficilement perceptible à certains niveaux d'espace et de temps. En accord avec l'existence d'une réalité du changement climatique, le phénomène est essentiellement perçu comme global. Il existe mais il se situe « ailleurs » dans l'espace. Une partie d'entre eux perçoit néanmoins le problème localement, mais l'objectivent à travers la référence aux saisons passées. Certains « voient » ainsi des évolutions du climat, à travers des saisons plus ou moins marquées, l'absence de neige en hiver, la taille précoce des châtaigniers, etc. Mais les prises de position restent partagées, certains évoquant justement l'idée que les saisons n'ont pas évolué, et un tiers des personnes mentionnent clairement que le changement climatique n'est pas perceptible localement.

La question des saisons met en avant la recherche de repères temporels vécus qui, contrairement au problème de qualité de l'eau, sont loin de faire consensus. Les changements du climat n'apparaissent pas perceptibles à l'échelle humaine et se reperçutent sur des siècles, dans l'avenir comme dans le passé, au temps des « *mammouths* » et des « *diplodocus* », au temps où le « *Sahara, c'était du Jura* » et où le « *Groenland était vert* ». Ainsi ce raisonnement conduit certains interviewés à s'interroger sur l'évolution cyclique naturelle du climat. Il s'agit là d'une des causes possibles du changement climatique. Néanmoins, les rejets de gaz carbonique comme principale cause du changement climatique font peu de doute chez les personnes qui l'expriment. La production de CO₂ est associée à l'homme même si sa responsabilité est parfois relativisée.

La relation du changement climatique avec des problématiques de l'eau est décrite par une grande majorité des enquêtés. Des liens sont faits avec les montations, la modification de la vie aquatique ou plus généralement de la qualité de l'eau, les problèmes d'étiage et d'assèchement des rivières, les problèmes de conservation de la biodiversité à l'intérieur des zones humides ou encore les problèmes d'alimentation en eau potable par réduction des quantités d'eau (problème d'approvisionnement), et dégradation de la qualité de l'eau du fait de cette réduction. Néanmoins, lorsqu'il s'agit de faire le lien avec les problèmes locaux traités au sein des SAGE, la relation n'est plus aussi évidente. En rapport aux difficultés de projection dans le temps et dans l'espace local, que nous avons précédemment évoquées, les perspectives d'action paraissent limitées, notamment en comparaison des problèmes de la ressource en eau, et même de la part des acteurs qui estiment qu'il faudrait davantage prendre en compte ces questions dans les débats au sein du SAGE.

En conclusion à cette première partie, comme nous l'avons précédemment souligné (Michel-Guillou, 2010b), la représentation sociale du changement climatique s'avère fortement influencée par les médias (Cabecinhas, Lazaro et Carvalho, 2008 ; Moscovici, 1976). Elle apparaît donc stéréotypée et peu empreinte de vécu. En conséquence, les acteurs locaux interrogés ont conscience d'une modification du climat mais celle-ci n'est pas ressentie comme une réalité au quotidien. Ce problème est identifié comme global plutôt que local et il apparaît imperceptible à court terme.

L'étude quantitative

Sur la base des entretiens, un questionnaire d'enquête a été élaboré et diffusé à plus grande échelle afin de quantifier les résultats précédemment obtenus et de mettre en évidence d'éventuelles variabilités individuelles selon les groupes (statut au sein de la CLE, localisation du SAGE, etc.).

Au sein de ce questionnaire, la première question sur le changement climatique correspond à une association de mots². Les mots recueillis ont été soumis à une Analyse des Correspondances Multiples (ACM) afin de faire apparaître la représentation sociale du changement climatique (voir figure 3). En accord avec les précédents résultats, ce dernier, connoté négativement, est défini en fonction de critères globaux, généraux (réchauffement, perturbation, adaptation, fonte des glaces, biodiversité, etc.) et concrets, appliqués (sécheresses, inondations, etc.).

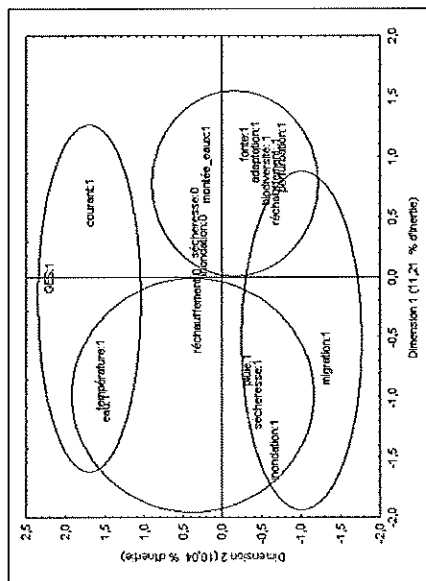


Figure 3 : Résultat ACM à l'association de mots « changement climatique »

En complément de cette question, il était demandé aux enquêtés de donner leur opinion sur un certain nombre de propositions construites à partir des discours³. Ainsi, parmi les prises de position les plus extrêmes, pour une majorité d'enquêtés, le changement

² Consigne : « Pouvez-vous citer 3 mots ou expressions qui vous viennent spontanément à l'esprit lorsqu'on vous parle de changement climatique, puis préciser pour chacun d'eux s'il est connoté positivement (+), négativement (-) ou s'il est neutre (0), en cliquant sur la réponse (+/-/0) qui correspond le mieux à votre opinion. »
³ Consigne : « Voici une liste de propositions qui illustrent le changement climatique (CC). Pour chacune d'elles, pouvez-vous exprimer votre degré d'accord ou de désaccord, en cliquant sur le numéro (de 1 à 5) qui correspond le mieux à votre opinion. »

climatique existe et ils n'en doutent pas. Le phénomène est prouvé scientifiquement. Ils en voient les effets et ses conséquences sont évaluées comme globales. Ils estiment qu'il y a d'autres régions en France qui sont plus touchées que la leur par les modifications du climat. Ils s'accordent à mettre en avant la responsabilité de l'homme dans l'évolution actuelle du climat. Et a priori, contrairement aux résultats recueillis au sein des entretiens, ils laissent entendre que le changement climatique est perceptible à l'échelle humaine.

A ce titre, la question du temps a également été évoquée⁴. Les interviewés avaient pour tâche d'évaluer différents problèmes à différentes échelles de temps : 10 ans / 50 ans / 100 ans (voir tableau 1).

Taux de non réponse	10 ans	50 ans	100 ans
Augmentation des pluies en fréquence	2,2	2,3	2,5
Sécheresses récurrentes	3,3	3,3	3,4
Inondations régulières	3,1	3,2	3,1
Migrations d'espèces animales	3,0	3,3	3,3
Accès à l'eau potable difficile	2,6	3,0	3,0
Accentuation des différences saisonnières	2,8	2,9	3,0
Disparition importante d'espèces animales	2,9	3,1	3,1
Augmentation des phénomènes naturels en intensité	3,0	3,5	3,3

Note : Les résultats présentés au sein de ce tableau correspondent à la moyenne des réponses des enquêtés sur des échelles d'accord en cinq points, allant de « Pas du tout d'accord » (1) à « Tout à fait d'accord » (5).

Tableau 1 : Evaluation des changements climatiques dans le temps (taux de non réponse et moyenne des échelles)

Les résultats présentés au sein du tableau 1 confirment l'incertitude des interviewés concernant leur projection des problèmes dans l'avenir. A l'évidence plus l'échelle de temps est lointaine, moins les participants arrivent à se projeter. Cela transparait dans le taux de non réponses qui augmente avec l'échelle de temps ainsi qu'au travers des moyennes observées qui se situent pour la plupart sur le rang médian. Ainsi, hormis pour l'item « augmentation des pluies en fréquence », item avec lequel les interviewés sont plutôt en désaccord, les résultats affichent clairement une indécision, et d'autant plus que les échelles de temps augmentent⁵.

Une seconde dimension étudiée est celle de la localisation dans l'espace. A la question « Percevez-vous, oui ou non, localement (chez vous) un changement du climat ? », 55% des personnes répondent « oui », 24% répondent « non » et 21% ne répondent pas. Néanmoins, une majorité d'entre elles répond à la question suivante : « Si oui, pouvez-vous cocher parmi les éléments ci-dessous ceux qui illustrent, selon vous, le(s) changement(s) de climat au niveau local (plusieurs réponses possibles). Au niveau local, j'observe :... ». Parmi les éléments les plus cités et représentatifs d'un changement au niveau local, nous retrouvons : les étages sévères (52%), les périodes de sécheresses plus longues (41%) et les saisons moins marquées (40%). Mais l'évaluation de certains de ces phénomènes en comparaison à d'autres échelles spatiales tend à relativiser, pour partie, les précédents résultats⁶ (voir figure 4).

⁴ Consigne : « Nous vous demandons ici de vous projeter dans différentes échelles de temps. Pour chacune des propositions ci-dessous, pouvez-vous exprimer votre degré d'accord ou de désaccord, en cliquant sur le numéro (de 1 à 5) qui correspond le mieux à votre opinion. »

⁵ Les différences entre les moyennes affichées à 10 ans d'une part, et celles affichées à 50 et/ou 100 ans d'autre part sont toutes significatives à au moins $p < 0,05$ (test de Wilcoxon).

⁶ Consigne : « Pour chacun des phénomènes ci-dessous, pouvez-vous préciser, selon vous, l'échelle spatiale à laquelle il se situe. Pour ce faire, pour chaque niveau d'échelle (mon secteur/ma région/mon pays/le monde), précisez si, oui ou non, le phénomène est présent, en cliquant sur la réponse (oui/non) qui correspond le mieux à votre opinion. »

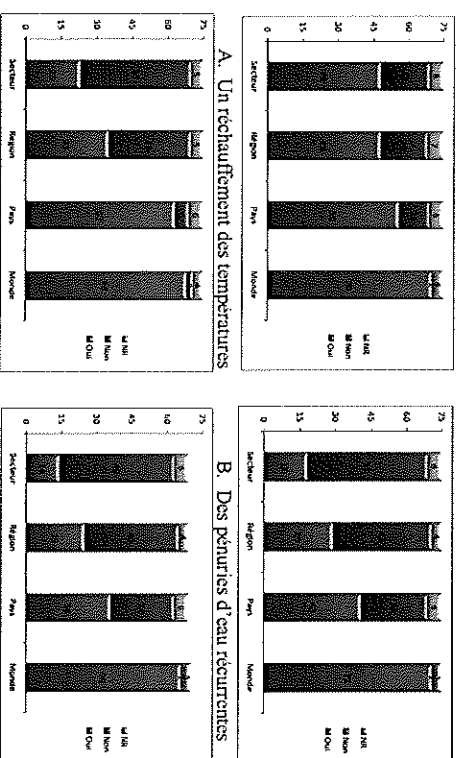


Figure 4 : Évaluation des changements climatiques dans le temps (répartition des effectifs de réponses par niveau d'échelle spatiale : Secteur/Région/Pays/Monde)

Concernant le premier graphique (réchauffement des températures), les résultats montrent peu de distinctions entre une perception locale et une perception mondiale. Les interviewés s'accordent à penser que le réchauffement du climat est omniprésent. Pour les autres phénomènes (pénuries d'eau, inondations et sécheresses), les tendances sont différentes de ce premier graphique mais similaires entre elles : les problèmes sont davantage localisés à l'échelle mondiale voire nationale (pour le cas des inondations).

En conclusion, les résultats présentés ci-dessus font apparaître une population sensible au changement climatique, qui met peu en doute son existence malgré de relatives incertitudes quant à la projection de ses conséquences à long terme. Le changement climatique est réel, il s'actualise au travers d'un réchauffement des températures. Et les enquêtés sont une majorité à penser qu'il existe un lien entre les problématiques liées au SAGE et le changement climatique. Il semble néanmoins important au regard de ces résultats de noter le faible taux de réponses des membres des CLE (39%), ainsi que le taux élevé de membres participant à au moins une association environnementale (36%). Qu'en est-il de l'opinion des non répondants ?

Discussion et conclusion générale

Le changement climatique peut être ici appréhendé comme un « risque » caractérisé par son impact planétaire et son invisibilité. Seule la science pourrait le maîtriser mais elle apparaît elle-même impuissante et contradictoire face à ses propres incertitudes mises en exergue (Beck, 2008). De ce fait, placer le changement climatique comme étant « éloigné de soi », dans le temps et dans l'espace, permet de se rassurer et de se protéger de sentiments inconfortables qui nécessiteraient une modification des comportements. Cet éloignement du problème est particulièrement saillant en rapport aux problématiques locales de l'eau. Ainsi, même si les acteurs interrogés croient majoritairement en la réalité d'une modification du climat, la comparaison des conséquences globales et à long terme de ce phénomène à celles des conséquences immédiates et saillantes de la ressource en eau fait que les problèmes liés à

l'eau sont perçus comme plus sérieux que les problèmes du climat. En ce sens, les changements climatiques ne sont pas une priorité (Spence et Piégion, 2009), et donc ne sont donc pas envisagés comme un risque imminent.

En outre, l'étude met en évidence une représentation sociale du changement climatique relativement consensuelle. Aucune différence importante n'apparaît selon le statut des membres des CLE (du local, représentant des usagers ou représentant de l'Etat). Quelques différences apparaissent selon la localisation des SAGE, les membres des CLE des SAGE traitant d'une problématique quantitative en lien avec la ressource en eau semblant plus enclins à reconnaître l'existence de changements locaux liés au climat (résultats à confirmer). Plusieurs interprétations peuvent être envisagées. D'une part les études auprès des SAGE ont été menées à un an d'intervalle (enquête en 2009 sur les SAGE finisseries ; en 2010 sur le SAGE Vilaine ; en 2011 sur le Grand Ouest). Il est probable que la représentation du changement climatique, en cours d'élaboration, ait évolué, notamment avec la conférence de Copenhague (décembre 2009) fortement médiatisée mais également avec les phénomènes climatiques observés selon les années et les saisons (printemps sec, températures automnales élevées...). D'autre part, le problème de ressource en eau le plus souvent identifié et évoqué comme faisant le lien entre problématique de l'eau et du changement climatique est celui des « inondations », ou plus largement le problème de la quantité de la ressource (Michel-Guilhou, 2010b). Ce lien apparaît plus saillant pour les membres des SAGE confrontés à cette problématique. Enfin, une explication en termes de localisation dans l'espace peut être également avancée. La proximité de la mer pourrait expliquer la perception de l'abondance en eau, et la difficulté à envisager une éventuelle raréfaction de la ressource.

Références bibliographiques

- Abrie J.-C. (2001). Les représentations sociales : aspects théoriques. In J.-C. Abrie (ed.), *Pratiques sociales et représentations* (pp. 11-35). Paris : Presses Universitaires de France.
- Beck, U. (2008). *La société du risque. Sur la voie d'une autre modernité*. Paris : Flammarion.
- Bernard, J.-M. (2003). Analysis of local or asymmetric dependencies in contingency tables using the Imprecise Dirichlet Model ». In J.-M. Bernard, T. Seidenfeld & M. Zaffalon (eds.), *Proceedings of the Third International Symposium on Imprecise Probabilities and Their Applications (ISIPTA'03): Proceedings in Informatics Series* (pp. 46-61). Waterloo (Canada): Carleton Scientific.
- Brechin, S. R. (2003). Comparative public opinion and knowledge on global climatic change and the Kyoto Protocol: the U.S. versus the world? *International Journal of Sociology and Social Policy*, 23, 106-34.
- Cabecinhas, R., Lázaro, A. & Carvalho, A. (2008). Media uses and social representations of climate change. In A. Carvalho (ed.), *Communicating Climate Change: Discourses, Mediations and Perceptions*. Braga: Centro de Estudos de Comunicação e Sociedade, Universidade do Minho.
- Canter D. V., & Craik K. H. (1981). Environmental psychology. *Journal of Environmental Psychology*, 1, 1-11.
- Doise, W. (1983). Les représentations sociales: Définition d'un concept. *Connexions*, 45, 243-253.
- Doise, W. (1992). L'ancrage dans les études sur les représentations sociales. *Bulletin de Psychologie*, 45, 189-195.

Les perspectives climatiques discutées dans les groupes d'agriculteurs

Philippe Desnos, J.L. Giteau, J.R. Lucas

Introduction

Le projet Climaster associe laboratoires de recherche et acteurs de terrain. Les acteurs agricoles de ce projet ont été les groupes de développement (Ceta35, Cedapa22), TRAME et les Chambres d'agricultures de Bretagne. Dès le début du projet CLIMASTER, nous avons fait le choix d'associer des groupes d'agriculteurs à ces réflexions. Ceci a été possible à la fin du projet par la mobilisation de 4 groupes d'agriculteurs de l'Ouest et le recrutement d'un CDD pour produire une synthèse de l'état actuel des recherches sur le sujet. En juin et juillet 2011, 4 séances de travail ont eu lieu

Le dispositif de mise en discussion des recherches a été mis au point par TRAME. Ce dispositif a mis les agriculteurs en situation de sélectionner et de traiter eux-mêmes les informations pertinentes, puis de formuler les conséquences de ces informations pour leurs exploitations. Ce travail repose sur les principes suivants :

1. L'environnement est rempli d'incertitudes (marchés, politique, climat...) Cela ne vous empêche pas de décider, de prendre des risques sur vos exploitations
2. Dans cet environnement d'incertitudes, la mobilisation des informations est nécessaire pour éclairer les choix que vous faites.
3. La recherche détient des connaissances qui peuvent vous être utiles. Elle ne détient pas la vérité.
4. Vos expériences et vos observations constituent des informations précieuses pour vous aider à décider.

Cet article va décrire successivement le dispositif mis en place, le travail de sélection des informations par les agriculteurs, les pistes d'évolutions envisagées pour leurs systèmes, et enfin les questions que cela pose pour les recherches à venir.

1) Une méthode de réflexion prospective

Cette réflexion prospective en groupe a été conduite en 4 temps : l'installation du cadre, la présentation des résultats de recherche, la sélection d'informations pertinentes, et enfin la production de pistes pour le futur.

AMOC, comme Atouts, menaces, Opportunités, Contraintes. Cette méthode.

Le premier point clé de la méthode est de fixer un cadre de travail et qu'il soit accepté par tous les participants. Ainsi, chacun dans le groupe a droit à la parole, ce qui veut dire égalité de participants avec les personnes ressources. Les participants évitent les jugements de valeurs et sont invités à faire preuve de créativité, ce qui permet de sortir des solutions convenues. Chacun est invité à s'impliquer de façon efficace et positive dans le groupe, ce qui reconnaît que personne n'est là pour perdre son temps. Les horaires seront respectés.

Ensuite, un tour de table permet de récolter les représentations spontanées des participants sur le changement climatique. « *Agriculture et Changement climatique : quelles questions cela vous pose ?* ». Cette séquence rend compte de la diversité et de la richesse du groupe présent.

Dupont, N., Dubreuil, V. & Planchon, O. (2000). L'évolution récente des crues de la Vienne : le rôle des précipitations et de l'occupation du sol du bassin versant. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 13, 91-99.

GIEC (2007). *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du GIEC* (Suisse).

Guimelli C. (1994). Présentation de l'ouvrage. In C. Guimelli (ed.), *Structures et transformations des représentations sociales* (pp. 11-24). Neuchâtel : Delachaux et Niestlé.

Hardin, G. (1968). The tragedy of the commons. *Science*, 162, 1243-1248.

Jodelet, D. (1999). Représentations sociales : un domaine en expansion. In D. Jodelet (ed.), *Les représentations sociales* (6th ed., pp. 47-78). Paris: Presses Universitaires de France.

Jouan, D. (2005). Etude des conséquences de l'évolution du climat induit par l'effet de serre sur la fréquence et l'intensité des perturbations cycloniques et sur la distribution des valeurs extrêmes du vent au sol en Europe de l'Ouest. Thèse de doctorat. Rennes : Université de Haute Bretagne.

Liverman D. (2007). From uncertain to unequivocal. The IPCC working group I report: Climate change 2007. The physical science basis. *Environment*, 49, 28-32.

Legendre A. (2005). Psychologie environnementale : de l'étude des systèmes complexes personne-environnement à la préservation et l'amélioration du cadre de vie. *Psychologie & Société*, 8, 7-24.

Michel-Guilou, E. (2010a). Water managers and climate change: what they think about it? *The 21st Conference of the International Association for People-Environment Studies (IAPS): "Vulnerability, Risk and Complexity: Impacts of Global Change on Human Habitats*. Leipzig (Germany) : Helmholtz Centre for Environmental Research – UFZ, from 27 June to 2 July 2010.

Michel-Guilou, E. (2010b). Problème local / problème global : La prise en compte de la dimension temporelle dans la dualité des problèmes environnementaux. *Second colloque fédérateur de l'Institut des Sciences de l'Homme et de la Société (ISHS-UBO) : « Penser le présent comme un passé pour demain »*. Brest : Faculté des Lettres et Sciences Humaines, 15-16 décembre 2010.

Moscovici, S. (1976). *La psychanalyse, son image et son public*. Paris: PUF

Moser G. (2009). *Psychologie environnementale. Les relations homme-environnement*. Bruxelles : De Boeck.

Moser G., & Uzzell D. (2003). Environmental psychology. In T. Millon & M.J. Lerner (eds.), *Comprehensive Handbook of Psychology* (pp. 1-26). New York: Wiley & Sons.

Oreskes N. (2004). The Scientific Consensus on Climate Change. *Science*, 306, 1686.

Reinert, M. (1990). Alceste, une méthode d'analyse des données textuelles. Application au texte « Aurélie » de Gérard de Nerval. *Bulletin de Méthodologie Sociologique*, 26, 25-54.

Spence, A., & Pidgeon, N. (2009). Psychology, climate change & sustainable behavior. *Environment*, 51, 9-18.

Stokols D., & Altman I. (1987). Introduction. In D. Stokols & I. Altman (eds.), *Handbook of environmental psychology* (pp. 1-4). New York: Wiley & Sons.

Uzzell, D. (2000). The psycho-spatial dimension of global environmental problems. *Journal of Environmental Psychology*, 20, 307-318.

Certains ont des idées bien arrêtées sur le sujet, d'autres sont en attente. Tous ont des questions sur le sujet, que ce soit sur les causes du CC, la meilleure manière de s'y adapter, les liens avec les enjeux globaux et locaux.

Arrive la séquence de présentation, par l'animateur, des informations issues des programmes de recherche. Le travail de domestication de ces informations a permis de présenter des diapos simples et faciles à interpréter. Le travail de repérage des questions posées au préalable donnait à chacun une grille de classement de ces informations délivrées durant plus d'une heure. Ces informations sont livrées telles quelles, sans interprétation sur les conséquences, bonnes ou mauvaises, pour l'agriculture.

La parole est ensuite redonnée aux participants à partir de la question suivante : « *Parmi toutes ces informations, lesquelles constituent une opportunité pour vos exploitations ? Lesquelles constituent une menace pour vos exploitations ?* ». L'animateur note sur un axe vertical toutes les Opportunités et Menaces retenues par les participants. Ceci suppose que les participants acceptent de faire une séparation entre les informations qui relèvent de l'intérieur (le climat et autres facteurs environnementaux), de celles qui relèvent de l'environnement (le climat et autres facteurs environnementaux). Cette mise à distance de leur exploitation par rapport à l'environnement ne va pas de soi. Il n'est pas toujours facile de séparer les éléments sur lesquels l'exploitant ne peut pas agir (ce qui vient de l'extérieur) de ce sur quoi il a une capacité d'action (l'intérieur).

Séquence suivante, les participants sont invités à porter un regard évaluatif sur leur exploitation : « *Quels sont les atouts que possèdent vos exploitations pour faire face à ces changements ? Quelles sont les contraintes dont sont porteurs vos exploitations ?* ». A ce stade, il est important de freiner les participants sur leur envie de formuler des pistes d'adaptation et les pratiques à envisager.

L'animateur note sur un axe horizontal tous les Atouts et Contraintes retenues par les participants. Ainsi apparaît un tableau avec 2 axes sur lesquels figurent les informations jugées importantes par les participants.

(insérer le schéma vide)

Arrive la séquence de construction de pistes prometteuses pour l'avenir. Par petits groupes de 2 à 4 personnes, il est demandé de sélectionner 1 Atout, 1 Menace, 1 Opportunité et 1 Contrainte (AMOC). Puis, à chaque intersection, se poser la question « *Quoi faire ? Quelle est la piste d'action envisageable pour l'avenir ?* ».

Exemple : La réduction de la pluviométrie estivale est une menace. Mes sols ont une faible réserve utile est une contrainte. Ouvrir la concertation avec les autres utilisateurs de l'eau pour créer des réserves partagées est la piste formulée.

Exemple : L'augmentation des températures primaires et automnales est une opportunité. La production de melons actuellement sur l'exploitation est un atout. La vente des melons localement aux touristes plus longtemps dans l'année est la piste formulée.

En mettant en commun la production de chaque sous groupe on obtient un nombre important de pistes d'adaptation des systèmes en place et aussi des pistes de changements plus radicaux des systèmes.

Nous avons testé à ce jour cette méthode dans 4 groupes.

1. Un groupe de 12 agriculteurs de la région de Saintes, adhérents d'un cercle d'échange en Charente Maritime.

2. Un groupe de 4 agriculteurs du marais (Sud Vendée et Rochefort/mer) et réunis par l'INRA de St Laurent de la Pré (17).
 3. Un groupe de 13 agriculteurs du Finistère, se retrouvant régulièrement pour échanger sur les techniques culturales simplifiées.
 4. Un groupe d'agriculteurs du Centre Bretagne (Région de Carhaix), impliqués dans l'enregistrement des jours agronomiques disponibles pour le compte de Climaster. Et au final, un seul agriculteur présent ce jour là.
- Soit 30 agriculteurs ont participé à ces séances de travail, conduite selon la méthode AMOC et produisant des pistes d'adaptation pour le futur

Avec cette expérimentation, nous avons pu vérifier que cette méthode est adaptée à la mise en discussion des enseignements sur les changements climatiques au sein de groupes d'agriculteurs. Les conditions requises pour que cela fonctionne sont :

Que les participants s'impliquent et jouent le jeu.

Que l'animateur soit centré sur l'élaboration du cadre et laisse les participants produire par eux-mêmes.

Que l'animateur fasse confiance dans l'intelligence du groupe pour traiter une question aussi complexe.

- 1) Quelles sont les informations sur le CC retenues par les agriculteurs ?

La mise en œuvre de la méthode révèle un intérêt plus prononcé pour certaines informations. D'autres informations dispensées ont suscité l'indifférence.

différents comportements des agriculteurs participant aux groupes de réflexion. Ces comportements correspondent à ceux que l'animateur a pu percevoir au travers des réunions qu'il a animé en utilisant la méthode sur le thème du changement climatique :

- les aléas climatiques du passé se retracent aisément grâce à la mémoire collective. Chacun se souvient des événements extrêmes qui ont touché sa sensibilité (cf. diapo 27 : encadré).
- les utilisateurs de la méthode sont acteurs dès lors qu'ils se sentent concernés. Le fait de régionaliser les scénarios du futur est un atout. Cela permet à chacun de s'impliquer et d'imaginer sa situation différemment, en tenant compte des changements climatiques pressentis (cf. diapo 18, 20 ou 21).
- les agriculteurs font d'abord preuve de résistance au changement pour certains, d'adaptation pour d'autres. Ils se résignent et choisissent la fuite (autre activité, autre région) en dernier lieu, lorsqu'ils n'entrevoyent pas de solution envisageable.

A partir des changements climatiques identifiés par le GIEC, retenus pour le projet Climaster et présentés par l'animateur à chaque réunion, les différents agriculteurs invités à la réflexion prospective ont pu identifier des opportunités et menaces.

- Parmi les opportunités, ont été citées les températures plus élevées au printemps et à l'automne. Ce phénomène pourrait limiter le risque maladies et les traitements associés, sur céréales, au moment de la floraison. La récolte du maïs grain pourrait être avancée avec des teneurs en humidité plus proche de la norme. Enfin, les périodes pour réaliser un foin pourraient être allongées. La qualité des produits devrait ainsi être améliorée, en utilisant moins de pesticides d'une part et en récoltant à maturité d'autre part (meilleure conservation des fourrages). Cette modification du climat

laisse entrevoir une diversification potentielle des productions, avec une migration des cépages du Sud vers le Nord, par exemple (cf. illustration : diapo 33).

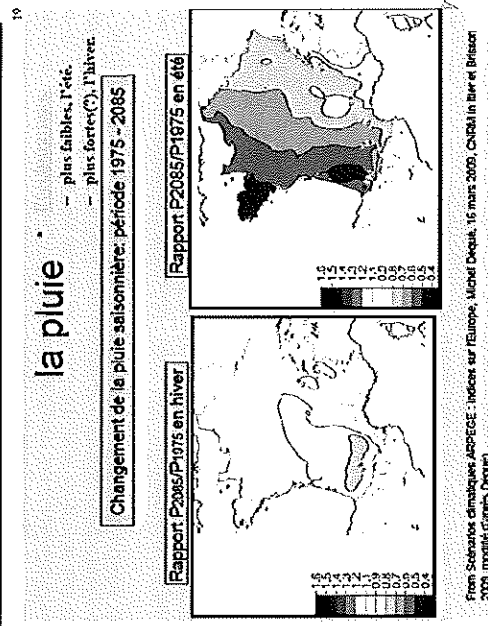
- L'augmentation de la fréquence des événements exceptionnels tels que les inondations, sécheresses, températures élevées ou gel a été citée comme la menace la plus importante, faisant régner l'incertitude en terme de prise de décision et l'inattendu en terme de prévision et donc de capacité d'anticipation. Celle-ci fait craindre une élévation des dépenses énergétiques pour chauffer ou ventiler les bâtiments d'élevage (Bretagne), une diminution des rendements avec des périodes réduites pour intervenir au moment opportun ou des dégâts biotiques ou abiotiques en culture. Enfin, les agriculteurs de Poitou-Charentes perçoivent déjà des tensions entre acteurs du territoire pour partager la ressource en eau.

Face à ces changements, les agriculteurs analysent leur exploitation. Ils décrivent en quoi elles disposent d'atouts et de contraintes.

- Les régions Bretagne et Poitou-Charentes sont des zones touristiques, notamment grâce à leur bordure maritime. L'élévation des températures estivales a des chances d'accroître ce secteur d'activité économique et les agriculteurs y voient un atout pour le débouché de leurs productions mais également en terme de possibilité de diversification. D'autres considèrent l'élévation de la température et les années sèches comme une possibilité d'exploiter des surfaces pas toujours valorisées actuellement comme les zones humides, ou dans des régions plus humides ? La principale contrainte concerne le maintien de la fertilité des sols. Les événements exceptionnels risquent de dégrader la structure des sols, notamment dans les parcelles en pente plus exposées au risque d'érosion. Par ailleurs, les déficits hydriques pourraient limiter le potentiel des parcelles peu profondes, où les réserves sont faibles.

Les aléas climatiques extrêmes, une réalité constatée

- Des vagues de froid
 - d'intensité modérée (2010, 2009, 2005, 2003, 2001, 1991,...)
 - de forte intensité (1997, 1987, 1971, 1985, 1963, 1956,...)
 - d'intensité exceptionnelle (1956, 1963, 1985,...)
- Des sécheresses
 - En 1303, c'est la sécheresse la plus importante du millénaire. On pouvait traverser le Rhin à pied sec
 - Autres sécheresses : 1906, 1911, 1921, 1945, 1947, 1949, 1953, 1957, 1964, 1976, 1988, 1989, 1990, 1991, 1992, 2003 et 2010.
- Des tempêtes



Deux illustrations du diaporama présenté aux agriculteurs

- 2) Quelles sont les pistes d'action envisagées par les agriculteurs
Malgré le peu de temps impartis à la production pour les pistes d'avenir, les agriculteurs présents n'ont pas hésité à formuler un ensemble de propositions.
Ces pistes relèvent tantôt de l'adaptation autonome (« je peux mettre en place ces adaptations seul sans avoir à négocier avec mon environnement »), tantôt de l'adaptation négociée (« je peux mettre en œuvre ces adaptations à condition que la filière ou le territoire les accepte »).

Les adaptations autonomes relèvent des pratiques agronomiques et des types de productions de l'exploitation.

La révision des dates de semis, notamment des céréales est une piste immédiatement citée et qui semble ne pas poser de difficultés aux agriculteurs présents. De la même manière, la révision des itinéraires culturaux est envisagée pour s'adapter aux printemps précoces, aux étés chauds ou aux automnes plus pluvieux.

Les mélanges d'espèces (maïs, trèfles + céréales), ou l'introduction de nouvelles espèces dans la rotation (associations prairiales, sarrasin, ...) constituent des techniques que certains ont déjà expérimenté avec succès. Ils sont persuadés qu'il existe encore des marges d'adaptation du côté de ces techniques.

Les aléas climatiques vont aussi conduire à revoir la gestion des stocks de fourrage. La préoccupation des stocks d'hiver ira en diminution et la constitution de stock pour la période estivale deviendra plus cruciale.

La réduction des intrants (engrais, phyto, protéines) est une piste déjà largement sollicitée pour faire face aux aléas du marché. Elle est citée à nouveau pour faire face aux aléas climatiques. D'autant que des périodes plus sèches font penser qu'il faudra faire appel à moins de fongicide. Pour faire face au probable développement des ravageurs, les participants des ces groupes envisagent de faire appel aux capacités naturelles du milieu pour les combattre.

Les aléas climatiques font craindre la perte totale de récoltes certaines années. D'où le risque d'augmenter les coûts de production avec l'obligation de contracter des assurances Climat.

La perspective de périodes ensoleillées et non pluvieuses fait aussi rêver. Car qui dit beau temps dit attractivité touristique. D'où l'idée pour certains de diversifier l'exploitation dans le tourisme. Un participant évoquant même le basculement de toute son activité dans le tourisme.

L'augmentation de l'ensoleillement fait aussi dire que la production d'électricité photovoltaïque à la ferme sera plus rentable, et donc pourra constituer une piste prometteuse de diversification.

Globalement, les participants se rejoignent sur l'idée que des systèmes d'exploitation plus autonomes seront plus résistants face aux aléas climatiques. Cette autonomie passe par des choix de variétés végétales et de races animales rustiques, passe par la réduction des intrants et des investissements. Une autre idée forte est que la diversification au sein des exploitations permettra de mieux faire face aux aléas « *ne pas mettre tous ses œufs dans le même panier* ». c'est-à-dire être capable d'optimiser les années pluvieuses quand elles se présentent et garantir un minimum de production les années sèches. Les techniques de conservation de la fertilité des sols ont été largement citées. Les participants sont convaincus que l'augmentation du taux de matière organique dans les sols permettra de mieux faire face aux aléas climatiques (Augmentation de la réserve utile, amélioration de la santé des plantes).

Cette capacité à se diversifier peut aussi passer par l'agrandissement des exploitations. Avoir des parcelles sur une diversité de sols adaptés à chaque situation climatique, ou avoir une partie de son exploitation en bord de mer (zone très sèche) et une autre partie à l'intérieur des terres : « *on fera la transhumance en Bretagne* ». Certains ont même imaginé des scénarios plus volontaristes : installer une partie de la production hors région pour étaler géographiquement les risques climatiques. Un charentais a évoqué l'idée de s'installer en Bretagne, un autre de produire du melon au Maroc, un troisième d'aller cultiver la toundra.

Les participants de ces groupes sont très confiants dans leurs capacités à trouver les bonnes solutions. La plupart pratiquent déjà les groupes d'échanges. Ils en mesurent les avancées en

termes d'innovation et les bénéfices en termes économiques. Ils font confiance dans « *la recherche paysanne* », c'est-à-dire l'expérimentation et le partage d'expériences en groupe de pairs. Ils ont insisté sur la nécessité pour un professionnel de l'agriculture d'être capables d'observer son milieu naturel, ses cultures et ses animaux. Ils ne croient plus dans les modèles reproductibles. Ils disent toute l'importance de trouver la bonne solution qui fonctionne bien chez soi. « *J'ai remarqué que c'est la féruque ovine qui convient le mieux à mes sols et au climat de chez moi* ».

Cependant, les agriculteurs rencontrés sont très conscients que certaines évolutions ne relèvent pas que de leur seule compétence et volontarisme. Ces évolutions devront être négociées avec le territoire ou la filière.

Les scénarios climatiques du futur se rejoignent sur l'augmentation des périodes de sécheresse estivales. Le maintien des cultures de céréales en Charente et de légumes en sud Bretagne nécessite de faire appel à l'irrigation. Cette irrigation suppose de créer des réserves d'eau en période hivernale. Les agriculteurs qui portent ce type de projets se sont déjà heurtés à des obstacles réglementaires et à l'opposition d'acteurs du territoire (écologistes, syndicats d'eau).

Les agriculteurs ont conscience qu'à l'avenir la création de ces réserves passera par une négociation sur la place de l'agriculture et l'acceptation sociale des impacts sur le milieu naturel. Ils savent que pour ce faire, ils auront à développer des compétences de dialogue et d'implication dans les controverses locales. Le partage des connaissances de chaque acteur sur le territoire, sur le milieu naturel, sur les activités économiques constitue une piste en laquelle certains participants y mettent de l'espoir. Ils auront à construire avec les autres des perspectives de développement global pour leur territoire. Il apparaît alors que les changements climatiques rendront le développement agricole encore plus dépendant du développement des territoires.

Les pistes prometteuses telles que la production d'électricité photovoltaïque ou la diversification touristique passent par le développement des débouchés en aval. Cela suppose que les filières concernées leur laissent une place. L'offre de débouchés par la filière est aussi une nécessité pour envisager l'implantation de nouvelles cultures, les cultures de vente de protéagineux, la production de biomasse avec l'agroforêt, la culture du sarrasin avec des débouchés régionaux.

L'échange sur les changements climatiques alimente aussi la peur de voir apparaître de nouvelles contraintes réglementaires. L'expérience récente des agriculteurs sur cette question leur fait craindre l'arrivée de nouvelles règles qu'ils jugent contraire au bon sens agronomique : « *La nouvelle directive N encourage à élever les vaches laitières en hors sol* ». De leur point de vue, les réglementations limitent la pluralité des usages du sol : « *ne pas pouvoir nourrir les animaux avec les bandes enherbées* ». Ils souhaitent de tout leur vœux que les règles puissent se négocier par territoire, en tenant compte des spécificités locales (nature de sols, des pentes, ...).

5. Questions posées par les agriculteurs à la recherche

Avec cette expérience, nous avons montré qu'en adoptant une posture de décideurs, les agriculteurs sont des utilisateurs directs des travaux de recherche. Cette expérience interroge sur les modalités de transfert des travaux de la recherche vers les praticiens. La livraison « brute » du matériau de recherche oblige les agriculteurs à traiter cette information. Ce travail est valorisant et leur facilite le passage à la formulation des évolutions du système.

Sur le thème du changement climatique, les agriculteurs ont exprimé différents pistes pour être en mesure de s'adapter. Leurs attentes concernent autant les sciences sociales que les techniques de production.

Ils s'interrogent notamment sur l'implication de la société et des décideurs pour le maintien de l'activité agricole dans chaque territoire. A ce titre, ils se demandent comment faire évoluer les réglementations agricoles pour qu'elles prennent en compte les nouveaux enjeux, comme les changements climatiques, en intégrant leurs spécificités territoriales au travers leurs interactions avec les autres secteurs économiques. Peut-on imaginer un lieu d'échange entre les différents acteurs d'un territoire pour réfléchir à la co-construction de projets partagés (exemple : création de retenues), permettant à chacun de profiter en quantité suffisante d'une ressource parfois limitée, comme l'eau, sensibiliser la population pour une meilleure acceptation sociale et ainsi contribuer à l'apaisement des tensions qui peuvent exister dans certaines régions comme en Poitou-Charentes. Les pratiques de chacun peuvent évoluer, si une orientation est donnée.

Les agriculteurs s'interrogent également sur la résilience de leur système d'exploitation et leur capacité d'adaptation aux changements. Ils savent aujourd'hui s'adapter. Par contre, à partir de quels seuils (température ou pluviosité) devront-ils changer de production ou d'activité pour certains, au risque de ne plus pouvoir vivre de leur métier. Ce phénomène doit-il être considéré comme une contrainte supplémentaire ou un atout permettant de donner un regain d'intérêt aux activités agricoles. Ils font confiance à la recherche et comptent beaucoup sur la structuration des filières, notamment pour leur mettre à disposition de nouvelles espèces ou variétés correspondant à la demande du marché.

Enfin, les agriculteurs ont insisté sur leur besoin de disposer de prévisions météorologiques précises à moyen terme, pour prendre en compte les aléas climatiques considérés à ce jour comme imprévisibles, et pouvoir anticiper ces phénomènes. Les prévisions sont soit sur des pas de temps très courts (quelques jours), ou au contraire très longs (30 ans et plus).

Photo : Réflexion sur le climat avec les agriculteurs de Saintes



Conclusion

L'analyse prospective conduite au travers du projet Climaster a donné des résultats qui se veulent ni exhaustifs, ni transposables à l'ensemble des exploitations des régions étudiées. Elle fait état du travail de réflexion conduit par les Chambres d'agriculture de Bretagne et Trame avec un certain nombre de groupes d'agriculteurs en régions Poitou-Charentes et Bretagne sur les stratégies d'adaptation permettant de faire face au changement climatique. Ce sujet qui ne représente pas une préoccupation majeure des agriculteurs de l'Ouest (voir

PROJET CLIMASTER

LES MODALITÉS ET LES CONSÉQUENCES DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES DANS LE GRAND OUEST

Module Prospectif

Version Octobre 2011



J.-B. Narcey, X. Poux

SOMMAIRE

<i>Pourra-t-on s'adapter demain au changement climatique dans le grand ouest ?</i>	1
<i>Analyse prospective des résultats de Climaster</i>	3
<i>Les spécificités de Climaster : aborder la question de l'adaptation au changement climatique du point de vue de l'exploitant et de l'écosystème</i>	3
<i>Articuler différents regards disciplinaires de Climaster sur le changement climatique</i>	4
Pour approcher le potentiel prospectif de Climaster : les « variables d'intérêt »	4
L'articulation des approches disciplinaires : le graphe motivé x dépendance	4
La question du local et du terrain	7
<i>Les résultats par volet</i>	8
En amont : les hypothèses climatiques	8
Les variables d'intérêt sol-plante	11
Les variables d'intérêt « jours agromorphiquement disponibles » et le risque de gel	13
Les variables d'intérêt « milieux naturels »	15
Les variables politiques et économiques et leur traduction spatiale	17
<i>La dynamique de l'atelier participatif : une interpellation suscitant bien une réflexion prospective des participants</i>	22
<i>Les enseignements de l'atelier participatif : un dispositif de prospective participative qui reste à améliorer pour qu'une rupture puisse éventuellement être considérée</i>	24
Un débat possible avec les agriculteurs... à condition de mettre au centre de la réflexion un système agricole de référence dans lequel ils se reconnaissent	24
L'exploitant est-il bien toujours l'acteur central	25
de l'adaptation au changement climatique ?	25
Un forum prospectif et une contextualisation des « variables d'intérêt » climatiques qui ne peuvent être conçus de la même manière selon les systèmes agricoles considérés	26
<i>Bibliographie</i>	27

POURRA-T-ON S'ADAPTER DEMAIN AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LE GRAND OUEST ? ANALYSE PROSPECTIVE DES RÉSULTATS DE CLIMASTER.

Les agriculteurs n'ont pas attendu les rapports du GIEC pour s'adapter aux évolutions climatiques et les intégrer dans leur stratégie d'exploitation. Malgré cette évidence, le changement climatique est un sujet rapidement polémique dans le milieu agricole quand il s'agit d'en envisager les conséquences à long terme. Les enquêtes sociologiques menées dans le cadre de Climaster montrent en effet que l'ensemble des discours relatifs au « Changement Climatique » (et les scénarios à 2050 et 2100) provoque une réaction de rejet de leur part car il est associé à un courant de pensée jugé catastrophiste et excessivement médiatisé.

Cette réaction ne doit pas être assimilée à un déni pur et simple des évolutions climatiques et des problématiques d'adaptation qu'elles posent au niveau des exploitations : les enquêtes réalisées par l'équipe en charge du volet sociologique du projet confirment une série d'adaptations fines et progressives, portant par exemple sur l'évolution des dates de semis et de récolte ainsi que sur les fréquences des traitements phytosanitaires. Sur un plan rétrospectif, les agriculteurs sont pleinement conscients d'évolutions climatiques à l'œuvre. Il y a donc un décalage entre le caractère tangible et progressif des évolutions climatiques passées et les discours d'alerte quand on envisage le futur. Pourquoi demain apporterait-il un bouleversement ? Pourquoi ne pourrait-on pas continuer à s'adapter progressivement ?

On touche ici un sujet central en prospective : la question des ruptures. Telle était la question posée au module prospective de Climaster : les résultats de ce projet amènent-ils à envisager des ruptures dans l'adaptation des exploitations du grand ouest ? Cette question se pose avec d'autant plus d'acuité que les projections du modèle ARPEGE relatives à l'évolution de la pluviométrie à l'horizon 2085 modélisent une perte de pluviométrie de moitié pour les mois d'été en Bretagne.

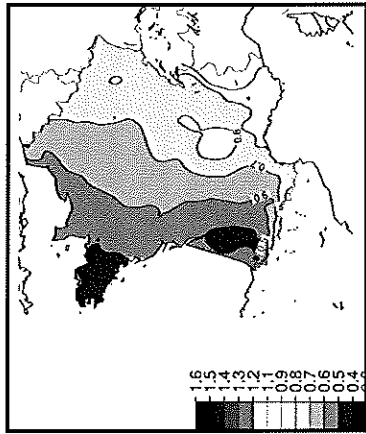


Figure 1 : Scénarios climatiques ARPEGE : indices sur l'Europe, Michel Diquié, 16 mars 2009, CNRM

Cette carte amène à envisager un changement d'ordre dans l'adaptation agricole au changement climatique. En effet les adaptations passées, mentionnées par les agriculteurs enquêtés, peuvent être qualifiées de « premier ordre » (évolution des pratiques et des références techniques conservant la logique d'ensemble du système de production) (B. Hubert, 2009). Dans le futur, le climat peut-il induire des changements de « second ordre » (mise en cause des raisonnements sous-jacents aux pratiques et références techniques, débouchant sur d'éventuelles réorientations des systèmes dans leur ensemble) et peser ainsi autant que la PAC ou la volatilité des marchés dans les stratégies des agriculteurs ?

L'apport du module prospectif dans Climaster est d'induire nécessairement une approche systémique de cette question. Dans notre cas, elle l'est même doublement :

- d'une part, en remettant dans une perspective d'ensemble les résultats des différentes composantes de Climaster, qui abordent chacune de leur côté différentes facettes de l'articulation entre changement climatique et agro-écosystème. Comment replacer ces résultats par rapport à la question exposée ci-dessus ?
- d'autre part, en considérant le changement comme une variable parmi d'autres qui conditionnent l'évolution des agro-écosystèmes : outre la PAC et les marchés évoqués ci-dessus, nous pensons aux évolutions du prix de l'énergie et aux demandes sociales relayées par les politiques publiques.

L'objectif du volet prospectif de Climaster est ainsi double : mobiliser les résultats scientifiques pour préciser les conséquences futures du changement climatique au niveau

local (quelles conséquences de la carte nationale de la figure ci-dessus sur les zones humides ? les bords de champs ?) et, ce faisant, sensibiliser les acteurs locaux à l'éventualité d'une rupture dans l'adaptation.

LES SPÉCIFICITÉS DE CLIMASTER : ABORDER LA QUESTION DE L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DU POINT DE VUE DE L'EXPLOITANT ET DE L'ÉCOSYSTÈME

Beaucoup de programmes de recherche posent la question du changement climatique dans une séquence liant de manière univoque les évolutions climatiques et les stratégies d'adaptation au niveau des systèmes fourragers. En simplifiant, les différences de productivité physique des cultures doivent être optimisées par rapport à une variable de forçage : le climat. Par construction, ces approches font abstraction des autres déterminants (Moreau et al., 2010).

Ces travaux ont le mérite de faire ressortir l'ampleur potentielle de l'impact agronomique du changement climatique et les registres d'adaptation dans la conduite de l'exploitation. Cependant, le caractère monofactoriel de la variable de forçage rend leurs résultats trop théoriques et, partant, les rend difficilement appropriables par les agriculteurs. Que ces résultats interpellent, certes. Mais comment les replacer dans un raisonnement qui correspond au point de vue des agriculteurs, et intègre donc, comme eux, une diversité de considérants et les pondère ?

Dans Climaster, ces considérants des stratégies des exploitants ont été classés en deux grandes catégories :

- les considérants « macro » : la PAC, les marchés, le prix de l'énergie, les politiques publiques et, bien entendu, le climat.
- Les considérants locaux, que Climaster appréhende sous l'angle particulier du fonctionnement des écosystèmes, avec deux problématiques : agronomique d'une part (jours agronomiquement disponibles, réserve utile des sols) et environnementale d'autre part (enveloppe des zones humides).

Précisons qu'en dépit de l'ambition d'ensemble de ce module prospectif, une certaine modestie dans les moyens mis en œuvre a prévalu. L'objectif n'était pas de formaliser des stratégies d'adaptation dans une approche globalisante, reposant notamment sur une modélisation intégrée et l'élaboration de scénarios pleinement formalisés. Il s'agissait d'avoir une approche exploratoire de la question, permettant de cerner le potentiel prospectif de Climaster, tant d'un point de vue scientifique que de sensibilisation.

Le principe d'ensemble retenu a ainsi reposé sur la conduite d'un atelier participatif de travail prospectif avec des agriculteurs, considérés *in fine* comme les acteurs les mieux placés pour identifier les enjeux d'adaptation à l'échelle de leur exploitation. Le principe était de leur proposer un jeu d'hypothèses contextuelles à la fois macro et local et de les inviter à considérer, dans ce décor, les résultats de Climaster : quels enjeux d'adaptation dans la conduite des exploitations ressortent de cette confrontation ?

ARTICULER DIFFÉRENTS LES REGARDS DISCIPLINAIRES DE CLIMASTER SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

La première étape de la démarche consiste à partir des différentes ressources présentes dans le projet Climaster : à quel potentiel prospectif renvoient-elles ? Comment s'articulent-elles ?

Pour approcher le potentiel prospectif de Climaster : les « variables d'intérêt »

Les échanges entre les chercheurs et les partenaires du projet ont précisé la notion de potentiel prospectif. Celle-ci consiste à faire ressortir et incarner la vulnérabilité des systèmes agricoles et environnementaux découlant du changement climatique. Finalement quand on parle spécifiquement de celui-ci, quels sont les objets agricoles et environnementaux en jeu ? De quoi parle-t-on spécifiquement si l'on considère que la variation du climat peut introduire des changements qu'on ne verrait pas aussi nettement sans cette variable de forçage ? Qu'est ce que les recherches de Climaster révèlent dans ce domaine ?

La réponse à ces questions s'est construite autour de la notion de « variable d'intérêt », dont les caractéristiques souhaitées sont doubles :

- porter de l'information climatique dans la compréhension de l'agro-écosystème et le cas échéant révéler ainsi des variables « cachées » dans son fonctionnement, qui ne se manifestent que sous ce forçage ;
- être significatives, dans une optique de sensibilisation :
 - o soit pour le scientifique, ce qui suppose qu'elle soit accessible (et qu'on puisse la manipuler dans le cadre d'une modélisation) ;
 - o soit pour le public et aux gestionnaires, en tant qu'elles constituent des manifestations observables et interprétables du changement climatique et renvoient à des enjeux territorialisés.

L'articulation des approches disciplinaires : le graphe motricité x dépendance

L'explicitation des variables d'intérêt travaillées dans les différents volets de Climaster a fait ressortir leur caractère dispersé, en raison du parti-pris de Climaster de rentrer dans la complexité « fine » des agro-écosystèmes au niveau local. Ainsi, on trouve parmi ces

variables d'intérêt des objets aussi différents que la pluviométrie et la température, l'occupation des sols, l'érosion et les systèmes fourragers... Que ces variables puissent être reliées entre elles en principe est une chose ; qu'elles puissent fonder une vision d'ensemble du système « sous contrainte climatique » en est une autre.

Après l'identification de ces variables d'intérêt, la seconde étape de la démarche prospective a consisté à les placer sur un graphe dit « motricité x dépendance », outil classiquement utilisé en la matière (Hatem, 1993). Un tel graphe est construit sur l'analyse des relations « qui détermine quoi dans le système ». Ce qui conduit à caractériser trois grands types de variables :

- les variables *motrices*, qui influencent le système en amont sans en dépendre (ex. ici le climat) ;
- les variables *résultat*, qui sont déterminées par l'ensemble des autres variables du système sans rétroagir directement sur elles ;
- les variables *relais*, à la fois déterminantes et déterminées, et qui jouent un rôle important dans la régulation du système et en constituent classiquement l'entonnoir, qui est mis au cœur de l'analyse (Ténière-Buchol, 1989).

La réflexion sur cette dernière catégorie de variable est donc centrale dans toute démarche prospective. Dans le cas de Climaster, on retrouve dans cette catégorie les composantes identifiées dans d'autres recherches sur le changement climatique et sur lesquels les agriculteurs peuvent jouer pour s'adapter : les systèmes de cultures, mais plus globalement les systèmes fourragers et d'élevage (Fellon et al., 2010).

Cette vision large des registres d'adaptation, ainsi que la volonté exposée plus haut de contextualiser le changement climatique parmi d'autres déterminants, nous ont amenés à considérer une catégorie spécifique de variables d'intérêt non couvertes par les autres volets de Climaster, à savoir les politiques publiques, les filières et les marchés. Ces aspects ont été traités spécifiquement dans le cadre de ce volet prospectif, en complément de la valorisation des résultats de modélisation portant sur d'autres types de variables du système : variables motrices climatiques (pluviométrie, température), variables résultats écosystémiques (carbone organique, qualité de l'eau, érosion...) et d'occupation des sols, variables relais écosystémiques (réservoir utile des sols – RU, zones humides potentielles,...).

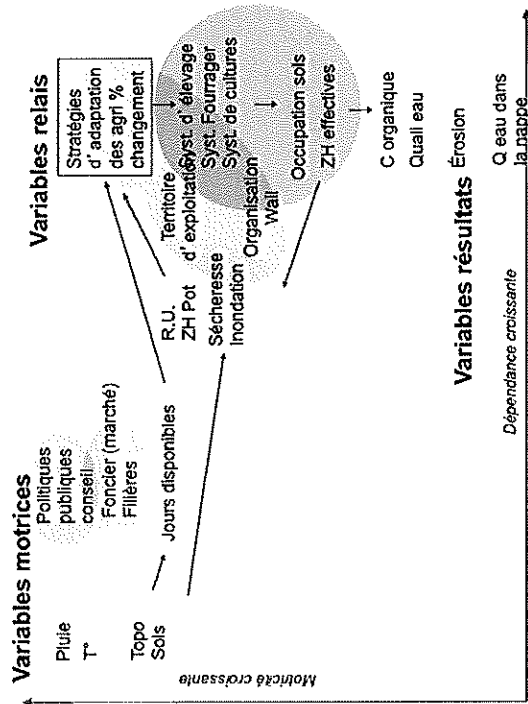


Figure 2 : le graphe motricité x dépendance du système « adaptation des exploitations agricoles au changement climatique dans un agro-écosystème local »

Ce schéma peut être lu dans l'organisation chronologique du projet. Conformément à l'objectif d'ensemble affiché plus haut — mettre en discussion avec les agriculteurs la confrontation entre des contextes agricoles et les résultats des simulations de Climaster — la composante « stratégies d'adaptation » constitue le point de mire de l'ensemble des volets de Climaster. Elle n'est pas modélisée en tant que telle, mais interpellée par les résultats de Climaster, de façon à révéler les capacités de décision des agriculteurs face aux contraintes qu'on leur soumet. L'hypothèse sous-jacente est que c'est au niveau du système de production que la stratégie d'adaptation au changement climatique peut centralement être exercée et que, par conséquent, le décideur en la matière est l'exploitant.

Dans la démarche cela revient à formaliser d'abord les projections prospectives pour l'ensemble des composantes du système considéré — à l'exclusion de celles relatives à la stratégie — et de verser ensuite ces projections au débat avec les agriculteurs locaux pour que cette stratégie émerge.

La question du local et du terrain

Nous venons d'exposer comment a été traité le parti pris systémique dans Climaster. Qu'en est-il de l'objectif de rendre compte des enjeux d'adaptation à un niveau local ? Outre la nature des variables d'intérêt exposées plus haut — et dont nous soulignons le caractère local — on retrouve ce parti pris dans le souci d'ancrer la réflexion dans des terrains réels.

Initialement, pour rendre compte du cadrage de Climaster à l'échelle du grand ouest, il était ainsi envisagé de conduire plusieurs ateliers participatifs, dans différents contextes climatiques et agricoles. Mais la recherche de terrains locaux de référence pour conduire la démarche prospective selon le cadre systémique exposé ci-dessus, susceptibles de réunir les objets et problématiques des différents volets de Climaster, s'est avérée rapidement problématique, pour les raisons suivantes :

- aucun terrain n'était étudié sur tous les volets à la fois : les uns le sont au croisement de l'analyse des systèmes d'exploitation et celle des systèmes biophysico-chimiques en jeu dans les transferts de polluants (Plaine-Fougère, Naizin, ...) tandis que les autres le sont au croisement de l'analyse des systèmes d'exploitation et celle des perceptions et facteurs de décision et d'adaptation par les exploitants (Centre-Bretagne, Perche, Maine et Loire) ;
- les deux types de terrains n'ont pas la même logique. Pour les premiers, il s'agit de bassins versants, échelle fonctionnelle à laquelle se jouent les transferts et les impacts environnementaux des pratiques agricoles et par conséquent retenue pour les modèles mobilisés. Les seconds résultent d'un échantillonnage d'enquête de systèmes d'exploitation laitiers par grandes zones climatiques du grand ouest, issues du volet 1 de Climaster : ces terrains ne correspondent donc pas à des entités géographiques ou territoriales bien délimitées pouvant servir de territoire de référence pour un exercice de prospective.

Au total, Plaine-Fougère est ressorti, parmi les terrains investigués dans le cadre de Climaster, comme le meilleur compromis. Il offrait en effet une bonne base de connaissances sur les aspects occupation des sols, systèmes d'exploitation et par ailleurs les chercheurs avaient une certaine approche experte des enjeux sociologiques sur la zone, du fait d'un partenariat ancien avec les agriculteurs lié à son statut de zone atelier.

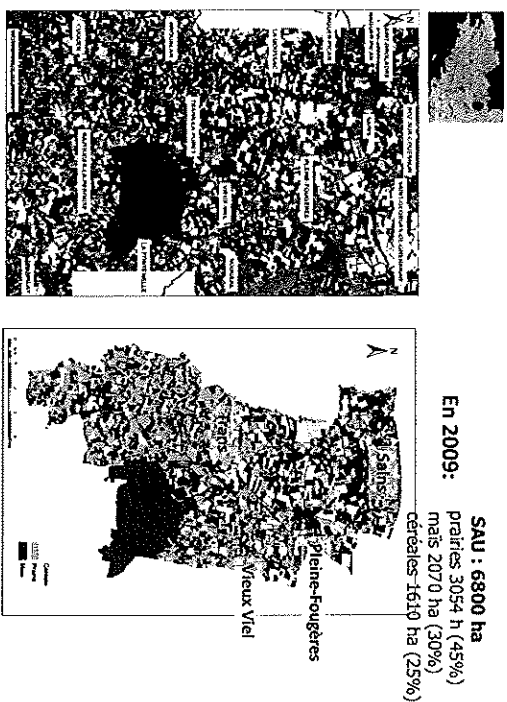


Figure 3 : situation et occupation des sols de Plaine-Fougère en 2009

LES RÉSULTATS PAR VOLETS

En amont : les hypothèses climatiques

Différentes composantes du climat sont pertinentes à prendre en compte, soit qu'elles constituent directement une variable d'intérêt (par exemple, la pluviométrie) et/ou qu'elle rentre dans l'explication d'un impact moins direct (par exemple l'évolution de la réserve utile des sols) :

- la pluviométrie ;
- les températures ;
- les nombres de jours de gel.

Trois questions se posent quant à la mobilisation des modèles climatiques régionalisés :

- le choix du (ou des) scénario GIEC de référence, parmi les six principaux étudiés. Dans le cas de Climaster, il n'y avait pas d'enjeu particulier à contraster sur des hypothèses

climatiques plus ou moins contraignantes. Nous avons donc retenu le scénario médian (A1B), qui anticipe une hausse moyenne des températures de + 2,8 °C¹, considéré comme le plus proche d'une évolution tendancielle : « la croissance très rapide (des émissions) s'appuie sur des sources d'énergie équilibrées entre fossiles et autres (nucléaire, renouvelables). De nouvelles technologies plus efficaces sont introduites rapidement. »

- le choix de la station météo de référence, pour laquelle il s'agit d'extrapoler les séries passées en fonction du scénario GIEC régionalisé. La station retenue est la plus proche de la zone d'étude de Plaine Fougère, Louvigny du Désert. Malgré une proximité géographique — la station est située à 35 km à l'est de Plaine Fougère — les agriculteurs ont noté une différence de climat par rapport à leur zone, plus humide que celle de Louvigny.

Le choix de l'horizon temporel, les projections du GIEC distinguant le futur proche (2030) et lointain (2060). Le premier n'exprime pas complètement les impacts climatiques attendus ; le second apparaît trop éloigné pour faire des anticipations plausibles en termes socio-économique. Nous reviendrons sur ce thème dans la troisième partie de cette note, mais là encore l'enjeu n'étant pas de coupler un modèle climatique avec un modèle sol-plante par exemple, il est apparu intéressant de considérer les deux termes au regard de leurs enseignements qualitatifs.

Le graphique suivant indique l'évolution modélisée de la pluviométrie sur l'année (en bleu) et sur les trois mois d'été (en rouge) sur la station de Louvigny-du-Désert.

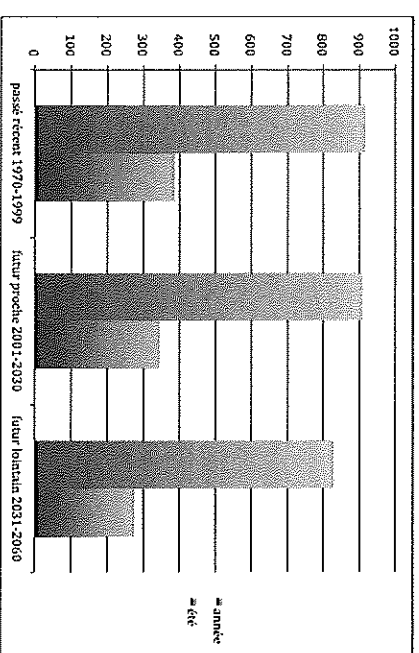


Figure 4 : Évolution modélisée de la pluviométrie à Louvigny-du-Desert, en distinguant futurs proche et lointain et pluviométrie annuelle et estivale.

¹ On rappellera que la fourchette des hausses de température dans les 6 scénarios du GIEC va de +1,8 à +4°C selon le caractère plus ou moins « vertueux » du scénario en matière d'émissions.

Deux enseignements de ce graphe, sur la pluviométrie :

- les impacts (simulés) du changement climatique connaissent une accélération entre le futur proche et lointain (-1% de pluviométrie annuelle entre 2000 et 2025 et -9% entre 2025 et 2050) ;
- ces impacts se concentrent essentiellement en été (-11% entre 2000 et 2025 et encore -20% entre 2025 et 2050 ; soit près de -30% sur 50 ans), période la plus critique pour les ressources en eau.

La prise en compte des séries et de la variabilité temporelles

Dans l'utilisation des modèles, les discussions ont montré l'importance de considérer le changement climatique dans trois perspectives temporelles :

- l'évolution des moyennes, en tant que balises d'une tendance de long terme (cf. le graphe suivant présenté dans le cadre de Climfour en Midi-Pyrénées).

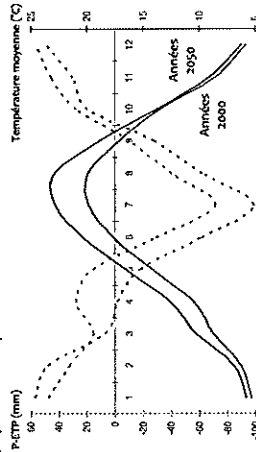


Figure 5 : Température mensuelle moyenne (en trait plein) et bilan hydrique (en pointillés) comparés entre les années 2000 (bleu) et les années 2050 (rouge) sur le piémont pyrénéen (400m alt.). (Figure tirée de Follet et al, 2010)

- l'évolution des extrêmes (cf. par exemple les questions des inondations, des sécheresses ou du gel dans un hiver globalement plus doux) ;
- la prise en compte de séries consécutives d'années sèches ou humides, susceptibles d'avoir des conséquences environnementales (par exemple l'enveloppe des zones humides potentielles qui résulterait d'une série d'années sèches ou au contraire, humides) ou d'adaptation agricole (par exemple gestion du système fourrager après quelques années exceptionnelles, allant au-delà des capacités des systèmes à entretenir les chocs) du fait d'effets de seuil atteints par accumulation.

7 Ainsi, l'enchaînement des sécheresses de 2010 et de début 2011 a déstabilisé les systèmes fourragers herbagers. A contrario, une série de gelées tardives pourrait avoir le même effet sur le maïs.

Ces réflexions sont à considérer comme des pistes de travail à creuser pour valoriser le potentiel prospectif de Climaster — elles n'ont pas été instrumentées dans le cadre du projet. On soulignera qu'elles ne se traitent pleinement qu'à une échelle d'analyse fine, celle de l'écosystème ou de l'exploitation, considérées en dynamique.

Les variables d'intérêt sol-plante

L'impact du climat sur la végétation via leur bonne alimentation hydrique est une des premières questions qui vient à l'esprit. Plusieurs variables sont à considérer dans cette perspective, qui s'interprètent à diverses échelles et sous plusieurs angles :

- la pluviosité (notée P dans les figures qui suivent) ;
- l'évapotranspiration potentielle (ETP qu'on appelle maintenant ETo, Evapotranspiration de référence) ;
- l'évapotranspiration réelle (ETR, qui dépend du rayonnement global Rg, la température T° et le vent VV Philippe pourras-tu vérifier ?) ;

De ces variables on peut inférer : P-ETR (quantité d'eau disponible pour l'infiltration et l'écoulement) et ETR-ETP (indicateur de sécheresse), ETR/ETP (indicateur de confort hydrique pour la plante).

Ces variables se combinent à l'échelle du sol et permettent d'estimer une variable d'intérêt intégratrice : la réserve hydrique, état de la réserve en eau du sol à un instant donné (RH). Cette réserve utile dépend des flux d'eau entrant (P) et sortant (fonction de l'ETP et de l'ETR) ainsi que du type de sol, en fonction de sa capacité à stocker l'eau en fonction de sa réserve utile (RU). Le principe est d'estimer comment cette réserve évolue une fois que le « réservoir sol » est rempli (à la sortie des pluies hivernales, si tant est qu'elles soient suffisantes pour le remplir).

On distingue ici trois situations contrastées selon que le sol a une forte capacité de stockage (RU = 250 mm), moyenne (120 mm) ou faible (50 mm).

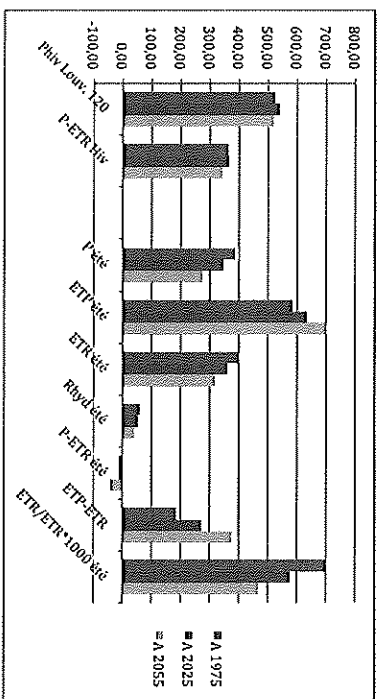


Figure 6 : simulation des variables d'intérêt pour un sol de RU 120 mm : en année moyenne la réserve hydrique estivale reste positive, mais le stress hydrique augmente.

Ces résultats peuvent être projetés en année moyenne, faisant ressortir les différentes phases de remplissage de la réserve hydrique du sol ou, au contraire, de son vidage.

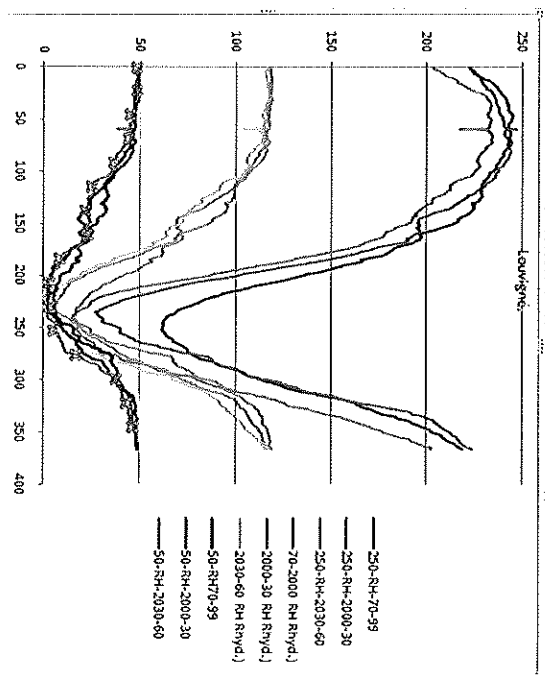


Figure 7 : évolution de la réserve hydrique dans l'année. L'abscisse correspond à l'avancement dans l'année (0 = 1^{er} janvier, 365 = 31 décembre).

Le graphique représente 3 situations : RU élevé (250 mm) trois courbes du haut ; basse (50 mm) trois courbes du bas et intermédiaire (120 mm) trois courbes médianes. Pour ces trois situations, trois séries temporelles sont représentées : présente (70-99) ; futur proche (2000-30) et lointain (2030-60).

Les modèles montrent que l'impact sur la réserve hydrique estivale est marqué dès le futur proche et est davantage marqué pour les sols à forte RU, dont la réserve hydrique baisse plus tôt dans l'année. A contrario, les sols « secs » le restent et connaissent peu de modifications. À noter que les sols profonds ne se rechargent pas complètement à la fin de l'hiver dans le futur lointain.

Les variables d'intérêt « jours agronomiquement disponibles » et le risque de gel

Les jours agronomiquement disponibles sont ceux où les conditions de terrain permettent de réaliser les opérations prévues dans un champ. Trois facteurs sont pris en compte : la sécheresse du sol, sa portance et les jours de pluie. Ces facteurs affectent différents chantiers : semis de maïs et de céréales (le sol doit être portant, humecté et il ne doit pas pleuvoir), récolte du maïs (portance et pluie) et récolte d'herbe (pluie).

Les simulations montrent qu'il n'y a pas de bouleversement à attendre relativement à ce critère dans l'avenir : aucun chantier ne se trouve obéré. Les résultats sont les plus significatifs pour le semis du maïs.

Semis :
8 années sur 10, il y a au moins X jours disponibles dans la période (du 1/4 au 31/5)

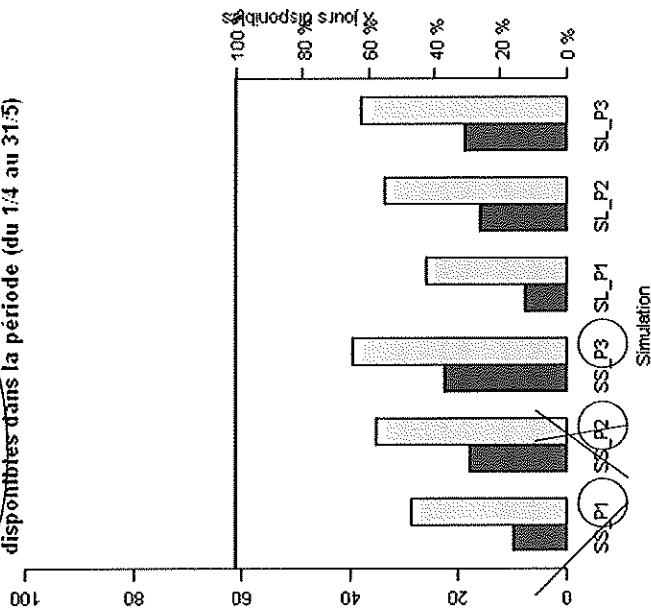


Figure 8 : évolution simulée du nombre de jours agronomiquement disponibles pour le semis du maïs (fréquence 8 années sur 10 ; le nombre de JAD n'est inférieur à ces valeurs que 2 années sur 10). En vert clair : les jours disponibles optimaux ; en vert foncé les jours avec risque (portance « limite »...). SS : sols sableux (plus séchant) ; SL : sols limoneux (moins portants) ; P1 : présent ; P2 : futur proche ; P3 : futur lointain.

D'une manière générale, les jours disponibles augmentent pour la plupart des chantiers, qu'il s'agisse du maïs ou de l'herbe. Sur le plan de l'accès aux parcelles, les choses se simplifient plutôt : il fait sec plus tôt et les sols se rechargent en eau plus tardivement dans la saison. Les évolutions climatiques ont tendance à augmenter la souplesse dans la conduite des différents chantiers. La seule atténuation, mineure, à ce constat concerne les chantiers d'automne qui peuvent devenir un peu plus tendus dans le futur proche.

Le principal enjeu d'adaptation climatique qui ressort concerne calage du cycle du maïs dans l'année :

- d'une part, la sécheresse plus précoce et marquée pousse à semer plus tôt, ce que le climat permet — comme nous venons de le voir ;
- d'autre part, le nombre de jours de gel s'atténue sans devenir négligeable, passant de 30 à 40. En outre, leur répartition dans l'année reste sensiblement identique et ne fait pas disparaître les risques de gel tardif MERCI DE VÉRIFIER.

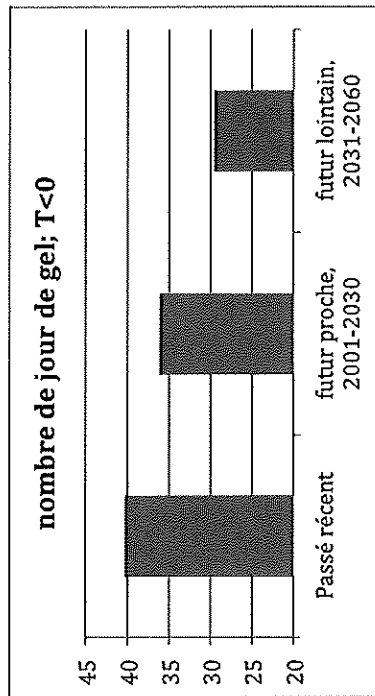


Figure 9 : évolution du nombre de jours de gel (Lorraine-du-Désert)

Au total, le risque d'exposition au risque « gel » peut augmenter alors que, paradoxalement, les tendances semblent lever cette contrainte.

Les variables d'intérêt « milieux naturels »

Dans le graphique motricité x dépendance, les variables milieux naturels ont le statut de variables résultats.

Les variables d'intérêt identifiées sont le carbone organique, la qualité de l'eau (approchée par la teneur en NO₃), l'érosion et la quantité d'eau dans la nappe (recharge). Dans le système étudié, elles n'influencent pas directement les pratiques agricoles, même si elles peuvent révéler des tensions d'ordre socio-politique à l'échelle du bassin versant.

Une difficulté dans l'estimation de l'évolution de ces variables est la temporalité des phénomènes climatiques qui les commandent : par exemple, les inondations et l'érosion

dépendent d'événements extrêmes et courts que les modèles climatiques appréhendent mal. Par ailleurs, l'occupation des sols apparaît comme plus déterminant sur ces variables que les variations climatiques que l'on peut anticiper (au « grain » considéré).

Des lors, dans Climaster, l'approche consistant à isoler l'effet des évolutions climatiques s'est avérée plus délicate à conduire pour ces variables qui dépendent d'un grand nombre de facteurs.

Par exemple, les deux figures suivantes montrent la relation entre la concentration en nitrates et l'élévation de la température de l'air et le débit du cours d'eau.

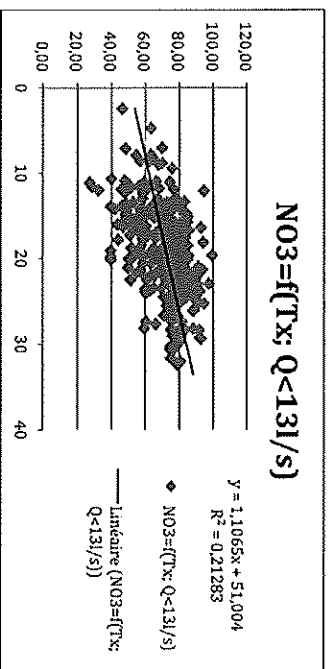


Figure 10 : relation constatée entre la concentration en nitrates dans l'eau et la température de l'air

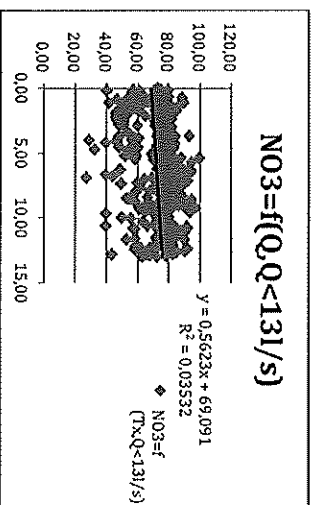


Figure 11 : relation constatée entre la concentration en nitrates dans l'eau et le débit des cours d'eau (jusqu'à 13/s)

Mais ces relations dépendent aussi des concentrations considérées :

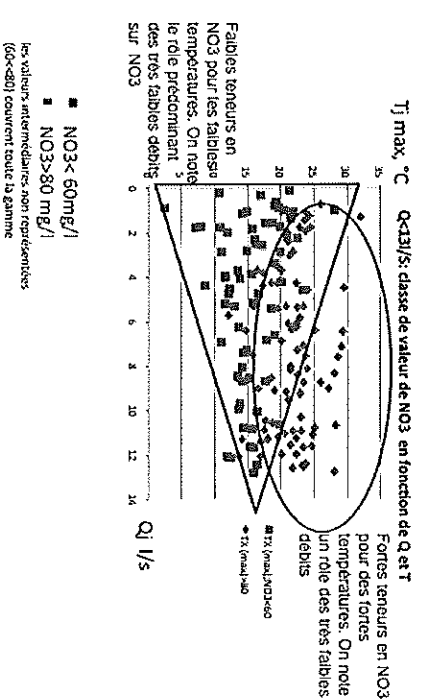


Figure 12 : relation constatée entre la concentration en nitrates dans l'eau en fonction de la température et du débit des cours d'eau (jusqu'à 13/s). La forme de la relation dépend de la gamme de concentration : l'effet débit l'emporte quand les concentrations sont < 60 mg/l ; l'effet température est plus marqué pour les concentrations > 80 mg/l.

À ce stade de l'analyse, il s'est surtout agi d'identifier les processus à considérer, en lien avec le climat et de prendre la mesure des travaux à conduire.

Valérie pourras-tu compléter ?

Les variables politiques et économiques et leur traduction spatiale

Dans l'approche de Climaster, la question posée est celle de la part *relative* que peut être amené à jouer le changement climatique dans la conduite des exploitations, compte tenu des autres facteurs en jeu. Dans cette perspective, les variables politiques et économiques, avaient un double statut :

- elles devaient être déterminantes dans la conduite des exploitations ;
- elles devaient être indépendantes du climat.

Le raisonnement d'adaptation se pose, à l'instar de la situation actuelle, à la croisée des facteurs climatiques et des signaux politiques et économiques. La complexité des facteurs à considérer a amené à envisager des simplifications et à envisager deux images contrastées, que l'analyse de la situation actuelle identifie comme des voies d'adaptation cohérentes aux

signaux économiques et climatiques. On retrouve ici la polarisation herbe / maïs présente dans la problématique de développement de l'agriculture du grand Ouest, avec des arguments *a priori* équilibrés dans les stratégies, sans entrer dans une caricature « tout herbe » ou « tout maïs ». On appuiera cette analyse sur l'étude de cas réels présents sur le bassin de Plaine-Fougère :

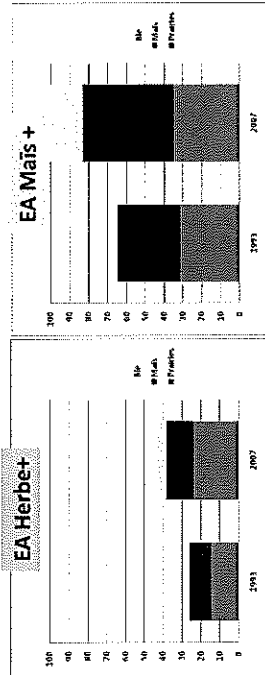


Figure 13 : deux stratégies de développement contrastées sur le bassin de Plaine-Fougère entre 1993-2007. La distinction vient de la part relative de l'équilibre herbe/maïs dans la conduite des exploitations.

Dit autrement, la question que l'on voulait éclairer dans l'atelier participatif présenté infra était celle de la capacité à intégrer le changement climatique dans ces deux voies de développement, sans supposer que ce changement surdéterminerait à lui seul l'occurrence d'une ou l'autre.

Autre argument qui a conduit à envisager cette polarisation : l'importance de l'équilibre de ces cultures dans les variables d'intérêt environnemental (cf. supra). Qu'il s'agisse de la qualité de l'eau, de l'érosion ou de manière moins directe de la densité de haies, la proportion de prairies dans un bassin versant reste un critère déterminant.

Au total, l'analyse sur les variables s'est articulée autour de deux volets :

- l'identification d'hypothèses contrastées sur des variables politiques et économiques susceptibles de favoriser plutôt le maïs ou au contraire l'herbe (scénarios « maïs » et « herbe ») dans un contexte globalement laitier ;
- une traduction spatiale à l'échelle du bassin de Plaine-Fougère.

Les hypothèses économiques et politiques

L'équilibre économique qui favorise le développement du maïs est complexe : si la production de matière sèche est relativement sûre, d'une part la culture coûte relativement cher à produire — et ses coûts de production intrants et mécanisation sont directement liés au pétrole — et d'autre part elle doit être complétée par des tourteaux de soja également coûteux. Sa rentabilisation n'est acquise que si les gains de productivité qu'il permet peuvent être rentabilisés (donc un prix du lait qui « couvre » ces coûts et une demande en volume élevée) et qu'en outre le prix des facteurs de production reste acceptable. L'herbe se justifie symétriquement de par les économies de charges qu'elle permet : moins de productivité physique, mais des coûts également moins élevés. Un choc pétrolier brutal serait susceptible de remettre en cause la rentabilité du maïs, toutes choses égales par ailleurs. Mais si les choses ne sont pas égales par ailleurs et que ce choc peut se répercuter sur le prix du lait (du fait d'une raréfaction de l'offre), alors le maïs peut redevenir attractif...

Trois fondamentaux économiques sont donc à considérer dans cette perspective : le prix du pétrole, celui du tourteau de soja et celui du lait. Nous présentons la manière dont la courbe a été extrapolée à l'horizon 2030 pour la première variable uniquement, faute de place.

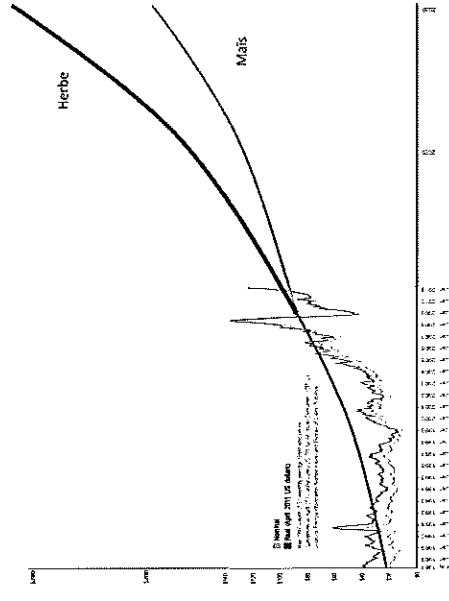


Figure 14 : Évolution du prix du pétrole dans le scénario favorable au maïs (200 \$ en 2030 : hausse modérée) et celui favorable à l'herbe (300 \$ en 2030).

En complément de cette analyse strictement économique, il faut considérer le rôle des politiques publiques et de la politique agricole commune en particulier. La situation actuelle, elle même héritée du passé, peut s'analyser comme un soutien global à l'investissement, les aides restant proportionnelles à la dimension des exploitations et donc, en première corrélation, à leur capital d'exploitation. À l'appui de cette vision, les difficultés à envisager une nouvelle répartition des aides de la PAC s'expliquent au regard du risque économique qu'elle induirait, les charges de structure étant élevées pour beaucoup d'exploitations. À l'inverse, une autre logique politique est envisageable, qui inciterait les exploitations à réduire leurs charges de structure, notamment via la rémunération de services environnementaux.

Au total, les deux contextes suivants sont proposés comme plausibles avec des images maïs et herbe en 2030

	Maïs	Herbe
Prix du pétrole	Élevé (moyenne lissée x 2 entre 2030 et 2011)	Très élevés (moyenne lissée x 4 entre 2030 et 2011)
Prix des céréales	Variable mais globalement élevés (moyenne lissée x3 entre 2011 et 2030)	Variable mais globalement élevés (moyenne lissée x3 entre 2011 et 2030)
Prix du tourteau de soja	Moyennement élevés (moyenne lissée x2 entre 2011 et 2030)	Très élevé (moyenne lissée x5 entre 2011 et 2030)
Prix du lait	x2,5, suit la hausse du prix des aliments du bétail	x2,5, ne suit pas la hausse du prix des aliments du bétail (effet cisau des prix et des coûts d'alimentation)
Europe	Agro-exportatrice sur les marchés mondiaux ; recherche de volumes	Marchés régulés à l'échelle européenne (grands blocs) ; maîtrise des volumes
PAC	Découplage mais aides proportionnelles à la dimension économique de l'exploitation – budget constant	Découplage et plafonnement des aides, verdissement "herbe" du 1er pilier – budget en baisse, recherche d'économies.

Il est important d'insister sur le caractère contextuel de ces jeux d'hypothèses : qu'ils soient plus favorables qu'à une stratégie « maïs », qu'à une stratégie « herbe » est l'effet recherché. Par contre, ils ne dictent pas tout et sont conçus de manière à laisser des marges de manœuvre dans la conduite des exploitations : une stratégie « herbe » est tout à fait

envisageable dans un contexte « maïs » (et réciproquement), car d'autres déterminants plus locaux rentrent en compte. Au total, ces contextes suggèrent l'émergence d'un modèle dominant, mais non hégémonique.

La déclinaison territoriale des images « maïs » et « herbe »

En complément de cette analyse « macro » économique et politique, il était nécessaire de proposer une déclinaison territoriale de ces images, conformément au cadrage « local » de Climaster. Si les images « modèle dominant maïs » et « modèle dominant herbe » pouvaient être approchées par des surfaces globales à l'échelle du site de Pleine-Fougère (avec respectivement 3000 et 4000 ha pour chacune de ces cultures), restait à proposer une répartition spatiale plausible au sein du site : dans quelles parcelles le maïs/herbe sont-ils susceptibles de se développer en priorité ? Cette déclinaison s'est appuyée sur une analyse rétrospective de l'évolution de l'usage des sols sur Pleine-Fougère, faisant ressortir les logiques spatiales à l'œuvre dans les modifications de l'équilibre céréales/maïs/herbe (cf. Figure 3) : quels sont les invariants et quelles sont les règles qui expliquent un changement d'usage ? Les critères pertinents qui ressortent sont variés : distance au cours d'eau, hydromorphie des sols ; densité des chemins ; distance aux routes goudronnées ; taille, pente et orientation des parcelles ; voisinage en cultures (ou prairies) ; longueur de bocage par rapport au périmètre de la parcelle.

Sur cette base, les cartes d'occupation des sols extrapolées à l'horizon 2030 reposent sur des inflexions contrastées des tendances entre 2009 et 2030, qui se traduit par une variation de pondération des différents critères considérés (ceux listés ci-dessus). Par exemple, alors que les parcelles planes seront préférentiellement en maïs dans l'image du même nom, elles seront plus facilement en herbe dans le scénario alternatif, et ainsi de suite pour chaque facteur pondéré.

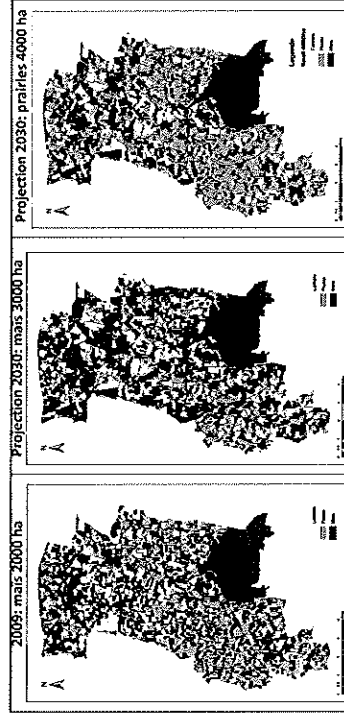


Figure 15 : l'occupation des sols de Plaine-Fougère : situation actuelle (2009) ; image « maïs » à 2030 et image « herbe » à 2030

LA DYNAMIQUE DE L'ATELIER PARTICIPATIF : UNE INTERPELLATION SUSCITANT BIEN UNE RÉFLEXION PROSPECTIVE DES PARTICIPANTS

Comme on l'a évoqué plus haut, l'atelier participatif organisé sur le secteur de Plaine-Fougère a pu être organisé en bénéficiant des partenariats établis de longue date entre les agriculteurs locaux et les chercheurs de la zone atelier. En dépit du sujet, dont on a vu qu'il pouvait en règle générale susciter scepticisme et réticence de la part du monde agricole, ce contexte a permis d'installer sans ambiguïté cette démarche de valorisation des travaux de Climaster — tels que présentés dans les pages qui précèdent — dans un climat de confiance et de collaboration.

Néanmoins, ces acquis favorables du partenariat local recherche-agriculture ne garantissent pas que l'exposé des résultats de Climaster permettraient d'engager un débat prospectif avec les participants : ceux-ci accepteraient-ils de les retenir comme des repères fiables pour poser les enjeux à débattre ? Joueraient-ils également le jeu de se projeter dans le futur en plaçant au centre de l'effort prospectif la question du changement climatique, alors même que tant d'incertitudes pèsent par ailleurs sur l'avenir de leur secteur d'activité ?

Pour maximiser les chances que cet atelier « fonctionne », les choix méthodologiques suivants ont été retenus :

1. À l'opposé d'une démarche « pédagogique », les objectifs de l'atelier ont été formulés en abordant les participants en tant qu'experts de leur propre situation, en poussant au bout le parti pris consistant à considérer que les agriculteurs sont les mieux placés pour juger de leurs futures stratégies d'adaptation. Ainsi, l'atelier a été d'emblée introduit en annonçant les finalités suivantes : « quelles nouvelles question pour la recherche ? Quelles pistes pour les collectivités et le conseil ? », les cibles à « sensibiliser » n'étant pas ainsi exclusivement agricoles et les agriculteurs étant eux même placés en position de formuler des messages à l'attention de leurs partenaires, chercheurs y compris.

2. Tirant partie des enseignements du volet sociologique de Climaster, l'interpellation des participants pour susciter leur réflexion prospective n'a pas consisté à mettre en avant les déterminants climatiques seuls mais, comme on l'a détaillé plus haut, à le mettre en regard avec d'autres déterminants puissants de l'agriculture. Pour cela, aux côtés des résultats des simulations de Climaster, les deux trajectoires agronomiques plausibles et typées : herbe / maïs ont été exposées en détail lors de la réunion. Leurs images résultantes sur le territoire ont été alors proposées comme support permettant de se projeter dans deux contextes territoriaux et agricoles possibles (cf. Figure 15), afin d'y considérer successivement les conséquences des simulations issues de Climaster.

3. Bien que l'horizon temporel classiquement retenu pour traiter du changement climatique soit au minimum 2050 (voir 2100), il a été ici choisi de situer les réflexions prospectives à l'horizon 2030. Ce choix résulte directement du choix méthodologique précédent : s'il n'est pas optimal lorsque l'on considère la question du changement climatique seule — dont les effets s'appréhendent plus pleinement à des horizons plus lointains — il s'avère bien approprié si l'on considère les autres déterminants avec lesquels le changement climatique est relativisé (PAC, Marchés, prix du pétrole), dont les dynamiques restent raisonnablement appréhendables à cet horizon, et plus difficilement au-delà.

De fait, la dynamique de l'atelier est venue globalement confirmer la pertinence de ces choix méthodologiques. Ainsi, les résultats de Climaster n'ont fait l'objet d'aucun scepticisme de principe : s'ils ont été discutés de manière parfois critique, ils l'ont été de façon argumentée, ce qui témoigne d'ailleurs de leur bonne appropriation par les participants. Surtout, le dispositif proposé comme support de projection dans l'avenir (trajectoires et images résultantes en 2030) a été bien accepté comme règle du jeu.

Il faut cependant souligner qu'il n'a finalement fonctionné que pour l'image « Maïs », constat qui ne doit sans doute rien au hasard. En raison des disponibilités des uns ou des autres, ou peut-être de marques d'intrigues quant au sujet différenciés selon les profils des

agriculteurs, il s'est avéré que l'ensemble des participants étaient engagés dans des itinéraires techniques valorisant le maïs, l'herbe ne constituant pour eux qu'une culture d'appoint par défaut (ne qui n'excluait pas qu'elle puisse occuper néanmoins une part très significative de leur assolement). Dès lors, la mise en perspective des résultats de Climaster dans l'image « maïs 2030 » a donné lieu à une discussion assez serrée sur leurs conséquences possibles dans un « système maïs » et sur les leviers permettant de les gérer (cf. ci-après) : les agriculteurs présents ont « joué le jeu » proposé, argumentant et contre-argumentant face aux relances des animateurs pour mettre en avant les éventuelles difficultés d'adaptation. Mais lorsque l'image « herbe 2030 » a été proposée, ce jeu s'est en quelque sorte bloqué : faute de pouvoir adhérer à la crédibilité même de cette seconde image, les participants n'ont pu qu'afficher leur scepticisme quant à la viabilité de l'itinéraire technique ainsi illustré, changement climatique ou pas. Plutôt que celui-ci, le propos central est devenu : l'incontestable supériorité du maïs sur l'herbe, quelque soit la situation. Dès lors, les hypothèses proposées et les résultats de Climaster se sont retrouvés occultés par les termes classiques de ce débat, dont les familiers des milieux agricoles bretons connaissent bien le caractère fortement idéologique.

LES ENSEIGNEMENTS DE L'ATELIER PARTICIPATIF : UN DISPOSITIF DE PROSPECTIVE PARTICIPATIVE QUI RESTE À AMÉLIORER POUR QU'UNE RUPTURE PUISSE ÉVENTUELLEMENT ÊTRE CONSIDÉRÉE

Un débat possible avec les agriculteurs... à condition de mettre au centre de la réflexion un système agricole de référence dans lequel ils se reconnaissent

Les lignes qui précèdent montrent que l'effort conduit dans ce volet prospectif de Climaster de contextualiser le changement climatique, au sein d'autres déterminants incontournables de la stratégie des exploitants, a bien porté ses fruits : il a rendu possible une dynamique de débat sur le changement climatique avec les agriculteurs. Cependant, il ressort également qu'il est nécessaire de veiller à ce que cette contextualisation se soit pas, en elle-même, sujette à des résistances de la part des agriculteurs. Autrement dit, il semble que le contexte agricole et territoriale où le changement climatique est « mis en scène » ne doit pas constituer, en lui-même, une rupture par rapport au modèle technico-économique d'exploitation dans lequel l'agriculteur est lui-même engagé (ex : le passage d'un système maïs à une système herbe dominant) : la rupture ne doit pas être dans l'hypothèse de départ

mais doit bien, éventuellement, découler de l'analyse des conséquences du changement climatique. Fondamentalement, il semble ainsi difficile de demander aux agriculteurs de comparer les vulnérabilités respectives de différents modèles technico-économiques face au changement climatique, ainsi que l'organisation de l'atelier invitait à le faire : trop engagés dans l'un ou l'autre de ces modèles, les participants sont naturellement enclins à le défendre face aux autres, et perdent alors de vue le déterminants « changement climatiques » dans un débat qui dépasse largement ce seul aspect.

L'exploitant est-il bien toujours l'acteur central de l'adaptation au changement climatique ?

Maïs revenons à la question initiale qui fonde ce module prospectif : les résultats de Climaster amènent-ils à envisager des ruptures dans l'adaptation des exploitations du grand ouest ? Plus précisément, si l'on observe que les évolutions climatiques passées et actuelles motivent bien des changements de premier ordre (adaptation des pratiques), les conjectures climatiques sur le futur peuvent-elles motiver des changements de second ordre (évolution des systèmes) ? Sur cette question, il est clair que l'atelier prospectif de Pleine-Fougère ne permet pas de répondre par l'affirmative, tout au moins vis-à-vis des systèmes « Maïs ». Ainsi, la conjonction, suggérée par les résultats de Climaster, entre un gel plus tardif et une sécheresse plus précoce poussant à avancer les dates de semis, fait peser un risque sur la culture du Maïs : la participants ont exclu vigoureusement que ce risque puisse justifier une réorientation de leurs systèmes, arguant que des changements de premier ordre seraient suffisants pour y faire face. Cette certitude affichée par les participants s'appuie, dans un premier niveau d'analyse, sur une confiance très forte dans la plasticité de la culture face aux aléas climatiques. La discussion approfondie conduite avec eux débouche cependant sur un second niveau d'analyse qui dépasse ce seul niveau technique du débat. Cette confiance dans la plasticité de la plante tient elle-même à la conviction d'être insects, en tant qu'exploitants, dans une filière très intégrée au sein de laquelle la recherche sur l'évolution variétale ne saurait être négligée – elle ne le fut pas dans le passé, elle ne le sera pas à l'avenir. En d'autres termes, il ne semble faire aucun doute que les semenciers, intéressés qu'ils sont à ce que le système « maïs » perdure, anticiperont et même anticipent déjà le changement climatique dans leurs efforts de Recherche & Développement, et seront en mesure de proposer les changements de premier ordre permettant de rendre inutile tout effort de changement de second ordre. Conscients d'être situés à l'aval de ce niveau de décision, de l'existence de nombreux acteurs économiques puissants et intéressés au maintien d'une filière intensive fondée sur le maïs et la mécanisation (des semenciers aux fournisseurs d'intrants et de fuel), les agriculteurs engagés dans des systèmes fondés sur le

mais estiment ainsi en quelque sorte être pris en charge par un système qui les dépasse et être un maillon d'une stratégie d'adaptation dont ils sont loin d'être les seuls opérateurs. Leur appréhension de l'adaptation au changement climatique découle clairement de cette situation.

Ce constat questionne fortement l'un des partis pris marquant la spécificité de Climaster, exposé au début de ce chapitre : l'idée selon laquelle la question de l'adaptation du changement climatique doit d'abord être abordée du point de vue de l'exploitant, opérateur supposé central – sinon unique – de cette adaptation. Cette figure de l'exploitant-stratège s'avère, dans le cas des systèmes orientés « maïs », par trop simpliste et ne rencontre pas la représentation qu'ont d'eux-mêmes les participants à l'atelier. Leur refus de considérer comme plausible la nécessité d'un changement de second ordre pour s'adapter dans les prochaines décennies au changement climatique ne doit pas simplement conduire à conclure à une attitude de déni face aux risques pointés : il suggère surtout l'idée que « le point de vue de l'exploitant » n'est pas suffisant pour aborder cette question, lorsque l'on est en présence d'une filière aussi intégrée. En fin d'atelier, l'un des animateurs a formulé l'hypothèse suivante : « Bon d'accord. Si je vous comprends bien, le prochain atelier, ce n'est pas avec vous qu'il faut le faire, mais avec les semenciers ! » La réponse de l'un des participants, songeuse et sans trace de plaisanterie, fut la suivante : « Peut-être bien, oui... »

Un forum prospectif et une contextualisation des « variables d'intérêt » climatiques qui ne peuvent être conçus de la même manière selon les systèmes agricoles considérés

Peut-être bien, en effet, qu'une rupture provoquée par le changement climatique ne peut-être envisagée qu'en associant l'ensemble de la filière où s'inscrivent les systèmes d'exploitation orientés vers la culture du maïs. Un tel élargissement des parties prenantes à la réflexion prospective serait-il alors en mesure d'envisager, sur la base des résultats de Climaster, d'envisager une rupture dans la stratégie d'adaptation, c'est-à-dire des changements de second ordre impliquant des modifications structurelles des systèmes agricoles ? Le dispositif prospectif mis en place dans ce module, centré sur les seuls exploitants, ne permet pas alors de conclure.

Par ailleurs, les participants à l'atelier prospectifs ont spontanément avancé l'hypothèse que le même exposé de la part des chercheurs aurait pu déboucher sur des conclusions très différentes de la part des agriculteurs, si ceux-ci avaient été des partisans des systèmes « herbe ». Un tel atelier, qui permettrait en effet de mettre à l'épreuve du changement climatique des systèmes d'exploitation herbagers avec ceux qui s'en réclament aujourd'hui,

reste certainement à conduire pour tester le potentiel prospectif des résultats de Climaster. Les discussions conduites lors de l'atelier suggèrent cependant que sa conduite nécessiterait d'aller nettement plus loin dans la contextualisation fine des résultats de Climaster tant les systèmes herbagers nécessitent une technicité finement adaptée aux conditions locales : la nature des sols, le parcellaire, l'accès sont autant de déterminants locaux par rapport auxquels les « variables d'intérêt » traitées par Climaster devraient être mises en regard pour en tester le potentiel prospectif. Un dispositif de mise en discussion vis-à-vis des systèmes herbagers qui reste aujourd'hui à construire.

BIBLIOGRAPHIE

- Felten B., Martin G., Theau J.-P., Thenard V., Magne M.-A., Duru M. (2010). Conception de systèmes d'élevage adaptés au changement climatique. Projet Climfourer, Midi-Pyrénées, Série Les Focus PSDR3.
- Haïem F. (1993). *La prospective : pratiques et méthodes*, Paris, Economica.
- Hubert B. (2009). La construction en partenariat de recherches sur problèmes : quelle pertinence entre objets et disciplines ? in C. Albaladejo, P. Geslin, D. Magda, P. Salembier (Coord.). *La mise à l'épreuve, le transfert de connaissances scientifiques en question*. Ed. Quae, 209-218.
- Moreau J.-C., Poisson S., Gate P., Lacroix B., Longeau J., Ruget F. (2010) Impacts du changement climatique sur les systèmes d'élevage et les grandes cultures : résultats du programme ACTA 2007-2009. In Actes du colloque Climator 17-18 juin 2010 INRA Versailles
- Ténèbre-Buchot P.F. (1989) *L'ABC du pouvoir, Les éditions d'organisation*, Paris.

section « agriculture) a néanmoins rencontré un intérêt chez les participants qui se sont prêtés à l'exercice, en soulevant quelques doutes et en trouvant des pistes envisageables. Le futur n'est pas écrit et reste à construire avec les acteurs concernés, qui plus est quand ceux-ci sont volontaires.