

GIEC Normand
Thème : Sol, Agronomie et Agriculture

D. Delahaye (Professeur Univ. Caen Normandie), JF. Ouvry (Directeur AREAS),
S. Brunel-Muguet (Chargée de Recherche INRAE), I. Diomard (Ingénieur CRAN)

1. Introduction : Etat des lieux des spécificités territoriales agricoles

- 1.1. Le sol, un élément de l'écosystème aux multiples enjeux
- 1.2. Spécificités territoriales de l'agriculture normande

2. Conséquences du changement climatique sur l'aléa ruissellement érosif/ qualité des sols (D. Delahaye, JF. Ouvry)

- 2.1. Evolution de la pluviométrie en Normandie
- 2.2. Susceptibilité au ruissellement et à l'érosion
- 2.3. Erosion et transfert de sédiments
- 2.4. Du ruissellement à la coulée de boue
- 2.5. Adaptation et mitigation

3. Les productions agricoles (S. Brunel-Muguet, I. Diomard)

- 3.1. Evolutions passées des productions agricoles en lien avec les tendances climatiques et les événements climatiques extrêmes
 - 3.1.1. Evolution des surfaces
 - 3.1.2. Evolutions des niveaux de productions
- 3.2. Projections dans un futur proche d'indicateurs agro-climatiques descripteurs des risques pour les productions agricoles
- 3.3. Quelles actions d'adaptation des systèmes agricoles et d'atténuation des impacts climatiques sur les productions agricoles en Normandie ?
 - 3.3.1. Actions d'adaptation
 - 3.3.2. Actions de mitigation

4. Conclusion

Annexes

Remerciements

Références bibliographiques

1. Introduction

1.1. Le sol, un élément de l'écosystème aux multiples enjeux

A la fois régulateur de la ressource en eau, déterminant de la qualité de l'air, composante essentielle de la biodiversité des milieux, support des productions agricoles et facteur de maintien et de développement des populations, le sol assure des fonctions environnementales, écologiques, productives et sociétales participant au maintien des équilibres fragiles des territoires. De ce fait, le sol constitue un patrimoine naturel dont la gestion durable doit s'imposer comme une priorité tant au niveau local que global. Cette position fait aujourd'hui l'objet d'un consensus international au moment où les formes de dégradation anthropique des sols depuis une cinquantaine d'années s'accroissent et se multiplient à travers le monde.

Ces enjeux concernent pleinement la Normandie. La variété de ses sols, sa mosaïque unique de paysages et de systèmes agraires font de cette région un laboratoire unique pour l'étude de la durabilité des systèmes agricoles dans la perspective du changement climatique.

Dans cette fiche seront abordées deux questions prioritaires :

- **L'érosion des sols** constitue un enjeu majeur régional. Outre la perte de terre **qu'elle entraîne, cette forme d'érosion conduit à 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.** Le ruissellement chronique peut ponctuellement prendre un caractère catastrophique en contribuant à la formation de **crues rapides (coulée de boue)**. Dans un contexte de réchauffement climatique perturbant à moyen et long termes les composantes naturelles des milieux, il est nécessaire d'estimer l'impact du changement climatique sur les processus érosifs afin **d'apporter aux acteurs locaux des éléments nouveaux permettant d'anticiper de façon raisonnée les conséquences en termes de gestion des sols.** La Normandie dispose d'une connaissance détaillée de la typologie de tous les sols normands et d'une cartographie précise de ses sols à l'échelle du 1/250 000 ([Le Gouée, 2015 & CEN 2017, Annexes 1.1 et 1.2](#)). Ces connaissances sont précieuses pour identifier et délimiter les sols sensibles aux dégradations anthropiques, au premier rang desquelles l'érosion hydrique ([Photo 1](#))
- **La Normandie est la première région agricole française (2 millions d'hectares de surface agricole utile, SAU, représentant 70% du territoire) où se côtoient des territoires d'élevage et zones de culture.** Les productions sont principalement orientées sur l'élevage laitier spécialisé, l'élevage pour la viande et les cultures de vente telles que les céréales, oléoprotéagineux mais également des cultures industrielles dont le lin textile représentant 63% (plus de 60 000 ha) de la production française. Plus de 39 500 exploitants agricoles et co-exploitants travaillent sur 31 000 exploitations agricoles, d'une taille moyenne de 64 hectares ([Rapport Agriscopie, 2019](#)). Par ailleurs, l'agroalimentaire est le premier secteur d'activité industrielle avec plus de 820 établissements et près de 25 500 salariés répartis sur l'ensemble du territoire régional, représentant 15 % des emplois industriels ([Rapport Agriscopie 2019](#)). **Si les effets du changement climatique s'observent déjà sur les productions agricoles, c'est également l'ensemble de la filière en aval qui s'en trouve impacté.** Dans ce contexte, il est fondamental d'en estimer les conséquences le plus en amont possible et également de proposer des leviers de mitigation des effets de ces évolutions climatiques et d'adaptation des systèmes agricoles aux différentes échelles.

Photo 1 : Réseau d'érosion dans une parcelle du bassin de Bénouville en amont d'Étretat (Seine Maritime, février 2020) (source : D. Delahaye)



1.2. Spécificités territoriales de l'agriculture normande

La Normandie occupe un territoire d'environ 30 000 km² couvrant des zones littorales s'étirant sur plus de 600 km et des zones continentales de plaines ou de plateaux. Elle est la première région française pour sa surface agricole utile (SAU) dont les prairies *au sens large* (incluant les surfaces toujours en herbe et les prairies temporaires) représentent 43% de la SAU totale (Rapport Agriscopie, Edition 2019).

Du fait des spécificités paysagères du territoire normand, **cinq principaux systèmes agricoles** coexistent sur le territoire normand (Agreste 2018) : **l'élevage laitier spécialisé, la polyculture-élevage laitier, l'élevage viande spécialisé, la polyculture-élevage viande et les grandes cultures** (Figure 1). Ainsi dans les régions bocagères plus ou moins vallonnées de l'Ouest, l'élevage laitier est particulièrement représenté car le relief est propice au pâturage. Plus à l'Est, la nature profonde des sols en plaine ou plateaux (plaine de Caen au Pays de Caux et au Vexin) favorise le développement de cultures diversifiées (blé, colza, protéagineux, cultures industrielles) associant de l'élevage. Le sud de l'Eure caractérisé par des conditions climatiques plus sèches est moins favorable à l'assolement (dominance blé/orge/colza). Le verger cidricole est présent dans tous les départements et bénéficie de plusieurs AOP. Enfin, des productions plus marginales sont plus localisées : l'élevage équin notamment en pays d'Auge, la sylviculture sur de petites surfaces (forêts de hêtres, chênes ou pins sylvestres) qui ponctue les plaines et plateaux à l'intérieur des terres, et le maraîchage sur les littoraux de la Manche et dans la vallée de la Seine (Figure 1) (Atlas agricole de Normandie, 2015).

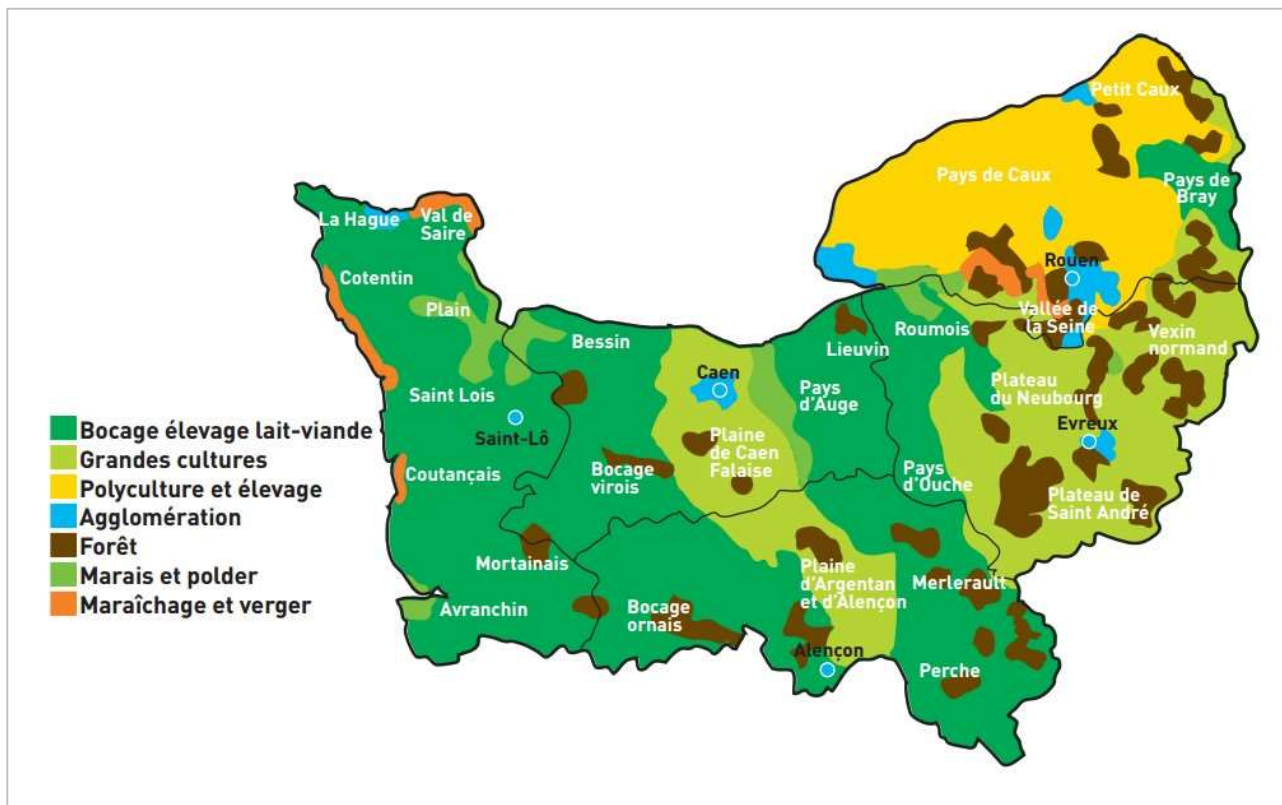


Figure 1 : Diversité des paysages et des activités agricoles sur le territoire Normand par secteur géographique (Rapport Agriscopie 2019, Observatoires des données 2017-2018, CRAN)

Historiquement, la Manche (32% de la SAU), l'Orne (24%) et le Calvados (21%) sont principalement orientés vers l'élevage bovin (lait et viande) et dédient par conséquent une part importante de leur SAU aux prairies et aux cultures fourragères. L'élevage spécialisé de bovins pour la viande est davantage représenté sur une bande allant du Pays d'Auge, au Calvados, jusqu'au Perche. L'Eure et la Seine-Maritime se partagent entre l'élevage et les grandes cultures avec une part importante dédiée aux cultures industrielles (lin textile, betteraves sucrières, pommes de terre) (Figures 2 et 3).

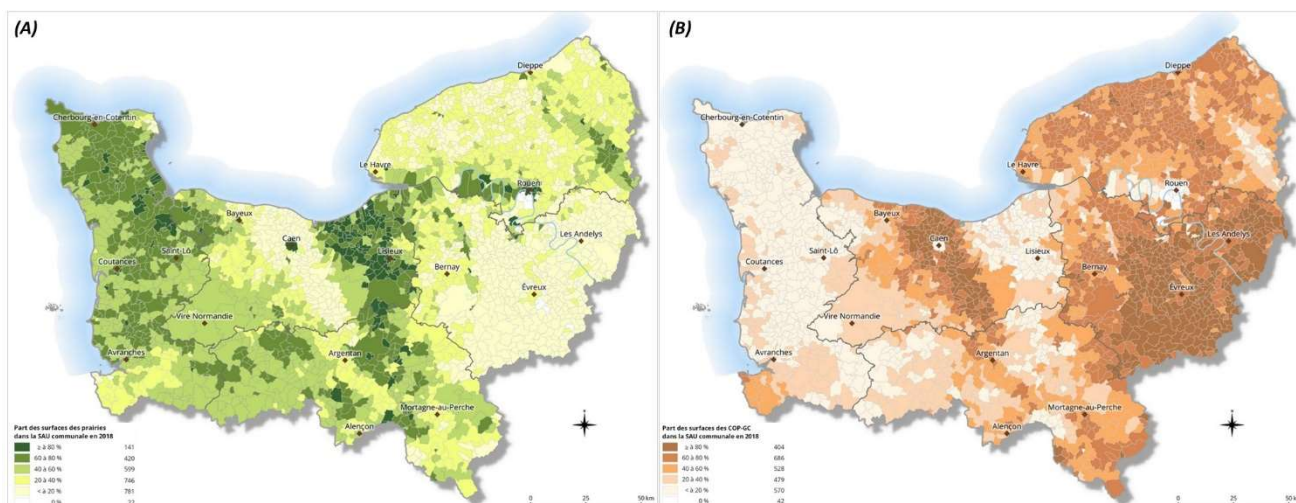


Figure 2 : Part des surfaces (A) des prairies et (B) de céréales, oléagineux, protéagineux (COP) et autres grandes cultures (GC) par commune en Normandie en 2018 (<http://draaf.normandie.agriculture.gouv.fr>)

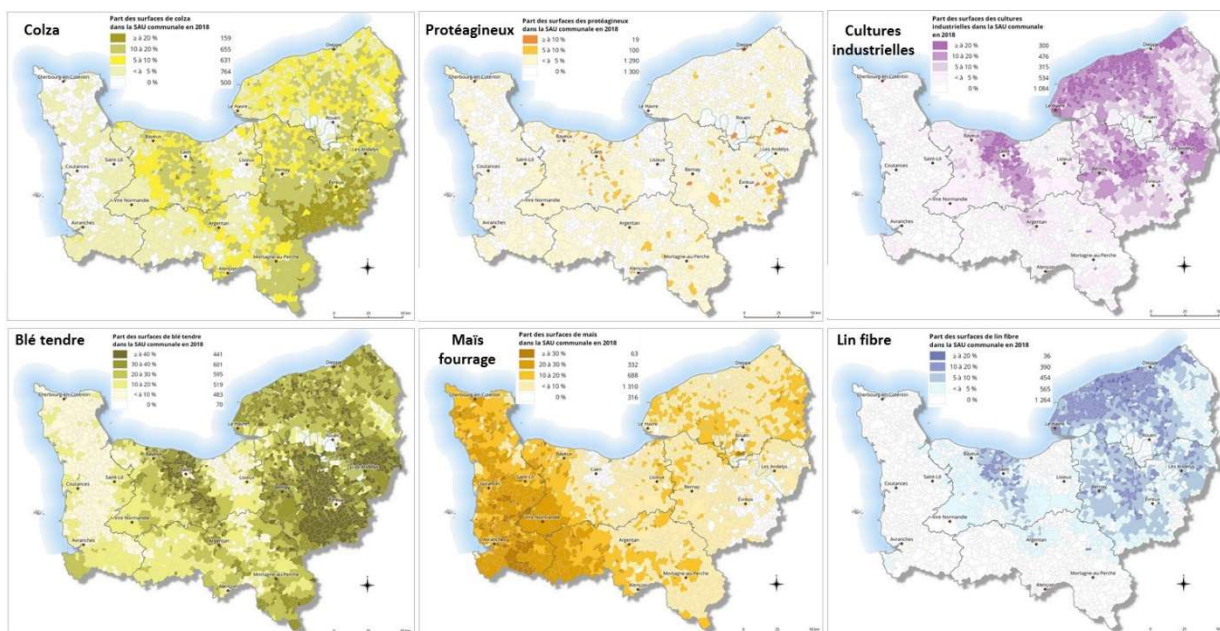


Figure 3 : Part des surfaces des principales grandes cultures (colza, blé, protéagineux, maïs ensilage et grain) et cultures historiques locales (lin fibre, cultures industrielles) par commune en Normandie en 2018 (<http://draaf.normandie.agriculture.gouv.fr>)

2. Conséquences du changement climatique sur l'aléa ruissellement érosif/ qualité des sols (D. Delahaye, JF. Ouvry)

2.1. Evolution de la pluviométrie en Normandie

Le **système érosif** résulte de l'interaction de diverses variables physiques (morphologie, nature du sol...) et anthropiques (pratiques agricoles, occupation du sol...). Evidemment le **climat est un agent majeur** et de sa variation dépend l'évolution dans un sens ou dans un autre de tout le système.

Selon le scénario RCP 8.5 du GIEC à l'horizon 2100, les années, tout en étant moins arrosées (-10% de pluies cumulées environ), présenteront de grandes disparités saisonnières avec notamment des étés plus secs (jusque -27 %) et **des hivers plus humides (+13,6 % en moyenne)**. Cette évolution n'est pas uniforme spatialement mais au contraire fait apparaître de grandes disparités régionales avec des valeurs extrêmes comprises, pour les pluies hivernales, entre +5 à +27%. Les régions au sud d'une diagonale entre Granville et Gournay en Bray seront les plus impactées. Pour les pluies estivales la répartition est plus homogène à l'exception de la partie centrale du calvados qui semble plus épargnée ([Fiche Changement climatique et Aléas météorologiques](#)). Les saisons intermédiaires sont également marquées par une diminution de la pluie avec -9% en moyenne au printemps mais surtout -20% à l'automne.

L'instabilité étant plus prononcée, les précipitations intenses (au-dessus du 90ème centile annuel) vont augmenter principalement en été et en hiver (+10%). Cette évolution est assez homogène sur la région avec seulement le Nord Cotentin et la Seine Maritime qui restent stables. Parallèlement le nombre de jours de pluies fortes (> à 20 mm/jour) évolue très peu. Il est actuellement faible (environ 4 jours par an), il ne devrait pas passer la barre des 5 à l'horizon 2100 et cela quel que soit le scénario choisi. ([Fiche Changement climatique et Aléas météorologiques](#)).

2.2. Susceptibilité au ruissellement et à l'érosion

Les limons de plateau forment une couverture largement développée sur le bassin sédimentaire de la plaine de Caen à la boutonnière du Pays de Bray. De nature variable, cette couverture est le support de sols le plus souvent riches en limon sensibles aux processus de battance. Sur le massif ancien les sols sont plus variés, souvent de faible épaisseur et sensibles aux surplus hydrologiques.

Le Pays de Caux se dégage clairement comme l'espace le plus enclin à la formation du ruissellement et au développement des processus d'érosion ([Figure 4](#)).

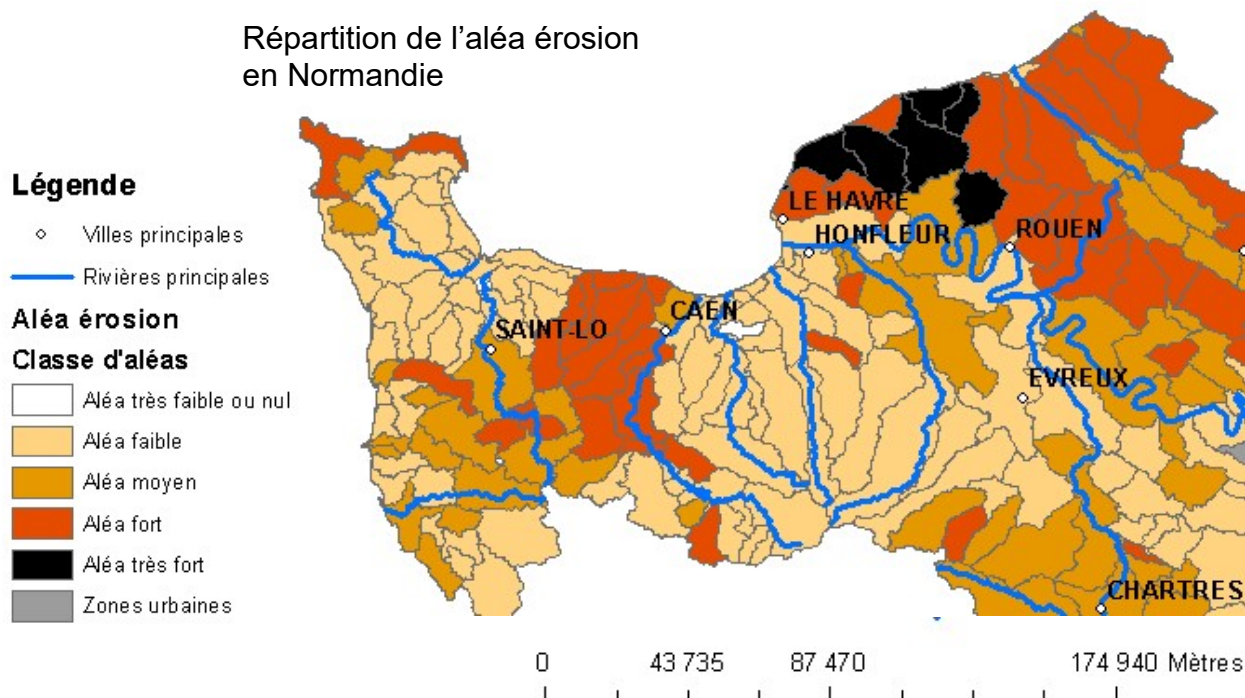


Figure 4 : Aléa érosion des sols en Normandie (source AESN 2005)

La dégradation de la structure de surface, engendrée par une redistribution des particules du sol sous l'effet de la pluie, conduit à une réduction drastique de la capacité d'infiltration qui peut atteindre des **valeurs inférieures à 1mm/h**. Le processus de battance est connu et largement étudié (Boiffin, 1984, Le Bissonnais et al., 1998, Ouvry 1989). Un cumul pluviométrique de 90 mm voire de 60 mm suffit pour passer d'un faciès fragmentaire à une surface imperméable permettant la formation régulière du ruissellement et le développement du système érosif (Photo 2).

L'évolution de la pluviométrie attendue à l'horizon 2100 peut potentiellement impacter les processus de battance, de saturation des sols minces et en conséquence la formation du ruissellement. La période hivernale semble la plus sensible avec une augmentation marquée de la pluie notamment dans la partie sud de la région. Heureusement il n'y a pas de recoupement spatial entre les espaces plus arrosés et ceux présentant les sols les plus sensibles.



Photo 2 :Processus d'érosion (source : D. Delahaye)

(A) Croute de battance généralisée sur un semi de blé (Pays de Caux, décembre 2018)

(B) Circulation du ruissellement sur semi battu de blé et formation d'une bêtoire (Pays de Caux, décembre 2018)

(C et D) Formation de rigoles et de ravines (Pays de Caux, février 2020)

Par ailleurs, il existe déjà un très fort gradient pluviométrique régional avec des stations qui dépassent à peine les 600 mm de pluie annuelle et d'autres recevant plus de 1300mm. **La pluie varie donc déjà du simple au double actuellement en Normandie**. Ce gradient s'exprime quel que soit la saison entre les stations de la Pointe de Caux ou des reliefs du sud de la Manche et celles de la Plaine de Caen ou du sud de l'Eure par exemple. (Tableau 1).

La croissance hivernale de la pluviométrie, même pour le scénario le plus pessimiste, restes-en deçà de la variabilité pluriannuelle déjà observée aujourd'hui. La Figure 5 montre clairement que plus une station est arrosée, plus la variabilité est forte (opposition entre Coulouvray et Evreux) et qu'il existe un rapport qui peut varier de 1 à 3 entre les hivers les plus secs et les plus humides. **Nous ne partons donc pas dans l'inconnu mais plutôt vers une fréquence accrue d'année humide**. En projetant le scénario RCP 8.5 c'est-à-dire une augmentation comprise entre 10 à 27% de la pluie moyenne pour les trois mois d'hiver on peut estimer que les hauteurs d'eau de **période de retour triennale actuellement se produiront potentiellement tous les ans au sud de la diagonale Granville/Gournay**.

	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Année
Evreux	50.6	41.2	47.4	46	55.7	51.6	52.4	38.2	50.3	61	50.5	59.7	604.6
Caen	66.1	52.4	55.6	50.4	62.6	57.9	52.6	51.2	60.8	77.6	74.6	78.1	739.9
Rouen (Boos)	76.3	60.4	67.1	59.2	74.3	63.7	68.9	65.1	65.5	83.5	76.8	90.9	851.7
Goderville	107.9	79.1	81.8	69.2	73.9	74.4	66.1	77.4	92.6	130.1	127.3	129.9	1109.7
Coulouvray	149.2	111.5	109.4	83.6	95.5	81.3	86.1	84.5	108.1	149.1	153.6	166.4	1378.3

Tableau 1 : Pluies moyennes mensuelles (période de références 1981-2010) pour 5 stations réparties en Normandie et cumuls annuels (données Météo France).

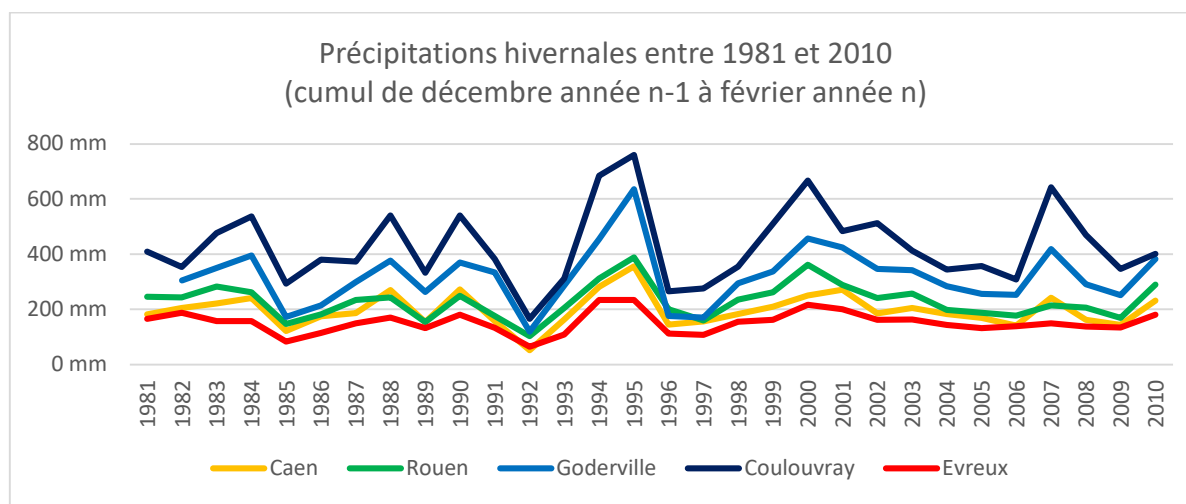


Figure 5 : Précipitations hivernales (cumul décembre, janvier, février, période 1981-2010) pour 5 stations réparties en Normandie (données Météo France).

Des travaux de modélisation ont été menés dans le cadre du programme Climaster (Mérot et al., 2013) afin d'estimer l'évolution de la sensibilité à l'érosion de différents bassins versants dans le nord-ouest de la France. En utilisant le modèle SCALES (Le Gouée et al., 2010) et le scénario A1B du GIEC (proche du scénario RCP 8.5) il a été possible de simuler l'évolution de l'aléa érosion à l'échelle parcellaire en croisant les données physiques (pédologie, pente...), agricoles (occupation du sol, calendrier cultural, gestion des intercultures...) et en faisant varier l'entrée climatique en fonction des projections du GIEC (Delahaye et al., 2013). Parmi ces bassins d'application, il y a celui du Lingèvres (nord-ouest du Calvados) qui s'inscrit dans le bassin de la Seulles. Il est situé sur une zone de transition entre le Massif Armoricain et le Bassin Parisien. En comparant les résultats du modèle paramétré avec les données climatiques simulées pour 2100 et ceux obtenus pour quelques années humides de la période actuelle de référence, **il a été possible de conclure que les niveaux d'aléas obtenus pour une année moyenne à l'horizon 2100 correspondraient à une année de la période actuelle dont la périodicité de retour est de 4 ans**. Cette estimation rejoint celle effectuée dans les paragraphes précédents (Annexe2).

L'évolution du climat va entraîner une augmentation de la susceptibilité des sols à l'érosion hydrique. Toutefois cette augmentation pourrait être minimisée sous l'effet d'une modification des cycles végétatifs.

On constate déjà depuis de nombreuses années une avancée significative de la phénologie en Europe (Seguin, 2010). Il est évident également que les systèmes agricoles pourrons s'adapter par le renforcement de pratiques culturales conservatrices ou l'évolution des systèmes de production.

La faiblesse de la modélisation des effets du changement climatique dans ce domaine réside dans **l'impossibilité de connaître la trajectoire des systèmes agricoles pour l'ensemble de 21^{ème} siècle**, celle-ci étant avant tout soumise aux orientations politiques, aux lois de programmation et aux contextes socio-économiques. Il faut donc se résoudre à **prévoir le futur avec les données agricoles du présent**. A l'échelle macro ce choix n'est pas incohérent, en Europe, les systèmes de production agricoles sont caractérisés par une grande stabilité géographique (Seguin, 2010). En revanche, à l'échelle régionale, l'effet des politiques agricoles se concrétise rapidement dans les systèmes culturels et le paysage (effet de la fin des quotas par exemple ou encore le retournement «préventif» des prairies avant le durcissement de la réglementation).

Pour illustrer ces effets des évolutions des systèmes de culture, d'autres travaux de modélisation ont été menés dans le cadre du **programme Evapore** (Patault et al, 2020) afin d'estimer l'impact sur un bassin versant normand, celui de la Lézarde. Les calages proviennent des données du BV de Bourville. En utilisant le modèle WaterSed (V Landemaine 2016), à l'horizon, 2050, pour la crue d'occurrence décennale, **l'hypothèse de réduction de 1% par an des surfaces en prairie conduit à une augmentation de 13.7 % de la lame ruisselée, alors que l'application de pratiques culturales dites de conservation des sols sur 50% des surfaces labourées la réduit de 11.7% (Tableau 2).**

Scenario	Lame ruisselée moyenne sur le BV en mm		
	F010	F050	F100
ref1 – scénario de référence avec ouvrages actuels	5.1	8.0	14.9
Herb – scénario de réduction d'un tiers des prairies	5.8	8.8	16.1
Agr – scénario d'adoption de pratiques culturales adaptées sur 50% des cultures	4.5	7.4	14.0

Tableau 2 : Modélisation de l'effet de l'évolution de l'occupation du sol sur les lames ruisselées en mm/ha pour le bassin versant de la Lézarde en fonction de la fréquence des événements pluvieux de fréquence rare.

2.3. Erosion et transfert de sédiments.

La production sédimentaire liée à l'érosion des sols sur les versants constitue une des sources potentielles de la charge solide d'un cours d'eau. Analyser la production sédimentaire des versants dans le budget sédimentaire global nécessite de s'interroger principalement sur deux points. Le premier concerne la localisation des zones de production potentielle de sédiments (parcelles agricoles, tête de vallon...). Le second porte davantage sur les modes de transferts entre les zones sources de sédiments et le cours d'eau. L'identification des connexions hydrologiques entre les surfaces productrices de sédiments sur les versants et le cours d'eau est alors fondamentale.

Toutes les investigations de terrain dans différents bassins ont montré que les situations étaient complexes et variées. Tout d'abord, **les bassins versants bocagers ou d'openfield présentent des niveaux très différents de connectivité.** En effet, les bassins versants de grandes cultures, du fait de l'absence d'obstacles aux écoulements, sont raccordé presque en totalité au talweg. En revanche, dans les espaces bocagers, Les surfaces connectées sont, certes bien moins importantes en raison des densités parfois importantes de haies ou de talus mais la connectivité entre les versants et le cours d'eau reste élevée (Reulier et al., 2018). Les comparaisons entre bassins versants montrent également le rôle fondamental joué par la densité de drainage. Elle permet en effet d'expliquer une part importante de la variabilité des taux de connexion entre les bassins d'openfield et les bassins versants bocagers. Une densité de drainage élevée multiplie les zones de contact entre les parcelles agricoles et le cours d'eau et raccourcis les longueurs de transit du ruissellement sur les versants. Enfin, il ne faut pas oublier le rôle que peut jouer le réseau routier de « collecteur » du ruissellement Ceci explique notamment que certaines zones parfois éloignées du cours d'eau puissent être rapidement connectées au chenal (Viel et al., 2014).

Les flux solides sont très sensibles aux forçages climatiques mais ils sont avant tout fortement dépendants des caractéristiques environnementales des bassins versants. Les variables morphologiques, pédologiques, paysagères, agricoles... déterminent des réponses des hydrosystèmes très variés 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. **Le développement du système érosif et l'exportation des matières en suspension (MES) vers les cours d'eau se font principalement en hiver et secondairement en automne.** Les résultats du programme Pesticeros (AREAS 2019) sur le bassin versant en grandes culture en milieu d'openfield de Bourville (suivi de 2011 à 2018) démontrent que 89% des exports ont lieu en automne-hiver. **Dans les projections du GIEC, la période hivernale sera plus humide (de 5 à 27%) ce qui peut laisser craindre un renforcement des transferts sédimentaires.**

Dans les **domaines de bocages**, l'évolution mensuelle des flux solides montre clairement que la grande majorité de ces derniers sont réalisés au cours de la **période automnale et hivernale qui concentre entre**

80 et 90% des transferts sédimentaires annuels sur l'ensemble des bassins versants. De même on observe une bonne corrélation entre les périodes de crues et forts transferts solides qui concentrent jusqu'à 95% des transferts (Figure 6). **Sur certains bassins 50% des transferts se font en deux jours.** L'évolution de la capacité de transport du cours d'eau joue un rôle indéniable sur le déclenchement et l'intensité des débits solides. En domaine d'openfield 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 favorisés à l'automne et en hiver. Toutefois la faible densité de drainage de ces espaces favorise les piégeages intermédiaires avant de rejoindre un cours d'eau pérenne.

A l'inverse, dans les bocages, ils proviennent minoritairement de l'érosion de versant et plus largement des zones proches des chenaux d'écoulement (piétinement des zones humides dans les têtes de vallons, abreuvoirs...). Le stock de sédiments accumulé pendant la décrue printanière et en été se remet en mouvement dès l'automne et en hiver mais toujours sous l'impulsion de quelques épisodes pluvieux majeurs.

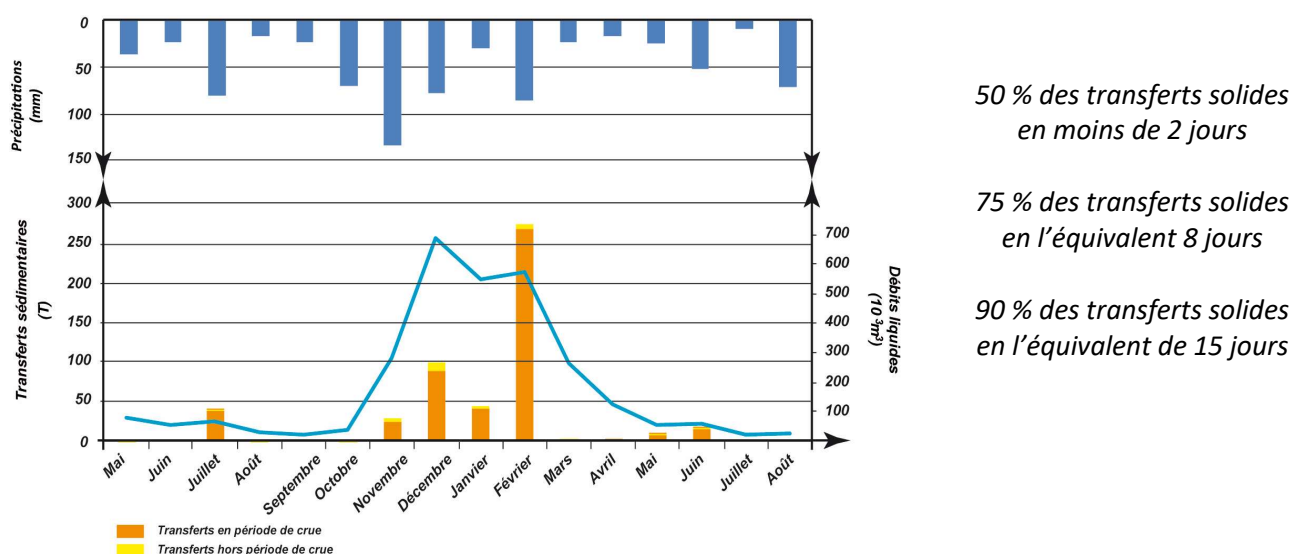
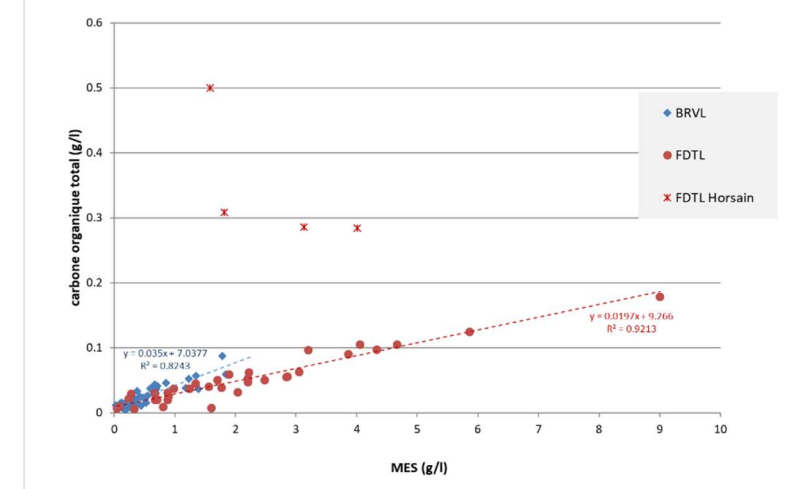


Figure 6 : Dynamique annuelle des débits liquides et solides dans le bassin du Lingèvres (14 km², Calvados)
Débit solide spécifique : 33 t/km²/an

La période hivernale est donc clé et surtout les séquences de fortes pluies durant cette période. Dans une ambiance beaucoup plus humide annoncée et avec une croissance des phases d'instabilité, il est probable que les conditions permettant des transferts sédimentaires majeurs seront plus fréquemment réunies.

En corrélation avec les transferts de MES, le Carbone Organique (CO) est exporté des parcelles et des bassins versants (Figure 7). Les résultats du programme Pesticeros (AREAS 2019) sur le bassin versant de Bourville (BRVL 1145 ha) et le sous bassin versant des Tilleul (FDTL 145 ha) sont explicites. De 2012 à 2016, en moyenne les exports annuels sont respectivement de 2.29 et 11.65 kg de CO/ha/campagne de labour.



Ces exports correspondent à des pertes moyennes de MO de l'ordre de 3.94kg/ha/campagne à BRVL et de 20.09 kg/ha/campagne à FDTL.

Ainsi, à FDTL les pertes annuelles moyennes en MO s'élèvent à 3.3 % du stock de MO de la couche labourée.

Figure 7 : Corrélation entre les exports de Carbone Organique (g/l) et les MES (g/l) dans les ruissellements aux exutoires des BV de Bourville et du Fond des Tilleul. Programme Pesticeros.

Quant au **Phosphore total**, il est exporté de façon significative en lien avec les teneurs en **Carbone Organique** et en **MES**. De 2012 à 2016, sur les 2 bassins versants de BRVL et FDTL, les exports sont compris dans les fourchettes respectives de 0.14 à 0.23 et de 0.6 à 1.0 kg/ha/campagne de labour. **Plus de 85% de ces exports ont lieu en automne-hiver** (Figure 8).

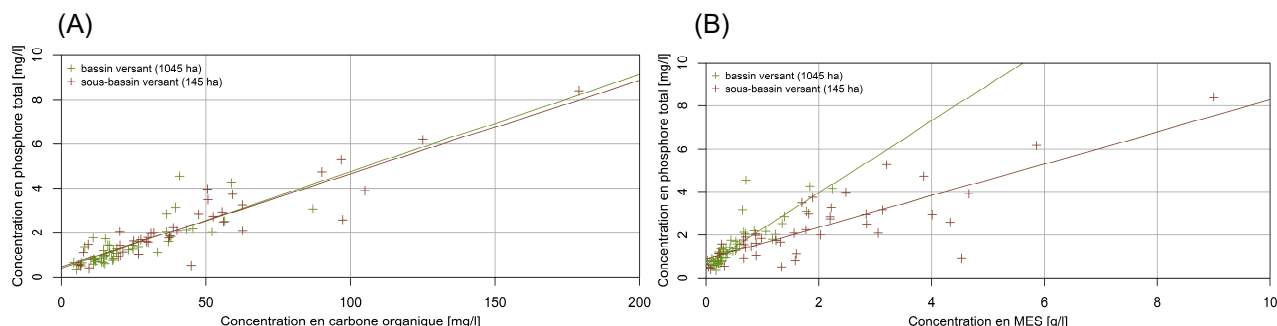


Figure 8 : Corrélation entre les concentrations en Phosphore total (mg/l) versus les concentrations en Carbone Organique (mg/l) (A) et en MES (g/l) (B) dans les ruissellements aux exutoires des BV de Bourville et du Fond des Tilleul. Programme Pesticeros (AREAS 2019)

2.4. Du ruissellement à la coulée de boue

Sans atteindre l'ampleur des phénomènes cévenols, **des « crues rapides » se manifestent également en Normandie**. Localement nommées « **coulées de boue** », ces écoulements, parfois sub-torrentiels et caractérisés par une forte concentration en éléments solides, provoquent des dégâts considérables. Il s'agit avant tout d'une manifestation exacerbée du ruissellement érosif. Les sols et les formations superficielles fournissent la majeure partie des matériaux alimentant la turbidité des eaux de crues. **Elles frappent principalement l'ex Haute Normandie et plus ponctuellement la bordure orientale du Calvados**. Les études ont montré qu'il coexistait deux types de « coulées de boue » dans la région (Delahaye 2008) (Annexe 3) : **Les coulées de boue hivernales** liées à de longues pluies peu intenses et **les événements printaniers ou estivaux associés à des orages** (Photo 3).



Photo 3 : Crue turbide (coulée de boue) suite à un orage violent le 24 juin 2019 dans le Pays d'Auge (pluie > 60 mm en 6 h). Dégâts dans la commune de Lisieux et sa périphérie (<https://www.ouest-france.fr>).

Il est très difficile de se prononcer sur le devenir de ces processus à long terme. Les phénomènes hivernaux peuvent potentiellement se renforcer selon les principes et les limites avancées en 2.3. En revanche pour les phénomènes les plus catastrophiques du printemps et de l'été les modèles ne sont pas suffisamment précis. Les précipitations intenses vont augmenter mais en parallèle les pluies journalières supérieures à 20 mm vont rester assez stables. La clé réside dans la recrudescence ou pas d'épisodes orageux majeurs.

Sur la base d'un examen de références bibliographiques européennes récentes, les travaux de modélisation menés dans le cadre du programme Evapore (Patault et al., 2020) font l'hypothèse qu'à l'horizon 2050, la diminution des périodes de retours des événements pluvieux de fréquences (T) rares pourrait être la suivante :

1. **Hypothèse moyenne du Changement Climatique « ccm »** basé sur le scénario « RCP 4.5 » du GIEC : diminution des périodes de retour des événements modélisés :
T10-> T9 ; T50 -> T45 ; T100 -> T80.
2. **Hypothèse forte du Changement Climatique « ccf »** basé sur le scénario « RCP 8.5 » du GIEC : diminution plus forte des périodes de retour des événements hydrologiques modélisés :
T10-> T8 ; T50 -> T35 ; T100 -> T65.

Difficile également de se prononcer sur une tendance générale d'évolution car les connaissances montrent que ces phénomènes sont sensibles à des **cycles et des variabilités pluriannuelles parfois plus amples que les tendances à long terme**. En Normandie et plus largement dans le nord du Bassin Parisien, il est démontré que la décennie 1992-2002 a enregistré les phénomènes les plus fréquents et les plus violents durant les 40 dernières années. **Réussir à distinguer l'anomalie du cycle et le cycle de la tendance constitue un enjeu de recherche important pour comprendre le rôle du changement climatique** (Annexe 4)

2.5. Adaptation et mitigation

Ce volet est étudié en Normandie depuis 1985. La région dispose du plus grand nombre de références en France. Face à ces phénomènes, les mesures reposent sur 3 niveaux d'actions complémentaires qui vont de l'échelle de la parcelle agricole à celle de l'exploitation jusqu'au bassin versant. (Fiches CA76 et AREAS, Publications AREAS, Site internet : AREAS & zones tampons de ONEMA ou OFB).

1. En premier lieu, il s'agit **d'améliorer l'infiltration** des eaux pluviales agricoles et urbaines. Les mesures sont préventives et reposent sur l'adaptation des pratiques culturales.
2. Les autres solutions préventives visent à **limiter l'arrachement de particules** par érosion diffuse ou linéaire. En fonction des processus érosifs, ces mesures se déclinent soit de façon intra-parcellaire, ou collective à l'échelle du bassin versant. Ces mesures consistent à renforcer la résistance des agrégats à l'arrachement ou à protéger les sols des impacts des gouttes de pluie. Elles peuvent concerner des pratiques culturales pour accroître la stabilité structurale, ou des aménagements permettant d'accroître la résistance au cisaillement, types chenaux enherbés.
3. En complément, des **zones tampons ou aménagements à l'interface entre les secteurs d'érosion et les secteurs à enjeu**. Leur fonction est de réduire la capacité de transport du flux en créant des ralentissements locaux, afin de réduire la quantité de particules transportées. Il s'agit de créer des zones tampons à but sédimentaire et/ou d'infiltration par un effet de ralentissement dynamique qui peuvent constituer des protections rapprochées.

Selon les territoires, chacun de ces 3 types de mesures (Annexe 5) peut prendre plus ou moins d'importance, mais ils sont complémentaires et généralement tous associés. Elles participent à la préservation des sols, à l'aménagement du territoire, aux paysages, à la biodiversité et à la séquestration du carbone.

- En matière de pratiques culturales, la synthèse AREAS (Ouvry et al., 2012) présente les résultats d'infiltration de ruissellement et d'érosion diffuse de 30 expérimentations sur des parcelles sous pluies naturelles ou simulées pour les principales cultures. (Annexe 6) Les taux de réduction des ruissellements sont très variables et dépendent des caractéristiques des pluies, de l'état de surface des sols (même si la plupart des mesures ont été réalisées en conditions défavorables) et des couverts végétaux. **Dès lors que les pratiques sont correctement mises en œuvre, les taux de réduction des ruissellements s'échelonnent entre 10 et 80% pour les pluies courantes, jusqu'à décennales.**
- Les techniques de culture sans labour présentent des résultats parfois contradictoires. Mais les techniques les plus abouties de **semis directs sous mulch avec un couvert permanent des sols** (Figure 9) montrent des **capacités d'infiltration au moins deux fois supérieures à celles sous labour** (AREAS 2017 et 2018).

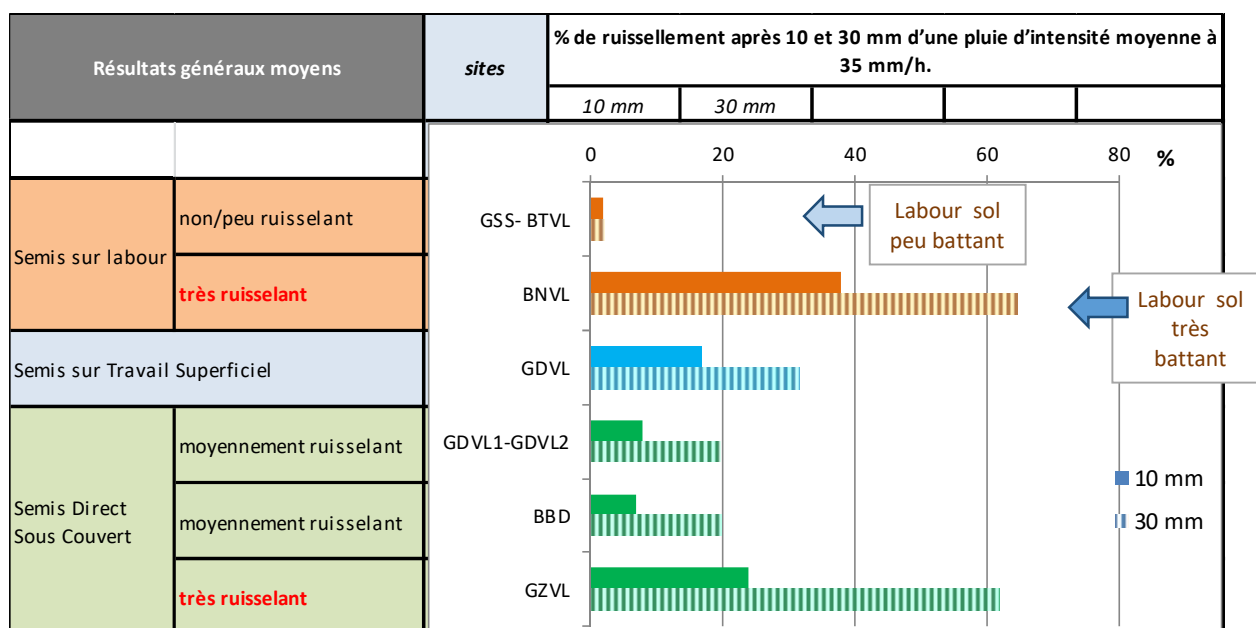


Figure 9 : Comparaison des taux moyens de ruissellement après 10 mm (plein) et 30 mm (hachuré) de pluie simulée en fonction des modes d'implantation du blé.

Les **dispositifs enherbés de bas de parcelle ou de talweg** ont un double rôle anti érosif, avec une efficacité de 100 % confirmé par toutes les observations de terrain en cas de crue intense, et un rôle réduction de la charge sédimentaire. **Les données du programme Pesticeros indiquent une diminution moyenne de la charge solide d'un facteur 4 entre les concentrations à l'exutoire du sous BV de FDTL entièrement labouré et celui de BRVL** ou les prairies de fond de vallon jouent ce rôle de filtre sédimentaire. Les concentrations max à FDTL atteignent 9.00 g/l et seulement 2.24g/l à BRVL. Compte tenu de la densité du couvert herbacé obtenu en Normandie, **ces dispositifs enherbés peuvent résister à des vitesses d'écoulement de 2 m/s** (crue de St Martin de Boscherville – Villers Ecalles (76) du 16-06-1997). Sur sol profond, ces objets offrent aussi une très bonne capacité d'infiltration en l'absence de tassement. Les perméabilités mesurées vont de 100 à 200 mm/h en condition saturée (AREAS 2018).

Les zones tampons type haies hyperdenses (anti-érosives), fascine, Bande ligno-cellulosique de Miscanthus, les haies herbacées localisées sur le chemin de l'eau sous forme d'obstacle freinent les écoulements (Annexe 7.1) ; et provoquent la sédimentation des particules. (Annexe 7.2) (AREAS 2012 et 2020). **Globalement, l'efficacité des haies et des fascines sur le taux de sédimentation est comprise entre 47 % et 98 % des apports.** Cette efficacité reste très dépendante de la taille des particules. Il a été vérifié que les équations prédictives de Dabney et al. (1995) permettait une bonne évaluation de la sédimentation par les fascines et haies hyper denses. On note aussi que la capacité d'infiltration au pied de haies anciennes est en moyenne de 400 mm/h (de 260 à 540 mm/h). Des résultats équivalents sont obtenus avec des haies d'herbacées de fétuques- Carex – Tanaïs ou Miscanthus (Kervroëdan 2019, AREAS 2020).

Les résultats scientifiques par objet sont suffisamment nombreux pour permettre le développement des zones tampons et les changements de pratiques culturales. Mais sur un territoire, l'efficacité dépend avant tout de leur mise en œuvre et de leur densité. Les résultats issus de modélisations du programme Evapore (Patault et al., 2020) apportent des informations sur l'effet de la densité des Zones tampons par BV. L'analyse porte sur le BV de Radicatel (106 km² dont 80% en zone agricole) et sur l'impact de l'érosion sur la turbidité au captage du fait de l'engouffrement des ruissellements dans les pertes karstiques (Bétoires). Les simulations numériques ont porté sur 4 scénarii à l'horizon 2050 :

- Situation actuelle 2018 ;
- Retournement de 33% des surfaces en prairie (1%/an) ;
- Adoption de pratiques culturale de conservation des sols sur 50% des terres labourées (+ 15% d'infiltration) ;
- Mise en œuvre d'un programme ambitieux de zones tampon sur le BV avec 181 fascines et 13.1 ha de dispositifs enherbés, soit une densité de 5 aménagements/ km² (5 à 20 fois plus élevé qu'à l'heure actuelle).

La Figure 10 présente les résultats de flux sédimentaires et des volumes ruisselés pour les pluies journalières comprises entre 20 et 90 mm, soit des fréquences de 0.5 à 100 ans.

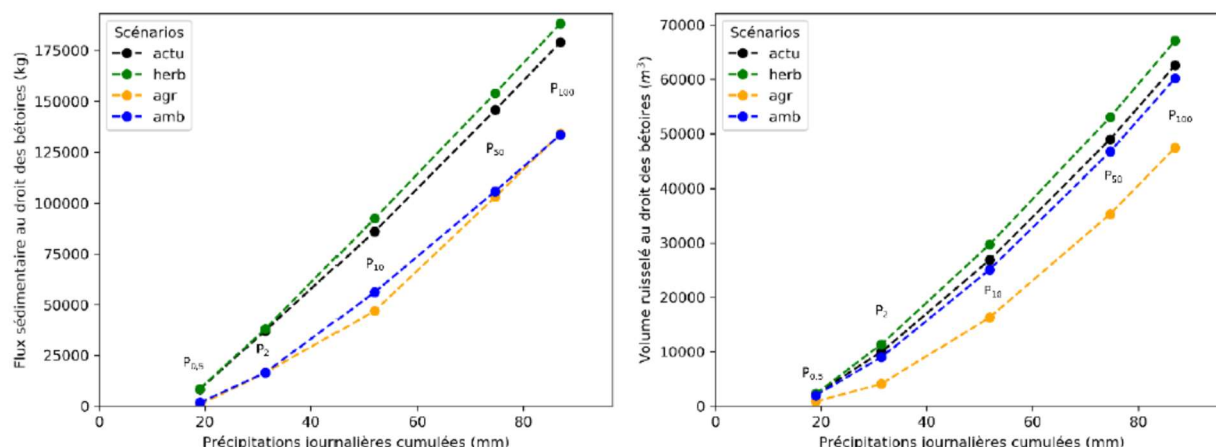


Figure 10 : Flux sédimentaires (Kg) et volumes ruisselés (m³) simulés par le modèle WaterSed au droit des béttoires connectées sur le BAC de Radicatel pour cinq pluies de projet selon différents scénarios prédéfinis. (actu = scénario actuel 2018 ; amb = scénario ambitieux d'aménagement d'hydraulique douce ; agr = scénario d'amélioration des pratiques agricoles sur 50% des surfaces en culture ; herb = retournement de 30% des prairies). Source [Patault 2020](#).

Les conclusions de cette étude sont claires. En cas de retournement de 1/3 des prairies, le flux sédimentaire croît de 7.45%. La mise en œuvre d'un programme ambitieux de zones tampons (fascines et bandes enherbées) comme celui de l'adoption de pratiques culturales de conservation des sols sur 50% des TL, réduisent respectivement de 44% et 49 % les flux sédimentaires de ces types d'évènements pluvieux. L'efficacité est d'autant plus grande que les pluies restent faibles : 79% de réduction pour les pluies d'occurrence 0.5 an et 55% pour les pluies d'occurrence 2 ans. Le scénario des pratiques culturales de conservation des sols apporte l'avantage de réduire aussi significativement les volumes ruisselés. Ce programme mesure ensuite les impacts en terme économique par des analyses couts-bénéfices (non reprises ici).

3. Productions agricoles(S. Brunel-Muguet, I. Diomard)

Les ressources graphiques et cartographiques et ayant servi à cette synthèse proviennent de la Chambre Régionale d'Agriculture de Normandie (CRAN), du Service de l'information statistique et économique de la DRAAF Normandie, de l'Ifremer environnement, de synthèses réalisées dans le cadre de projets régional (ORACLE¹) et européen (AGRI ADAPT²).

3.1. Évolution passée des surfaces et productions agricoles en lien avec les tendances climatiques et les événements climatiques extrêmes

3.1.1. Evolution des surfaces

L'évolution des surfaces agricoles est largement conditionnée par les politiques territoriales incitatives de mesures de remembrement (notamment dans l'Eure et la Seine Maritime) ou d'aménagement du foncier en faveur de l'urbanisation des terres (conduisant à une forte concurrence agriculture/urbanisation). Par ailleurs, la mise en place des quotas laitiers en 1984 (abolis depuis 2015) a également été un facteur conduisant à favoriser le cheptel allaitant -au détriment du cheptel laitier-dans les zones historiquement spécialisées (bande du Pays d'Auge, au Calvados, jusqu'au Perche).

Si aucune tendance significative quant aux surfaces dédiées aux principales cultures de rente n'est observée ([Annexe 1.2, millésime 2011](#)), une perte des surfaces prairiales est notable (-10.4% en moyenne) et surtout observée dans la Seine-Maritime (-14.2%) et l'Eure (-10.4%) ([Figure 11, Annexe 8.1, millésime 2011](#)). L'évolution de cette tendance est multifactorielle : déprise agricole, artificialisation des sols (perte de 0.7% entre 2008 et 2016, Atlas agricole normand 2018), crise de l'élevage³ et **plus indirectement, les incertitudes climatiques** contraignant les agriculteurs à favoriser la production de fourrages pouvant être ensilés et stockés.

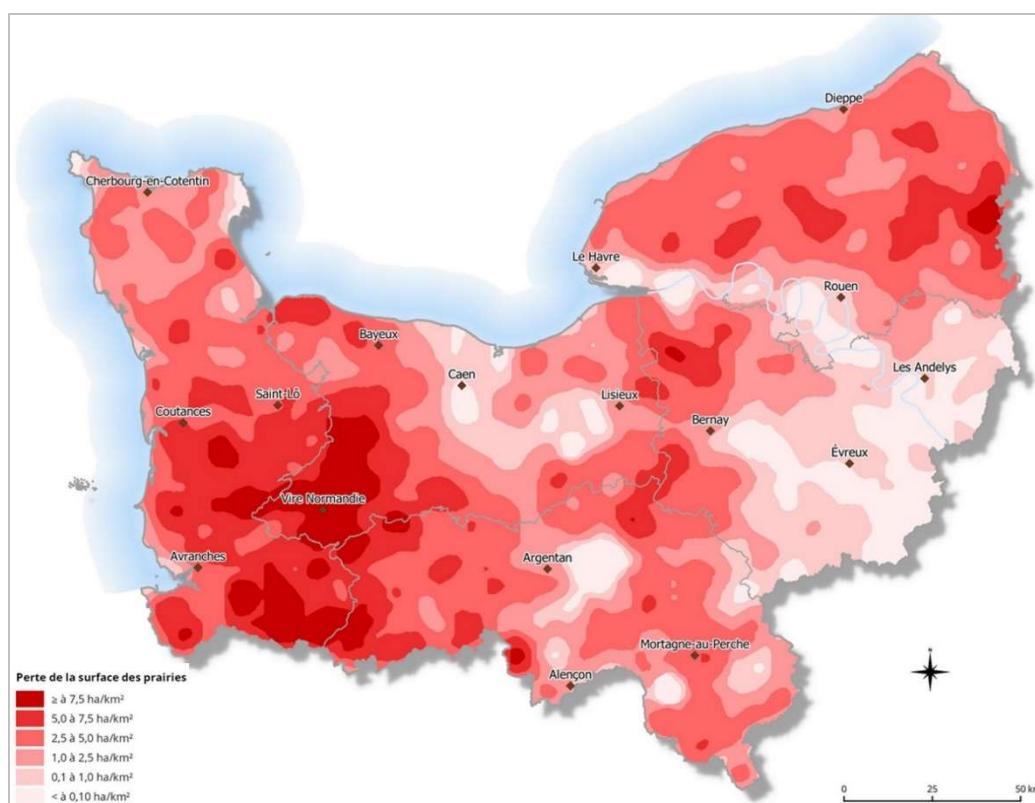


Figure 11 : Perte de la surface des prairies entre 2008 et 2018 (<http://draaf.normandie.agriculture.gouv.fr>)

¹ Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement climatique https://normandie.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Normandie/prdar-ae06-ORACLE-Normandie.pdf

² Adaptation durable des systèmes agricoles de l'Union Européenne au changement climatique (programme européen LIFE15 CCA/DE/000072 www.agriadapt.eu)

³ <https://agriculture.gouv.fr/mots-cles/crise-de-lelevage>

Globalement la polarité des zones de production a été relativement maintenue au cours des dernières décennies. D'une part les spécificités territoriales sont fortement contingentes par l'implantation des filières de valorisation locales avec les industries agro-alimentaires, les sites de stockage (qui tendent actuellement à être développés par les agriculteurs eux-mêmes), les sites de transformation ainsi que l'équipement portuaire (tel que le port de Rouen, premier port céréalier d'exportation d'Europe). D'autre part, **l'ampleur relative des changements climatiques récents n'a pas remis en question les spécificités géographiques des activités agricoles observées à l'échelle régionale**. Ces changements climatiques ont dans un premier temps conduit à modifier des pratiques et des itinéraires techniques dans l'objectif d'adapter les systèmes de productions (§ 4.4).

3.1.2. Evolutions des niveaux de productions

Les niveaux de production des cultures normandes ont été analysés en lien avec le climat depuis 1959 dans le programme ORACLE, destiné à soutenir les agriculteurs dans leur démarche d'adaptation aux changements climatiques (ORACLE, édition 2020). Ce programme a permis de réaliser une rétrospective des rendements de plusieurs cultures représentatives des filières de productions normandes entre 1959 et 2015 : blé tendre, betterave industrielle, maïs ensilage, prairies et lin textile ([Annexes 9a-e](#)). Les niveaux de productions annuels ont été mis en lien avec des 9 indicateurs climatiques et 20 indicateurs agroclimatiques définis et paramétrés pour chaque département (présentés en [Annexes 9a-e](#), [Annexe 10](#)).

Blé tendre

L'évolution des rendements en blé tendre observée dans les 5 départements est marquée par deux périodes ([Annexe 9a](#)). Entre les années 1970 jusqu'en 1996, les rendements doublent (de 40-50 qtx/ha à 70-80 qtx/ha) grâce à l'amélioration variétale, une meilleure protection phytosanitaire et des itinéraires techniques plus efficaces. Puis débute une période de stagnation d'origine multifactorielle : mise en application de la directive nitrates visant à modérer la fertilisation azotée, plafonnement des progrès génétiques, moindre usage des légumineuses dans les rotations culturales (ayant pour effet collatéral une réduction de l'apport en azote résiduel dans les sols) et **fréquence accrue de températures élevées durant la phase de remplissage des grains induisant le phénomène dit d'échaudage**⁴. Il est estimé que l'impact du changement climatique en Normandie, perceptible depuis la fin des années 1990, contribue au plafonnement des rendements à hauteur de 30-50%, la réduction des intrants azotés (fertilisants ou Légumineuses moins présentes dans les rotations) expliquant la proportion restante. L'évolution récente des rendements illustre les spécificités territoriales en Normandie (voir 3.3.1), avec un plafonnement très net des rendements dans l'Orne au sud de la région, plus touché par les températures élevées et les sécheresses, et à l'inverse une tendance encore à la hausse en Seine-Maritime grâce à sa situation et à la proximité de la mer ([Annexe 9a](#)).

Betterave industrielle

Une forte progression des rendements en 50 ans (passant de 400 qtx/ha à 900 qtx/ha) est observée en Normandie comme sur toutes les zones de production française ([Annexe 9b](#)). On estime à 25% la contribution de l'amélioration variétale, à 25% celles des pratiques culturales et à **50% celles des effets de l'augmentation des températures** qui favorise un développement foliaire précoce et par conséquent permet une croissance en biomasse du tubercule plus rapide et productive. Par ailleurs, **la fin de l'hiver plus doux** a conduit également à modifier les pratiques **en avançant les dates de semis** ayant pour effet corollaire **l'allongement de la durée du cycle** de culture. Plus indirectement, les progrès génétiques ont permis le développement de variétés tolérantes à la rhizomanie dont la progression est largement favorisée par l'augmentation des températures. Néanmoins, **ces effets bénéfiques des températures élevées** peuvent être nuancés par des stress thermiques tardifs déléter sur le rendement et l'extractibilité des sucres.

La récente baisse de production résultant de la fermeture d'industries sucrières locales et également de la forte remise en question de l'utilisation des néonicotinoïdes dans un futur proche seront deux facteurs pesant sur la progression de la production normande dans les années à venir sans que le changement climatique ne soit directement impliqué.

Maïs ensilage

Depuis les années 1980, les rendements dans les 5 départements ont progressé (+0.47% qtx/ha/an à +1.37 qtx/ha/an pour la Manche et l'Eure respectivement) ([Annexe 9c](#)). Cette progression s'expliquerait par **l'avancée observée des dates de semis** combinée à **l'utilisation de variétés plus tardives** permises par

⁴ Défaut de remplissage du grain suite à des températures trop élevées pendant la phase de remplissage du grain

l'augmentation des températures. En effet, au XX^e siècle, les secteurs les plus frais de Normandie (Cotentin, collines du bocage, Seine-Maritime...) présentaient des températures limitantes pour la pousse du maïs. Ceci est observé en 2013 où le printemps trop humide a fortement retardé les semis du maïs (mai-juin au lieu de avril-mai) : la période de pousse plus courte, avec des cumuls de température insuffisants, a pénalisé les rendements dans le Calvados, l'Orne et la Seine-Maritime ([Annexe 9c](#)). Dans un futur proche l'accentuation de l'augmentation des températures notamment pendant la phase de remplissage du grain, associée à des périodes de stress hydrique devrait contraindre le potentiel de production du fait d'une précocité des stades phénologiques faisant coïncider des phases sensibles du développement vers des épisodes de vagues de chaleur et de stress hydrique. Le choix et la possibilité d'irriguer ou non impactera sur les évolutions des rendements dans un futur proche.

Cultures prairiales

Les rendements pour les prairies temporaires et les surfaces toujours en herbes sont relativement stables depuis les années 1990, masquant une forte variabilité interannuelle ([Annexe 9d](#)). Seule l'augmentation de la production des surfaces toujours en herbes dans l'Eure et la Manche est significative. L'augmentation d'épisodes de **stress hydrique estival** associée à la **hausse du rayonnement** affecte négativement le potentiel de production. C'est le cas à l'été 2010, avec un stress hydrique en juin-juillet qui s'est ajouté au manque d'eau déjà manifeste en avril et mai : la production annuelle des prairies a chuté dans toute la région et très nettement dans la Manche ([Annexe 9d](#)). **Néanmoins, l'augmentation du CO₂ atmosphérique et l'apparition plus précoce de températures douces** sont des effets positifs sur la production de biomasse, et permettent également d'allonger de la période de production du fait de l'avancement de la phénologie ([Figure 12](#)). Des modifications saisonnières de niveaux de productions déjà observées seront probablement amplifiées dans un futur proche : le printemps réunit les conditions favorables à une production intense, tout comme l'hiver plus doux enregistrant moins de jours gélifs; l'été est marqué par des vagues de chaleur affectant le potentiel de production et sa reprise à l'automne.

Lin textile

Grâce à un climat doux et humide, la culture du lin est propice en Normandie principalement développée dans le Calvados (Plaine de Caen), l'Eure (Plateaux de Saint André et du Neubourg, Pays d'Ouche) et en Seine-Maritime (Pays de Caux) ([Annexe 9e](#)). Malgré une forte variabilité interannuelle, les rendements moyens sont passés de 60 qtx/ha à 70 qtx/ha avec une meilleure progression en Seine Maritime (+0.50 qtx/ha/an) et dans l'Eure (+0.38 qtx/ha/an) que dans le Calvados. L'amélioration variétale explique en partie cette progression grâce à la mise au point de variétés résistantes aux bioagresseurs, à la verse et plus riches en fibres (GEVES, 2018). Néanmoins, la variabilité interannuelle et entre départements des rendements résulte principalement **des conditions hydriques fluctuantes** (pluviométrie et réserves hydriques du sol) **à l'implantation et pendant les 100 premiers jours de végétation**. Ainsi, en 2011 la sécheresse printanière intense (mars à mai) a freiné la pousse du lin, réduisant la longueur des tiges (et des fibres), avec un rendement moyen réduit à 40-50 qtx/ha pour les 3 départements ([Annexe 9e](#)). Indirectement, le stress hydrique favorise le développement de la verticilliose. Par ailleurs, **les épisodes intenses de chaleur et sécheresse**, plus fréquentes au printemps et en été sont préjudiciables à la qualité des fibres déterminée lors la période de rouissage qui doit réunir des conditions de température et d'humidité modérées. Néanmoins si des périodes de sécheresse sont délétères vis-à-vis du rendement en fibres, elles peuvent avoir des effets bénéfiques sur la lignification des fibres (limitant les risques de verse). A la différence du lin textile, le lin oléagineux cultivé pour ses graines riches en huile n'a pas ces exigences climatiques en fin de cycle. Sa production pourrait progresser d'ici les prochaines années en raison des conditions climatiques devenant plus pénalisantes pour le lin fibre.

3.2. Projections dans un futur proche d'indicateurs agroclimatiques descripteurs de risques pour les productions agricoles

Les données de projections disponibles pour la Normandie concernent **des indicateurs agroclimatiques à horizon 2046**. Ces données sont issues du projet européen AGRI ADAPT (2016-2020) qui a développé et paramétré des indicateurs climatiques et agroclimatiques dans 4 pays européens dont la France en ciblant plusieurs régions contrastées pour leur climat et leur production agricole.

La projection de ces indicateurs a été réalisée pour les 5 départements normands à partir de modèles climatiques sous le scénario A1B SRES qui correspond au scénario médian (équivalent du RCP6.0 actuel) sous un futur proche (2018-2046). Parmi ces indicateurs agroclimatiques, on retrouve des indicateurs similaires pour les grandes cultures, et les fourrages à ceux décrits dans le projet ORACLE sur la période 1959-2015 avec en plus des indicateurs d'élevage.

- **Indicateurs agroclimatiques grandes cultures**

Les indicateurs « grandes cultures » concernent principalement les risques d'échaudage thermique (de la floraison à l'épiaison), de stress de basse température au début de la montaison, de gel automnal, de sécheresse pendant le remplissage du grain, et l'accessibilité à la récolte.

Les risques d'échaudage thermiques sont très variables mais en forte augmentation dans l'Eure, la Seine-Maritime et l'Orne (amplitude de variation du nombre de jours dont la température est supérieure à 25°C allant de 2 à 27 jours), suivi du Calvados (0-14 jours) et de la Manche (0-8 jours). **Les risques de stress au froid au début de la montaison** sont stables entre les périodes passée et projetée : nuls dans la Manche et le Calvados et variables dans l'Eure, l'Orne et la Seine-Maritime. **Les risques de gel automnal** sont différents selon les départements : nuls dans la Manche, puis en diminution marquée dans le Calvados à faible pour l'Eure, l'Orne et la Seine-Maritime. **Les risques de sécheresse pendant le remplissage du grain** augmentent dans la Manche, le Calvados et l'Eure par rapport à la période passée. Néanmoins, une tendance à la diminution de ces risques s'observe à partir de 2024 dans ces mêmes départements. Dans l'Orne et la Seine-Maritime, les périodes passées et projetées sont identiques à l'exception de quelques épisodes de stress intense d'ici 2046. **L'accessibilité à la récolte** est le seul indicateur pour lequel les projections climatiques sont favorables pour la Seine-Maritime et l'Eure ou non impactés pour les autres départements. Cet indicateur est cohérent avec l'augmentation du déficit hydrique en fin de remplissage du grain et les tendance d'augmentation des indicateurs climatiques d'évapotranspiration potentielle, de température moyenne estivale et de déficit hydrique estival.

- **Indicateurs agroclimatiques fourrage**

Les indicateurs « fourrages » concernent la date de redémarrage de pousse de l'herbe, la date de fauche précoce et le stress hydrique (i.e. nombre de périodes de 10 jours consécutifs sans pluie de mai à août). Pour tous les départements, l'amplitude de variation interannuelle de **date de redémarrage de pousse de l'herbe** est très marquée à l'exception de la Manche qui est le département le plus précoce sur la période passée. En tendance, cette date de redémarrage de pousse de l'herbe est avancée et n'est observée jamais au-delà du 11 février dans le Calvados. **La date de fauche précoce** est également variable pour tous les départements à l'exception de la Manche dont la date est également la plus tardive sur la période passée. Seule une légère tendance à l'avancement est observée pour l'Orne. **Le stress hydrique** est globalement plus important pour tous les départements mais moins variable dans la Manche.

- **Indicateurs agroclimatiques élevage**

Les indicateurs « élevage » concernent le stress thermique pour les ruminants, les besoins en climatisation et les besoins en chauffage des bâtiments d'élevage (porcs, volailles, moins présents que les bovins en Normandie). Globalement **le stress thermique** ressenti par le bétail et **les besoins en climatisation** augmentent sur la période projetée (2018-2046, futur proche) alors que **les besoins en chauffage** baissent logiquement, dans tous les départements. Ces tendances sont accrues dans l'Orne et dans l'Eure. Une plus forte variabilité interannuelle des indicateurs est observée par rapport à la période passée (1998-2017).

3.3. Quelles actions d'adaptation des systèmes agricoles et d'atténuation du changement climatique à conduire sur le territoire Normand ?

3.3.1. Quelles sont les actions d'adaptation en regard des impacts climatiques sur les productions agricoles normandes ?

- **Systèmes d'élevage**

Les systèmes d'élevage vont être impactés par **les hausses des températures estivales, le déficit hydrique et l'augmentation de la fréquence des pluies à certaines périodes**, attendues et déjà visibles. Plus particulièrement ce sont la gestion des prairies, les cultures fourragères annuelles et plus directement la santé des animaux ainsi que leur capacité de production, qui vont subir les changements et pour lesquels des modifications doivent être proposées.

Les hausses de températures estivales vont accentuer le creux de pousse pendant la période de pâturage nécessitant de décaler la période (plus tôt et plus tard dans la saison) et d'avancer les dates de récoltes de l'herbe pour maintenir un fourrage de qualité en préférant l'enrubannage et l'ensilage qui peuvent être réalisés plus précocement et donc avant les sécheresses estivales (Figure 12), profil similaire au Piémont Pyrénéen dont le climat moins tempéré en hiver réduit davantage la pousse de l'herbe). L'introduction d'espèces prairiales (fétuque, dactyle, chicorée...) et de cultures fourragères (sorgho, betterave fourragère)

plus résistantes à la sécheresse ainsi que des semis plus précoces (maïs) font également parties des leviers pour maintenir une production satisfaisante.

Par ailleurs, l'adaptation des bâtiments d'élevage et des abords (plantation de haies, de taillis) favorisant une meilleure ventilation et/ou des flux d'air est un levier pour la protection des animaux face aux vagues de chaleur récurrentes, tout comme la présence d'ombrage (haies, arbres isolés) dans les pâturages. Des races bovines plus rustiques et résistantes à la chaleur sont également à privilégier, mais cela a un impact sur le volume et la qualité du lait produit.

L'augmentation de la fréquence des pluies pendant la période de fanage implique également de favoriser un séchage du foin en grange si l'enrubannage ou l'ensilage ne peuvent être pratiqués. Avec le risque accru d'accentuer la pression sur les sols des zones de pâturage en terrain humide, des espèces animales à faible pression sont également à privilégier.

Néanmoins, ces perturbations climatiques peuvent s'avérer favorables dans certains contextes. En zones à sols profonds ou à proximité des littoraux, une augmentation de production d'herbe et de fourrages est espérée, grâce à une bonne capacité de réserve en eau des sols et à une augmentation de la température et de la pluviométrie plus modérée. L'augmentation des températures s'avère propice à la culture de soja, permettant la production locale de concentrés et par conséquent une certaine autonomie protéique de la région, mais sous condition d'irrigation (besoins en eau élevés) et de période suffisamment sèche à l'automne pour la récolte. Dans les zones littorales où la mer s'est avancée, l'utilisation des prés « nouvellement » salés pourrait développer l'élevage de moutons, à condition d'une valorisation économique rentable.

A plus long terme et selon l'ampleur des changements, des mesures d'adaptation plus drastiques pourraient être envisagées : mutation des activités de l'exploitation, délocalisations des exploitations.

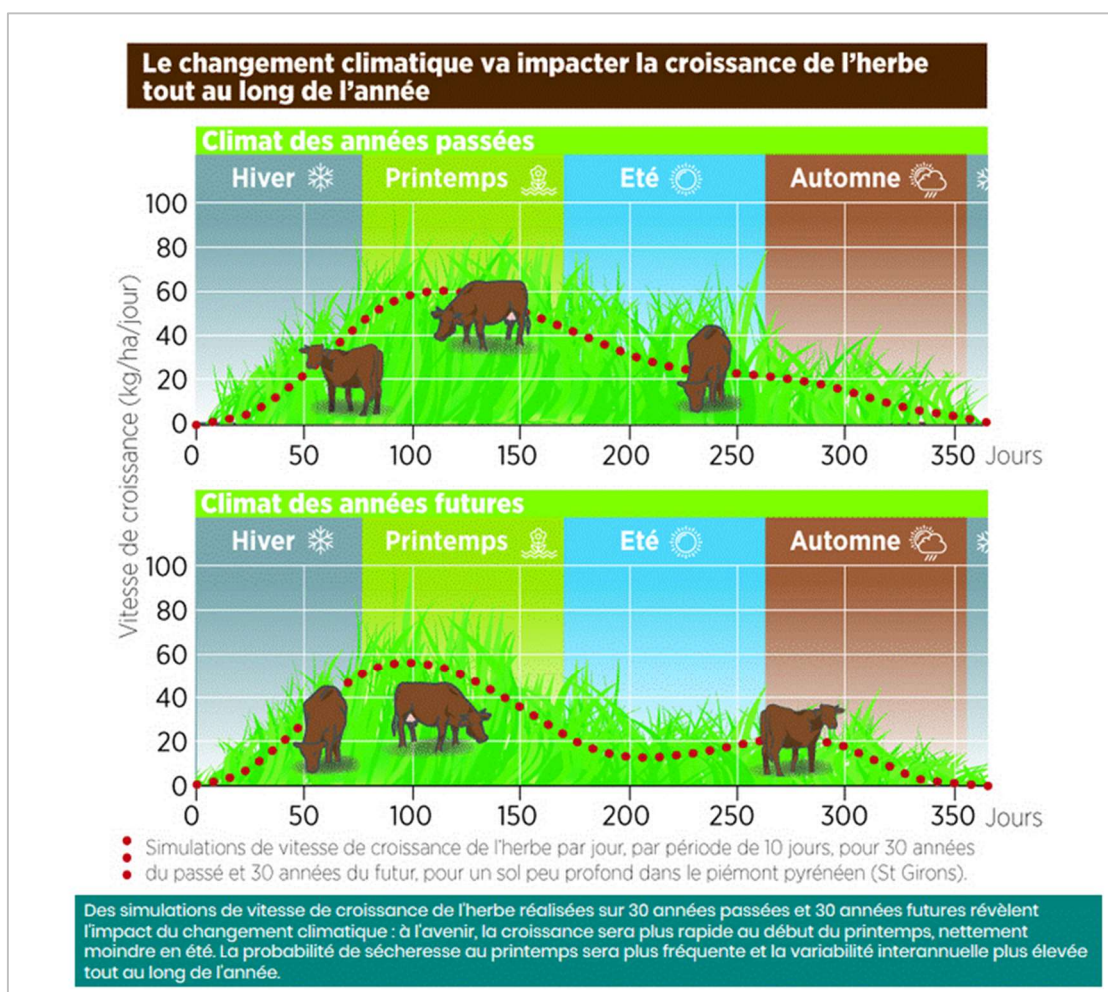


Figure 12 : Illustration des effets du réchauffement climatique sur la croissance de l'herbe dans le Piémont Pyrénéen. Source : INRAE, Préparer les éleveurs à s'adapter au changement climatique grâce à l'expérimentation virtuelle <https://www.inrae.fr/actualites/preparer-eleveurs-sadapter-au-changement-climatique-grace-a-l-expérimentation-virtuelle>

- **Productions végétales : grandes cultures et cultures industrielles**

Les cultures seront impactées par **la hausse des températures, l'accentuation des risques de sécheresse, les aléas climatiques** (gel tardif, pluies irrégulières, inondations, grêle...) et **la hausse de pression des ravageurs** (insectes, certains champignons...). Les leviers d'adaptation se déclinent à plusieurs échelles de l'exploitation agricole (synthèse des actions d'adaptation en ([Annexe 10](#))).

A l'échelle de la culture, il s'agit de privilégier les variétés résistantes aux stress hydrique et thermique, et tolérantes aux pathogènes dont le développement est favorisé par des températures plus chaudes. En parallèle, la multiplication des semences ayant des caractéristiques adaptées aux différents stress contingents au changement climatique s'avère essentielle. La culture de variétés en mélange favorise également leur résilience individuelle face aux aléas climatiques. Etant donné l'augmentation des températures, le choix de variétés ayant des besoins en températures plus élevés (comme un maïs grain tardif) et au fort potentiel est à privilégier. Pour les céréales d'hiver, la combinaison variétés/date de semis est également importante pour assurer (i) un remplissage des grains avant période de température élevée et (ii) une vernalisation efficace.

A l'échelle du système de culture, les itinéraires techniques devront être modifiés en proposant des dates de semis ou de récoltes plus précoces pour éviter les stades sensibles en période de sécheresse (implantation), canicule (maturité) ou pour permettre l'implantation d'espèces non gélives à la sortie de l'hiver.

L'allongement du cycle de culture en modifiant les dates de semis peut également être bénéfique pour un meilleur enracinement palliant en partie les stress hydriques.

Face à l'augmentation des températures, il faudra favoriser l'implantation de cultures ayant des besoins en température plus importants (comme le tournesol, le soja) ainsi que de cultures intermédiaires ou des cultures après la moisson pour limiter les risques d'échec au semis sur un sol trop sec à la fin de l'été. Le développement de l'agroforesterie est également un levier pour réguler les températures sur les cultures adjacentes.

La diversification des cultures ainsi que l'augmentation des rotations favorisent la résilience des cultures face aux aléas climatiques (indirectement grâce à une meilleure fertilité et états sanitaires des sols).

Enfin, plus spécifiquement à **la gestion des opérations techniques**, il sera nécessaire d'adapter (i) le fractionnement des apports d'azote au printemps en fonction des prévisions de pluie (et moins des stades de croissance) pour assurer l'absorption de l'engrais, (ii) le matériel d'implantation vis-à-vis des conditions de portance (semis direct, semis à la volée, voire semis avec drone), (iii) le matériel et l'organisation des chantiers lors des moissons et (iv) les périodes et fréquence de surveillance des parasites et ravageurs aux périodes sensibles des cultures (par exemple, l'élévation de températures est favorables à la production d'une seconde génération de carpocapses chez les fruitiers ou de pyrales chez le maïs).

A l'échelle de la gestion du sol, les actions ont pour objectifs (i) une meilleure gestion des réserves hydriques du sol et (ii) une diminution de l'érosion. Ces actions concernent la réduction du travail du sol pour mieux conserver l'humidité, le « paillage » au pied des cultures pour limiter l'évapotranspiration, la maximisation voire permanence de la couverture du sol pour modérer l'élévation de la température au sol, l'augmentation du taux de matière organique pour améliorer la capacité de réserve en eau du sol et également toute technique pour limiter la battance et le ruissellement (installation de bandes enherbées, haies, fascines, restructuration parcellaire) afin de protéger de l'érosion.

Enfin **l'irrigation doit être adaptée** au nouveau contexte climatique afin de satisfaire les besoins aux cultures tout en limitant toute consommation superflue. Cette adaptation passera par le remplacement de cultures gourmandes en eau en été (pommes de terre, betteraves, maïs...) par des cultures plus économes (soja, lentilles, pois chiche, cameline, tournesol, sorgho...), le développement de systèmes et de techniques économes et efficaces (création de retenues d'eau pour irriguer les cultures dans les zones où les réserves en eau du sol ne sont plus suffisantes, entretien des systèmes existants).

- **Des spécificités territoriales**

Ces efforts d'adaptation au changement climatique sont dépendants des spécificités territoriales à la fois pédoclimatiques et foncières. En effet, les effets du changement climatique sont davantage modérés à l'ouest et au nord en zones côtières, car atténués par un climat océanique franc, à la différence des zones continentales au climat océanique altéré, en allant vers l'est voire dégradé tel que dans le plateau St André dans l'Eure.

Ainsi, l'ensemble du territoire sera différemment impacté par la fréquence d'événements extrêmes (canicule, sécheresse, grêle, tempête, inondation, gelée tardive...), l'intensification des effets des parasites et ravageurs (incluant l'apparition d'espèces nouvelles) fortement liée aux températures élevées et la hausse du niveau de la mer exclusivement en zone basse littorale et qui peut perturber l'activité agricole.

Par conséquent, une modulation des principales actions d'adaptation à conduire s'impose pour tenir compte des spécificités territoriales : implantation de nouvelles cultures (ou variétés) exigeantes en température, l'utilisation de cultures (ou variétés) plus précoces (décalage des semis et récoltes) tout en évitant les risques de stress thermiques pour les cultures grainières et les prairies dans les zones les plus chaudes, optimisation des besoins accrus en eau des cultures en fonction de leur zone d'implantation (moindres à proximité du littoral et en sol profond, bien plus marqués à l'intérieur des terres et en sol superficiel).

3.3.2. Quelles sont les actions d'atténuation en regard des impacts climatiques sur les productions agricoles normandes ?

- **Mesures d'atténuation en production laitière bovine**

Des mesures d'atténuation en production laitière bovine ont émergé du programme Life CarbonDairy⁵ (2013-2018). Ce programme français a regroupé des données de 180 exploitations bovines laitières en ex Basse Normandie afin d'évaluer l'impact des pratiques agricoles sur les bilans de GES⁶ (dioxyde de Carbone (CO₂), méthane (CH₄) et protoxyde d'azote (N₂O)), et de dégager des leviers d'atténuation. En moyenne, une exploitation laitière sur ce territoire émet 786 300 éq. CO₂/an provenant des différents postes d'élevage (fermentation entérique, gestion des effluents, achats d'aliments...) et stocke 109 600 éq. CO₂/an provenant majoritairement de la photosynthèse des prairies et haies, ce qui compense 25% des émissions. Si parmi les sources émettrices de CO₂, les infrastructures (types de bâtiments, consommation électrique) ont un impact important, les pratiques d'élevage sont cruciales car déterminantes pour les efficacités de production (lait produit par hectare, lait produit par vache).

Ainsi, il ressort **plusieurs leviers pour réduire les émissions en CO₂ et stocker davantage de Carbone** par litre de lait produit : augmenter la quantité d'herbe valorisée des prairies, maîtriser la quantité et la qualité de l'herbe dans les rotations longues, favoriser le pâturage pour limiter le transport et le stockage des effluents, réduire les consommations en carburant et électricité (pratique de l'éco-conduite, mise en place de récupérateur de chaleur...). **La réduction d'émissions de CH₄ et N₂O** par litre de lait produit est possible en limitant le nombre d'animaux improductifs et consommateurs (meilleure conduite sanitaire des troupeaux, réduire l'âge au 1^{er} vêlage et le taux de réformes) et en modifiant la production d'aliments destinés au bétail (implantation de légumineuses, pratique de l'interculture fourragère) pour diminuer l'achat de concentrés et fertilisants et favoriser l'autonomie protéique.

- **Mesures d'atténuation en productions végétales**

Les pratiques agricoles ont un rôle majeur dans l'atténuation des effets du changement climatique via **la réduction et le stockage des GES**.

La réduction des émissions de GES repose sur la consommation plus responsable et durable d'intrants (particulièrement les fertilisants azotés) afin d'abaisser les coûts énergétiques de production et de transport. Ainsi l'optimisation des quantités d'engrais azotés de synthèse ou organiques et en développant les cultures de légumineuses permet de réduire les émissions N₂O et la réduction de consommation de carburant par les engins agricoles (échanges parcellaires pour optimiser les trajets, réduction du travail du sol, éco-conduite, banc moteur...) permet de réduire les émissions de CO₂.

Le stockage des GES concerne principalement le CO₂. De façon directe, les productions végétales sont elles-mêmes des leviers importants qui agissent sur la séquestration du CO₂ atmosphérique, via un stockage du carbone dans les sols (de longue durée) et dans la biomasse aérienne (de courte durée). A titre indicatif, les forêts et les prairies ont une capacité à retenir dans le sol d'environ 80 tonnes de carbone par hectare en moyenne. Néanmoins, les changements avérés d'usage des sols (artificialisation, retournement des prairies) concourent à réduire ce potentiel de séquestration (Initiative 4 pour 1000 sur les sols pour la sécurité alimentaire et le climat⁷).

⁵www.carbon-dairy.fr

⁶ Gaz à Effet de Serre

⁷<https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/etude-4-pour-1000-resume-en-francais-pdf-1.pdf>

De cette étude, les mesures d'atténuation via le stockage du carbone par les pratiques d'exploitation des cultures, adaptées au contexte normand sont les suivantes :

- **Extension des cultures intermédiaires** : insertion et allongement des cultures intermédiaires entre deux cultures principales, permettant un stockage additionnel en moyenne pour la France de + 126 kg C/ha/an (estimation INRAE). Il convient de relever qu'une bonne partie de la région est déjà concernée par l'obligation de culture intermédiaire liée à la directive nitrates. L'extension de la pratique est bridée par des sécheresses estivales qui pénalisent de plus en plus souvent la levée et la pousse de ces cultures. On peut noter que l'agriculture de conservation des sols (non expertisée dans l'étude INRAE) est aussi une pratique favorable au stockage de carbone car elle intègre le principe d'une couverture végétale permanente ou presque, sous la culture principale. Ce mode de culture est actuellement en développement en Normandie avec plusieurs groupes d'agriculteurs structurés en GIEE⁸.
- **Semis direct** : travail du sol uniquement sur la ligne de semis permettant un stockage additionnel de + 60 kg C/ha/an (estimation INRAE). Cette pratique est moins fréquente dans la région que le non labour car elle est beaucoup plus exigeante au plan technique.
- **Apport au sol de nouvelles ressources organiques** permettant un stockage additionnel de + 61 kg C/ha/an (estimation INRAE). En Normandie, la présence de zones d'élevages denses permet d'envisager la répartition d'une partie des produits organiques (fumiers, fientes ou lisiers) vers les zones de grandes cultures, dans le cadre d'échanges paille-fumier par exemple.
- **Insertion et allongement de prairies temporaires dans les successions de grandes cultures**, permettant un stockage additionnel de + 114 kg C/ha/an (estimation INRAE). Cela pourrait se développer par exemple avec une coopération entre céréaliers et éleveurs pour trouver une destination au fourrage produit, à l'instar des projets de luzerne cultivée en parcelles de grandes cultures et à destination des élevages situés à proximité.
- **Développement de l'agroforesterie intra-parcellaire** permettant un stockage additionnel de + 207 kg C/ha/an (estimation INRAE) dans les contextes d'orientation de parcelles et de sol adaptés et pour les exploitants ayant les capacités d'investir dans la plantation.
- **Implantation de haies** permettant un stockage additionnel de + 17 kg C/ha/an (estimation INRAE), et modifications des modes de gestion des haies existantes pour maximiser le stockage de carbone dans la biomasse (trois strates, entretien régulier...)

Par ailleurs, ces mesures promouvant le stockage de carbone par les pratiques agricoles sont encouragées car elles font l'objet du Label bas carbone⁹ mis en place par l'état. Ce label permet de reconnaître les méthodes de stockage et de récompenser les agriculteurs engagés par les financements volontaires. La méthode « Carbon Agri » pour les élevages bovins est labellisée depuis 2019. D'autres méthodes sont attendues dans les prochains mois pour les grandes cultures et les haies.

4. Conclusions

4.1. Synthèse des enjeux et actions à poursuivre sur les conséquences du changement climatique sur l'aléa ruissellement érosif et la qualité des sols.

Les enjeux du changement climatique pour les sols sont forts au vu des différentes projections climatiques aux horizons 2050 et 2100. L'augmentation des pluies hivernales, la recrudescence des pluies intenses sont autant de facteurs aggravants dans une région présentant déjà beaucoup de facteurs de prédisposition à certains aléas (ruissellement, érosion des sols, coulées de boue).

Toutefois plusieurs indicateurs montrent que des pistes d'adaptation et de mitigation existent. Certaines sont inhérentes au changement climatique lui-même. Les stades phénologiques vont évoluer, avec notamment un avancement prononcé de la levée et du tallage du blé aux horizons 2050 et 2100. Les résultats de la modélisation pour le scénario 8.5 à partir du croisement des données du modèle Safran (l'observation) et de CNRM-2014 (modèle régional ALADIN-Climat) montrent que d'ici la fin du siècle le potentiel de température pour le développement de la plante au début de l'hiver météorologique deviendrait équivalent à celui observé en milieu d'automne sur la période de référence 1976-2005 (Beauvais et al., 2019). A titre d'exemple, dans le cas d'un semis tardif du blé (le 1er décembre), le tallage aurait lieu 20 jours plus tôt.

⁸ GIEE Groupement d'Intérêt Economique et Environnemental, collectif d'agriculteurs reconnu par l'état

⁹ Label bas carbone <https://www.ecologie.gouv.fr/label-bas-carbone>

La couverture du sol en début de saison humide est cruciale pour réduire la formation de la battance et **cette avancée des stades phénologiques peut être une alliée précieuse pour la réduction des impacts.**

Par ailleurs, nous n'avançons pas vers des situations climatiques totalement inconnues. La variabilité interannuelle des précipitations actuelles est supérieure aux projections les plus pessimistes à l'horizon 2100. Les pluies durant les trois mois de l'hiver 2019-2020 ont dépassé les 320 mm à la station de Boos-Rouen bien au-delà de la pluie moyenne actuelle (230 mm) même augmentée de 25%.

L'enjeu n'est pas l'apparition de hauteurs de pluies inconnues mais bien de la recrudescence de pluies importantes qui se produisent déjà. Face à ces pluies abondantes tout un arsenal d'outils d'aménagement et de mitigation existe déjà. La région Normandie et notamment l'ex Haute-Normandie est pilote dans le domaine. De la maîtrise de la formation du ruissellement au contrôle du système érosif, le territoire dispose de méthodes déjà à l'œuvre et éprouvées. **Cela ne veut pas dire que l'aléa est totalement sous contrôle : l'ampleur des phénomènes observés durant l'hiver 2019-2020 dans toute la Seine Maritime a clairement démontré le contraire. En revanche la connaissance en matière de stratégie d'aménagement et d'outils à déployer sur le terrain est acquise.**

Ces conclusions concernent les phénomènes hivernaux associées à de longues séquences pluvieuses. **Elles ont beaucoup moins de sens pour les phénomènes orageux printaniers ou estivaux qui par leur imprévisibilité et leur intensité rendent bien difficile toute stratégie de mitigation.**

Enfin il convient de rappeler que la réflexion sur **le changement climatique ne doit pas se substituer à une réflexion plus systémique sur le changement global.** Les causes des risques hydrologiques sont certes climatiques mais également en lien avec l'évolution de l'agriculture (recul des prairies, gestion des intercultures, pratiques agricoles...) et plus largement à celle de l'ensemble du territoire (urbanisation, imperméabilisation).

Pour faire monter en puissance les capacités d'adaptation et de mitigation, **il convient de poursuivre les expérimentations sur les méthodes « douces » de gestion de l'eau** dans les bassins versants mais également de promouvoir des démarches collectives (participatives) avec les agriculteurs pour renforcer **l'appropriation par les acteurs des enjeux du changement climatique.**

Aujourd'hui il existe beaucoup de bases de données pour construire des indicateurs de suivi des territoires. Il faut les harmoniser et tendre vers des suivis à haute fréquence pour **disposer d'indicateurs (battance, couverture végétale, réseau d'érosion) à des pas de temps fins.**

4.2. Synthèses des enjeux et actions à poursuivre dans le domaine agricole

Si les **effets du changement climatique** sur le territoire agricole sont indéniables, il est néanmoins nécessaire de **nuancer les évolutions de rendements et de surfaces (des prairies) à la lumière d'autres facteurs** liés à l'urbanisation, aux différentes crises agricoles, aux modifications de pratiques plus respectueuses de l'environnement et également de la stagnation des progrès génétiques.

Par ailleurs, ces effets associés à l'augmentation de températures et, à la sécheresse et/ou à une pluviométrie exacerbée selon la saison ne sont pas toujours synonymes d'une perte de rendement puisque certaines cultures bénéficient notamment d'une douceur automnale et hivernale favorisant leur implantation et un développement foliaire précoce.

Sur le territoire normand, **ces effets sur l'agriculture sont globalement modérés au vu des tendances connues sur les 4 dernières décennies.** Des mesures d'adaptation et de mitigation aux échelles locales peuvent permettre de pallier les effets négatifs et d'éviter d'envisager des mesures de rupture de la gestion des systèmes agricoles.

Afin d'affiner ces mesures en tenant compte des scénarii climatiques les plus probables à des échelles très locales, des données de projections s'avèrent essentielles.

Néanmoins, si les évolutions d'indicateurs agro-climatiques sont disponibles, cette synthèse aura permis de pointer une **quasi-absence de prévisions des rendements des cultures** à horizon 2100. Seules des prévisions des productions de maïs fourrage et de luzerne ont été réalisées dans le projet Climalait à horizon 2100 (modèle climatique Aladin, modèle de grande culture STICS) mais uniquement sur deux sites peu

impactés par les changements climatiques. D'autres projets passés tel que Climator¹⁰, ont permis de réaliser des projections de rendements agricoles grâce à l'utilisation de modèles de grandes cultures prédictifs pour différentes régions françaises mais il n'y a pas de données spécifiques à la Normandie.

A l'instar du projet Climator, **une analyse prospective des rendements pour les départements de Normandie serait un outil clé pour (i) évaluer de façon quantitative les effets des projections climatiques sur le rendement et la qualité des cultures et (ii) dégager les variables environnementales les plus impactantes afin d'orienter les choix d'itinéraires techniques au sens large.** A ces fins, l'utilisation de modèles de grandes cultures (Rapport ASIRPA, mars 2014¹¹) s'impose comme un moyen nécessaire pour (i) progresser dans l'analyse des effets du changement climatique en complément des indicateurs agro-climatiques déjà disponibles sous différents scénarios climatiques dans un futur proche (2020-2049) et un futur lointain (2070-2099) et (ii) proposer des scénarii d'adaptation et/ou de mitigation.

Enfin, les exploitants agricoles s'avèrent des interlocuteurs indispensables pour vérifier la faisabilité technique des actions d'adaptation et de mitigation dans le contexte propre de leur exploitation mais également pour en apprécier les conséquences économiques, afin qu'ils puissent évaluer la durabilité de leur système dans le nouveau contexte climatique et sa variabilité.

Dans cette optique, les approches de science participatives ont à développer davantage. Dans le cadre du projet Climalait¹² (financé par le CNIEL¹³ et piloté par IDELE¹⁴), les agriculteurs ont participé à la production de scénarii d'adaptation des élevages au changement climatique dans de nombreuses régions françaises et notamment en Normandie au moyen d'un jeu pédagogique et interactif (le Rami Fourrager¹⁵). Cette action illustre comment les **interactions entre acteurs de la filière et scientifiques** favorisent la diffusion de connaissances agroclimatiques et la co-construction de solutions d'adaptation et de mitigation en lien avec le climat futur.

¹⁰ Projet de recherche pluridisciplinaire destiné à étudier les impacts potentiels du changement climatique sur les systèmes de culture français. Financement ANR (2007-2010)

¹¹ http://idele.fr/fileadmin/medias/Documents/Rami_fourrager.pdf

¹² Climalait <https://normandie.chambres-agriculture.fr/toutes-les-publications/publication/actualites/climalait-pour-ladaptation-des-systemes-laitiers-de-la-manche-au-changement-climatique/>

¹³ Centre National Interprofessionnel de l'Economie Laitière

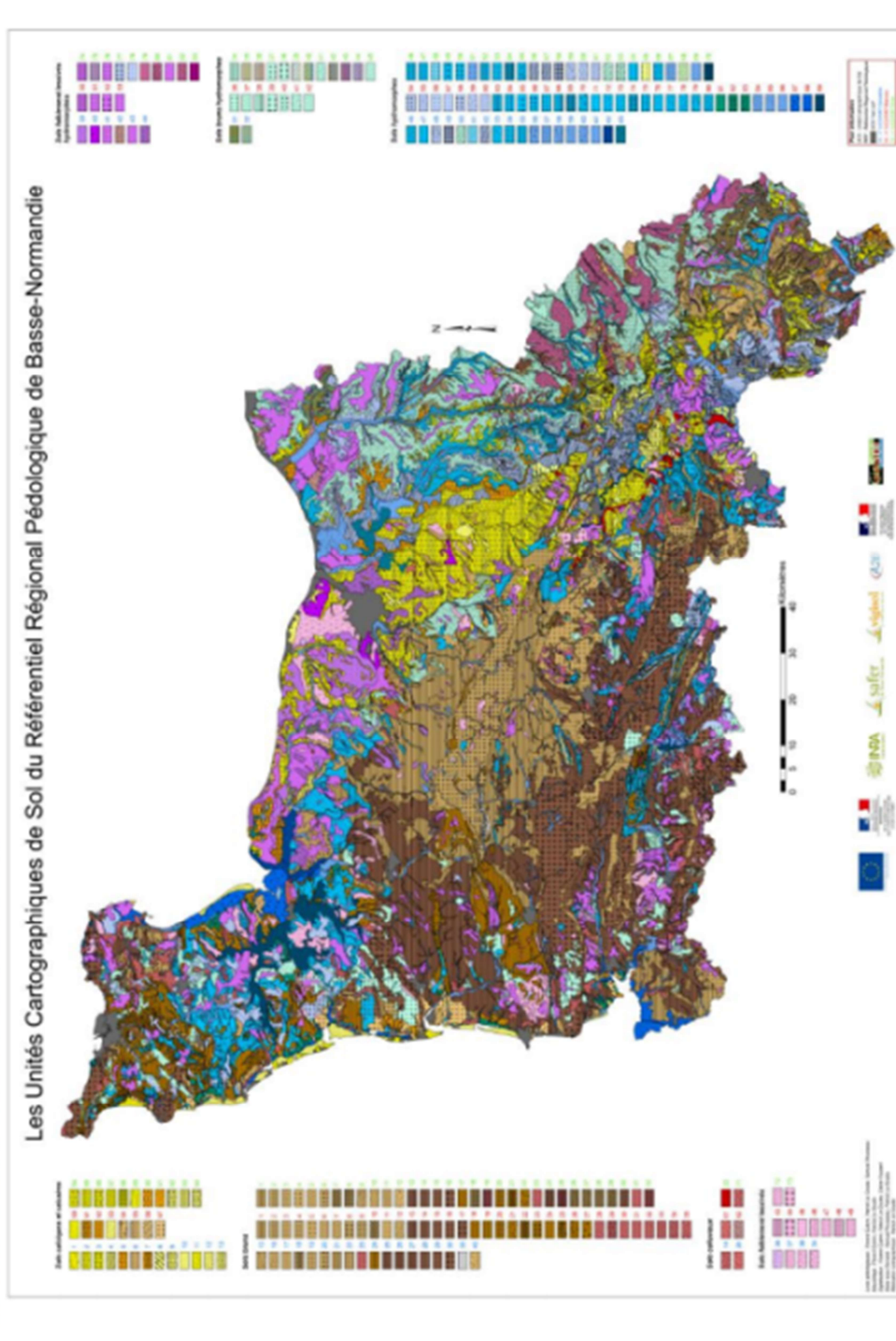
¹⁴ Institut de l'élevage

¹⁵ http://idele.fr/fileadmin/medias/Documents/Rami_fourrager.pdf

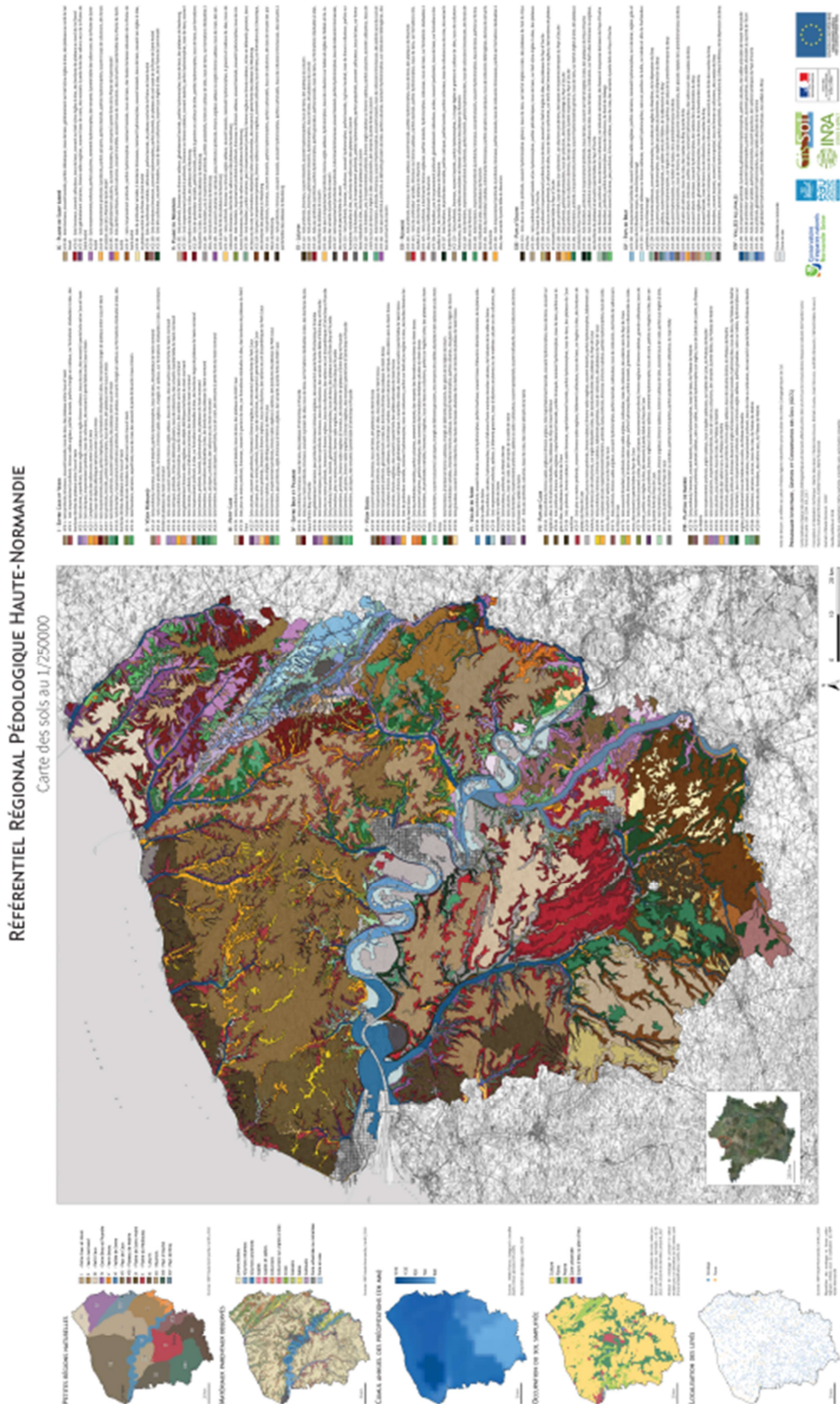
Le Référentiel Régional Pédologique de Basse-Normandie



Les Unités Cartographiques de Sol du Référentiel Régional Pédologique de Basse-Normandie



Annexe 1.2 :Cartographie régionale des sols de Normandie au 1/250 000P : Haute Normandie (CEN 2018)

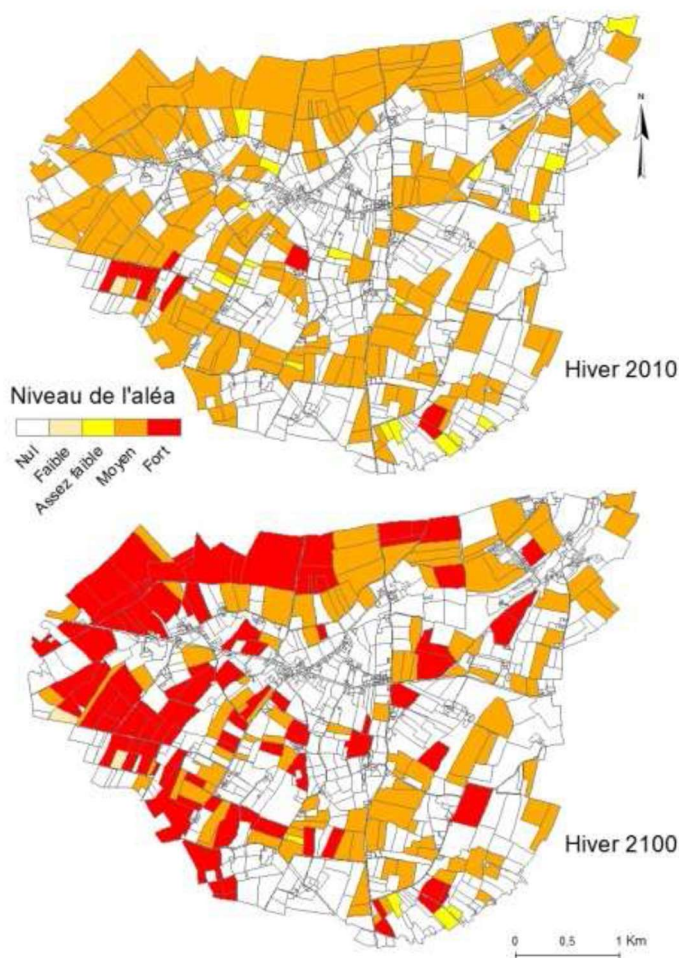


Annexe 2: Evolution de l'aléa érosion en hiver à l'horizon 2100 dans le bassin du Lingèvres (Calvados). Simulation à l'échelle parcellaire à partir du modèle SCALES (Scénario A1B du GIEC), programme Climaster 2013 (Delahaye 2013)

En périphérie du bassin versant, notamment à l'amont, des placages épais de limons éoliens (loess) recouvrent les formations argileuses et calcaires. Les sols sont majoritairement hydromorphes. En périphérie du bassin versant, sur les parties hautes, on note la présence de néoluvisols limoneux moyennement ou fortement rédoxiques dont l'épaisseur dépasse 1 mètre. 70% des versants du Lingèvres sont occupés par des sols argileux rédoxiques de faibles épaisseurs (40 cm). Ce bassin a été choisi car il présente une gamme variée de sols et de sensibilités à l'érosion.

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). Le climat local est caractérisé par des précipitations annuelles abondantes, comprises entre 900 et 1000 mm

La projection de l'aléa érosion pour septembre montre des niveaux identiques à ceux obtenus pour la période actuelle. En octobre, les surfaces cultivées concernées par l'aléa faible augmentent que les parcelles caractérisées actuellement par un aléa fort disparaissent. La diminution de la susceptibilité à l'érosion des sols des surfaces cultivées s'explique par la forte diminution des précipitations estivales mais sur en automne. Cela retarde la recharge des réserves utiles en reportant à novembre l'apparition des premiers surplus hydrologiques. Il faut attendre le mois de décembre pour voir la tendance s'inverser avec une susceptibilité au ruissellement et à l'érosion plus affirmée à l'horizon 2100. Ce constat s'amplifie aux mois de janvier et février plus humides avec au sortir de l'hiver une majorité des parcelles cultivées de la ceinture limoneuse au nord de bassin qui basculent de l'aléa moyen à l'aléa fort.

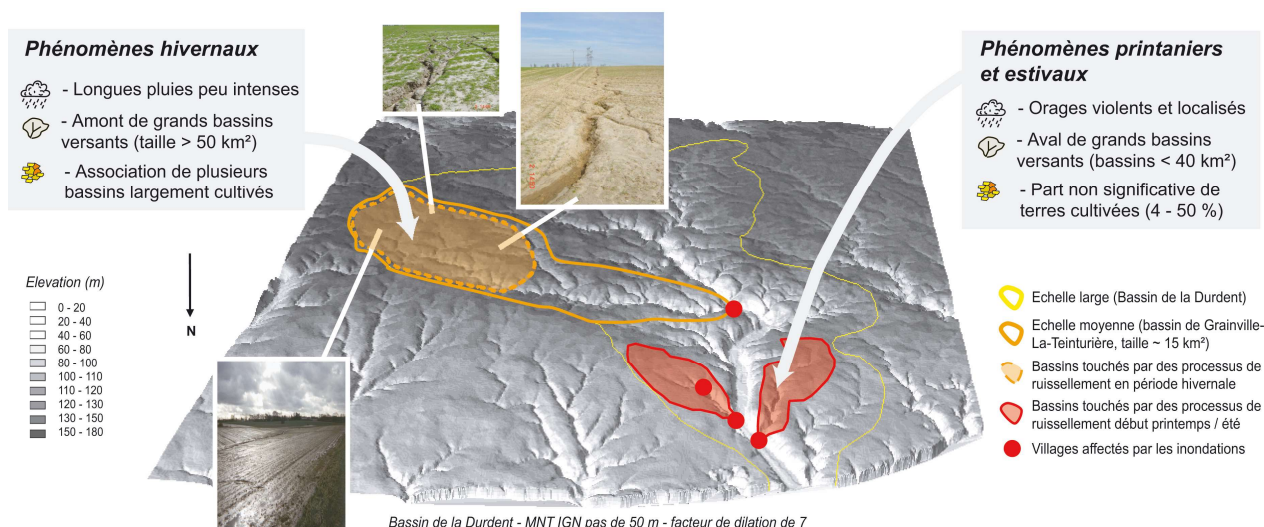


En comparant les résultats du modèle paramétré avec les données climatiques envisagées pour 2100 et ceux obtenus pour quelques années humides de la période actuelle de référence, il a été possible de conclure que les niveaux d'aléas obtenus pour une année moyenne à l'horizon 2100 correspondraient à une année de la période actuelle dont la périodicité de retour est de 4 ans. Cette estimation rejoint celle effectuée dans les paragraphes précédents

Annexe 3 : Coexistence de deux types d'espaces sensibles aux crues rapides en Normandie en fonction des saisons (exemple du bassin de la Durdent, 360 km²) (Delahaye 2008)

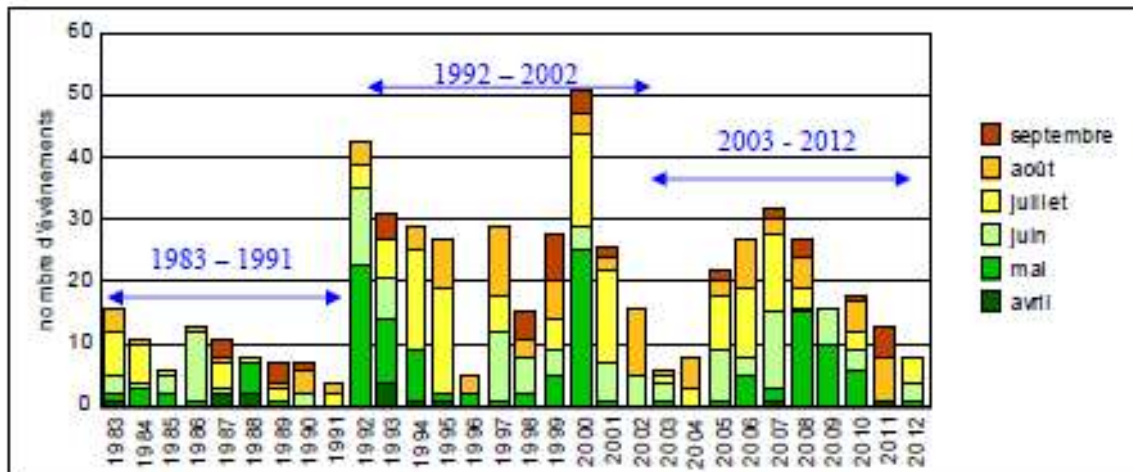
Les coulées de boue hivernales sont liées à de longues pluies peu intenses. L'apparition d'une catastrophe nécessite la présence de vastes impluviums permettant la concentration d'un volume de ruissellement important après une phase de dégradation de la surface des sols (battance). Ces crues vont prendre naissance en amont des grands bassins versants, zone où les bassins élémentaires se développent largement sur le plateau. Sur ces bassins, le plus souvent très cultivés, le fonctionnement du ruissellement est chronique. Tous les travaux expérimentaux ont montré des manifestations quasi annuelles du ruissellement érosif. Pour passer de ces écoulements locaux à un phénomène de crue, il faut atteindre un cumul pluviométrique très important (> 90 mm en 10 jours). Quand le seuil est atteint, le système de ruissellement change d'échelle et c'est le fonctionnement conjugué de plusieurs bassins élémentaires (jusqu'à l'ordre 4 à 5) qui va permettre d'atteindre « la masse d'eau critique ». Dans ce cas l'incidence de l'occupation du sol est patente. Le sol des parcelles cultivées n'étant pas protégé, il se dégrade sous l'effet de la pluie cumulée et sa capacité d'infiltration chute rapidement selon les mécanismes décrits plus haut.

Les événements liés aux orages printaniers constituent l'autre forme classique des coulées de boues en Normandie. Les processus sont totalement différents des précédents. La pluie est toujours violente (> 60 mm en quelques heures). L'écoulement est torrentiel et violent causant des dégâts catastrophiques. L'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration des sols, il n'y donc pas nécessairement la phase de préparation des sols. Le comportement des surfaces est moins subtil que dans le cas des pluies hivernales et très souvent les bassins sont très peu cultivés (< 20% de surfaces en culture). C'est la morphologie qui est ici le facteur aggravant. Systématiquement les bassins qui subissent les crues printanières et estivales sont de petites tailles (moins de 40 km²) et en forte pente. Ils sont toujours situés en position d'affluent à l'aval d'un bassin beaucoup plus grand. Le plus souvent ce sont des bassins largement boisés car les pentes sont fortes (parfois plus de 60 % de bois). Ces aléas constituent la forme la plus dangereuse des risques hydrologiques de la région.



Différenciations spatiale et temporelle les crues rapides en Normandie (exemple du bassin de la Durdent, 360 km²)

Annexe 4 : Evolution du nombre d'événements « coulées de boue » liés à des orages de printemps ou d'été dans nord du Bassin Parisien (1983-2012). Mise en évidence de la décennie sensible (1992-2002) (Probst 2017)



Annexe 5 Exemples de pratiques et d'aménagements anti-érosifs (AREAS)



Simulation de pluie sur Blé en système culturale classique AREAS 25-2-2016



Semis de Blé sous couvert de mulch de résidu de culture. Doudeville 4-02-2018



Création de micro barrage dans l'inter-butte des pommes de terre pour créer un flacage capable de stocker une lame ruisselée de 5 à 20mm..Foucart 2012



Chenal enherbé de fond de talweg anti-érosif. Bourville 11-12-2017



Effet d'une fascine (avec pieu en saule vivant) sur la rétention de MES - Manneville es plains 25-3-2018



Effet d'une Haie herbacée sur la rétention de MES - Fontaine le Dun 20-01-2020

Annexe 6 : Principaux résultats de l'efficacité des techniques culturales testées pour réduire le ruissellement

Résultats et Enseignements

Le Tableau ci-après résume les principaux résultats de l'efficacité des techniques culturales testées pour réduire le ruissellement.

Caractéristiques des essais : largeur = 1,5 m à 2 m (= 1/2 largeur de travail) longueur = 10 m sous pluies naturelles et 5 m sous pluies simulées		Conditions expérimentales des pluies	Ruissellement sous pluies naturelles			Résultats complémentaires
Référence de l'essai *	Modalités testées		Taux de réduction / témoin**	Taux de ruissellement (moyenne annuelle)	Lame ruisselée	
		mm/h	%	%	mm	
Interculture CA76-2004-11	Témoin : Non déchaumage Déchaumage très moueux Culture intermédiaire de moutarde	saison hivernale	- 35 à 62 50 à 95	11 à 13,4 5,0 à 7,0 1 à 2,2		Transferts de produits phytosanitaires : - Réduction de 95 % par rapport au témoin
CA76-2002-01	Semis de ray grass sous couvert de maïs	saison hivernale	38			
AREAS-2005-08 et AREAS-2005-09	Chantier de récolte de céréales Chantier de récolte de betteraves Culture intermédiaire de moutarde	une pluie simulée	33			Pluie d'imbibition : 1,0 à 1,5 mm 1 mm 5,9 à 7,6 mm Infiltrabilité à saturation : 4 à 16 mm/h 4 à 15 mm/h 7 à 8 mm/h
CA76-2004-11	Témoin : Non déchaumage Culture intermédiaire de moutarde	saison hivernale				Erosion diffuse = 144,5 kg/ha Erosion diffuse = 6 kg/ha (réduction de 95 %)
Blé et céréales d'automne						
CA76-2007-16	Effet du degré d'affinement et du tassement liés aux outils Témoin : parcelle tassée et affinée (tracteur lourd - tasse avant - pneus larges - herse rotative - rouleau packer) Parcelle peu tassée et affinée (tracteur léger sans tasse avant - sans jumelage - herse alternative - rouleau barre) Parcelle tassée et affinée (tracteur léger - tasse avant - roues jumelées - prépare sol - rouleau barre)	saison culturale				
ARPTHN-2003-03	Effet du précédent pomme de terre Témoin : blé sur précédent PDT non tamisée Blé sur précédent PDT tamisée	saison culturale (4 pluies significatives)	- 14	24,5 21,1	12,9 11,1	
ARPTHN-2002-01	Témoin : blé labouré sur précédent PDT non tamisée Blé labouré sur précédent PDT tamisée Blé sans labour sur précédent PDT tamisée		- -9 97,4	39,1 42,7 1	16,9 15,5 0,4	
ARPTHN-2004-05	Témoin : blé sans décompactage et avec labour sur précédent PDT tamisée Blé sans décompactage et sans labour sur précédent PDT tamisée Blé avec décompactage et sans labour sur précédent PDT tamisée Blé avec décompactage et sans labour sur précédent PDT non tamisée		- -10 90 70	10,7 11,8 1,1 3,2	6,1 6,7 0,6 1,8	Variation des taux de ruissellement : 3,1 à 20,2 % 3,1 à 15,3 % 0,7 à 2,4 % 2,0 à 4,1 %
CA76-2003-03	Ecroulage en sortie d'hiver Témoin : blé classique Ecroulage de printemps herse étrille Ecroulage de printemps houe rotative	saison printemps été (4 pluies)	- -18 37	16,1 18,9 9,9	10,1 12 6,3	Taux de ruissellement pluie du 14/06/03 : 14,60% 20,20% 8,60% Infiltrabilité pour la pluie du 14/06/03 : 22 à 28 mm/h 25 mm/h 33 à 35 mm/h
Maïs						
CA76-2006-14	Effet du degré d'affinement Témoin : lit de semence affiné et rappuyé Lit de semence moueux et sans traces de roues	saison printemps été	- 87	11,4 1,4	11,1 1,4	Taux de ruissellement pour les pluies du 14/06 et 04/07/06 : 8,2 à 17,8 % 0,7 à 1,3 %
CA76-2004-08	Semis du maïs en réparti Témoin : semis en lignes classique (écartement 75 cm) Semis en réparti (répartition aléatoire des pieds)	saison printemps été (4 pluies en 2004 et 2 pluies en 2006)	- 36	- -	5,1 3,3	
CA76-2006-13	Témoin : semis en ligne classique (écartement 75 cm) Semis en réparti (répartition aléatoire des pieds)		- 83	12,2 2,1	2,0 0,3	Taux de ruissellement pour la pluie la plus ruisselante du 15/06/06 : 24,10% 4,10%
CA76-2005-12	Semis direct sous mulch Témoin : semis classique après labour Semis sans labour avec décompactage et travail superficiel Semis direct sous mulch avec décompactage d'automne*** Semis direct sous mulch avec décompactage de printemps***	saison estivale (3 pluies)	- -69,1 89,2 79,9	6,1 10,4 0,7 1,2	1,8 3,1 0,2 0,4	Taux de ruissellement pour la pluie la plus ruisselante du 03/07/05 : 8,20% 13,70% 0,80% 1,40%
CA76-2004-08	Semis sur billon avec strip till Témoin : semis classique en ligne Semis avec strip till (travail du sol uniquement sur le rang)	saison estivale	- 24		5,1 3,9	
AREAS-2004-05 et AREAS-2004-06	Binage Témoin : semis classique sans binage Inter-rang biné en juin hors traces de roues Inter-rang biné en juin avec traces de roues	une pluie simulée de 1h	31			Taux de ruissellement : 25 à 59 % 0% 22% Pluie d'imbibition : 3 à 5 mm > 41 mm > 13 mm Infiltrabilité à saturation : 7 à 22 mm/h 18 à > 33 mm/h 18 à > 33 mm/h
Betterave sucrière						
CA27-2002-05	Témoin : semis classique sans binage Parcelle binée en mai	saison printemps été	- 88	0 à 9,5 0 à 2,2	3,0 0,35	
CA27-2004-10	Témoin : semis classique sans binage en 2004 Parcelle binée en mai		- 13	1,0 à 3,6 0,1	1,6 0,08	

* Selon le code défini dans le rapport complet : auteur-année-numéro d'essai. Les fiches détaillées de chaque essai sont consultables sur les sites internet cités en page 3.

** Un taux positif indique que la modalité testée produit moins de ruissellement que le témoin. Un taux négatif indique au contraire que la modalité testée produit plus de ruissellement que le témoin.

*** Taux de couvert de 25 à 30 %. **** Effet du taux très élevé en matière organique.

Caractéristiques des essais : largeur = 1,5 m à 2 m (= 1/2 largeur de travail) longueur = 10 m sous pluies naturelles et 5 m sous pluies simulées		Conditions expérimentales des pluies	Ruissellement sous pluies naturelles			Résultats complémentaires
Référence de l'essai *	Modalités testées		Taux de réduction / témoin**	Taux de ruissellement (moyenne annuelle)	Lame ruisselée	
		mm/h	%	%	mm	
Pomme de Terre						
ARPTHN-2002-02	Impact du tamisage	saison printemps été				On note une forte variabilité entre les répétitions et des inversions au cours de la saison. En 2002, les 1ers ruissellements sont apparus après 77 mm de pluie cumulée. Le 05/06/02 l'infiltrabilité des PDT tamisées ou non tamisées était de 4 à 7 mm/h sous pluie intense de 11 mm/h pendant 50 mn.
	Témoin : parcelle non tamisée	5 pluies significatives		33,1	25,5	
ARPTHN-2003-04	Parcelle tamisée	4 pluies significatives	43,1	18,8	14,5	L'infiltrabilité moyenne des parcelles a diminué de 28 à 15 mm/h au cours de la saison.
	Témoin : parcelle non tamisée			5,4	3,5	
ARPTHN-2004-06	Parcelle tamisée		-22,9	6,6	4,3	
	Témoin : parcelle non tamisée	5 pluies significatives		27,8	14,4	
AREAS-2005-11	Parcelle tamisée		39,6	16,8	8,7	
	Création de micro-barrages dans l'entre-butte					
AREAS-2007-16	Témoin : sans micro-barrages	pluies simulées	22 à 28			micro- barrages de 4,5 à 5,7 cm de hauteur
	Avec micro-barrages					Pluie d'imbibition : 3 mm
AREAS-2007-16	Témoin : sans micro-barrages		51 à 56			micro- barrages de 4 à 15 cm de hauteur
	Avec micro-barrages					1 mm
TCSL : Techniques Culturelles Sans Labour						
CA76-2005-09	Comparaison entre labour et non labour (± récent)					Taux de ruissellement sur une pluie :
	Blé 2004-2005 Yvetot	labour	-	0,6	0,9	mini maxi
CA76-2006-15	Blé 2005-2006 Yvetot	non labour	-73,5	1,0	1,5	0,0% 1,7%
	Blé 2005-2006 Yvetot	labour	-	1,2	2,2	0,0% 2,1%
CA76-2006-14	Mais 2006 Yvetot (témoin)	labour	-14,2	1,4	2,6	0,6% 4,1%
	Mais 2006 Yvetot (affiné + rappuyé)	non labour	-	11,4	11,1	0,3% 44,7%
CA76-2007-17	Betterave 2007 Limésy	labour	-	4,9	4,8	2,4% 22,1%
	Betterave 2007 Limésy	non labour	56,5	1,4	1,4	0,2% 4,6%
CA76-2008-18	Blé 2007-2008 Limésy	labour	-	2,1	0,9	0,0% 3,1%
	Blé 2007-2008 Limésy	non labour	-55,6	3,3	1,4	0,4% 4,3%
CA76-2008-19	Mais 2008 Valliquerville	labour	-	2,8	4,0	3,0% 3,7%
	Mais 2008 Valliquerville	non labour	62,5	1,0	1,5	0,2% 15,4%
CA76-2009-22	Mais 2009 Valliquerville	labour	-	0,0	0,0	0,2% 7,0%
	Mais 2009 Valliquerville	non labour	-	0,1	0,1	0,0% 0,1%
CA76-2010-23	Blé 2009-2010 Valliquerville	labour	-	1,0	0,2	0,1% 0,2%
	Blé 2009-2010 Valliquerville	non labour	-50,0	0,8	0,3	0,4% 0,9%
CA76-2008-20	Mais 2008 Tourville	labour	-	1,0	0,5	0,1% 1,6%
	Mais 2008 Tourville	non labour	20,0	0,8	0,4	0,1% 2,5%
CA76-2009-21	Blé 2008-2009 Tourville	labour	-	10,4	6,5	0,1% 1,3%
	Blé 2008-2009 Tourville	non labour	75,4	2,6	1,6	0,1% 12,0%
CA76-2010-24	Lin 2010 Tourville	labour	-	5,1	2,9	1,9% 3,0%
	Lin 2010 Tourville	non labour	-62,1	8,2	4,7	1,0% 10,1%
AREAS-2006-14	Comparaison labour et non labour en simulation de pluie sur maïs	pluies simulées	0,0	0,3	0,1	0,0% 0,5%
	Témoin : labour Pluie N°1 : après 60 mm					0,1% 0,3%
AREAS-2007-15	Non labour Pluie N°1 : après 60 mm					0,1% 0,2%
	Témoin : labour Pluie N°2 : après 40 mm					0,4% 0,9%
AREAS-2007-15	Non labour Pluie N°2 : après 40 mm					0,1% 1,6%
	Labour (sol très riche en MO) Pluie N°1 : après 30 mm					0,1% 2,5%
AREAS-2009-18	Témoin : labour Pluie N°1 : après 30 mm					0,1% 1,3%
	Non labour Pluie N°1 : après 30 mm					0,1% 12,0%
AREAS-2009-18	Labour (sol très riche en MO) Pluie N°2 : après 25 mm					1,9% 3,0%
	Témoin : labour Pluie N°2 : après 25 mm					1,0% 10,1%
AREAS-2009-18	Non labour Pluie N°2 : après 25 mm					0,3% 17,4%
	Témoin : non labour sans décompactage Pluie N°1 : après 20 mm					0,0% 0,5%
AREAS-2009-18	Non labour avec décompactage Pluie N°1 : après 20 mm					0,1% 0,3%
	Témoin : non labour sans décompactage Pluie N°2 : après 20 mm					0,1% 0,3%
AREAS-2009-18	Non labour avec décompactage Pluie N°2 : après 20 mm					0,1% 0,3%
						0,1% 0,3%

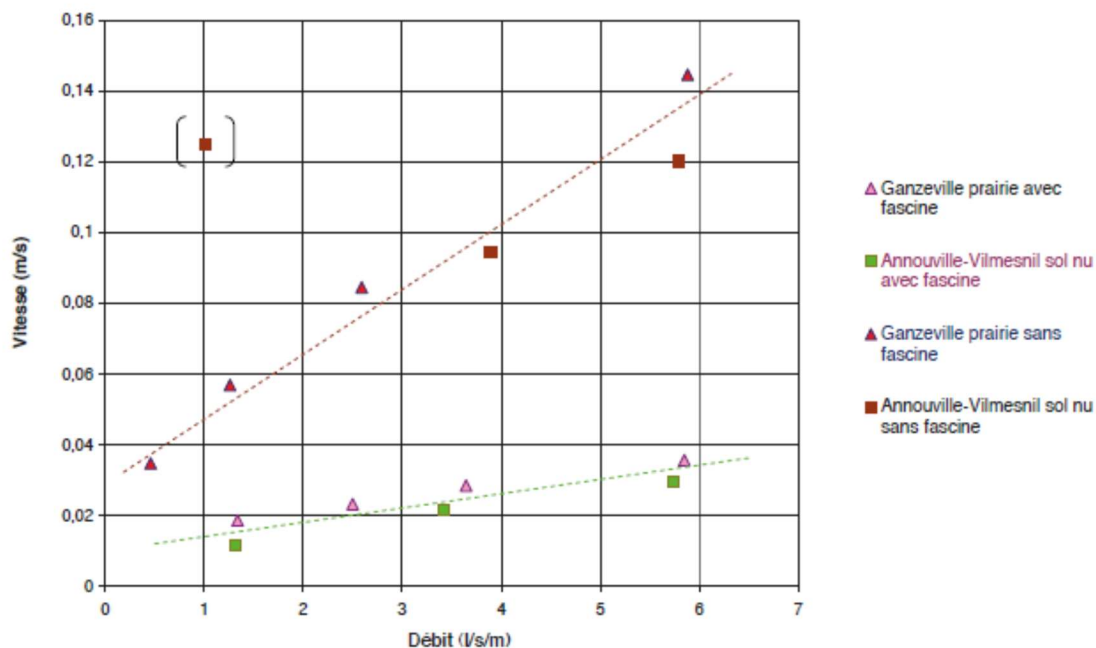
* Selon le code défini dans le rapport complet : auteur-année-numéro d'essai. Les fiches détaillées de chaque essai sont consultables sur les sites internet cités en page 3.

** Un taux positif indique que la modalité testée produit moins de ruissellement que le témoin. Un taux négatif indique au contraire que la modalité testée produit plus de ruissellement que le témoin.

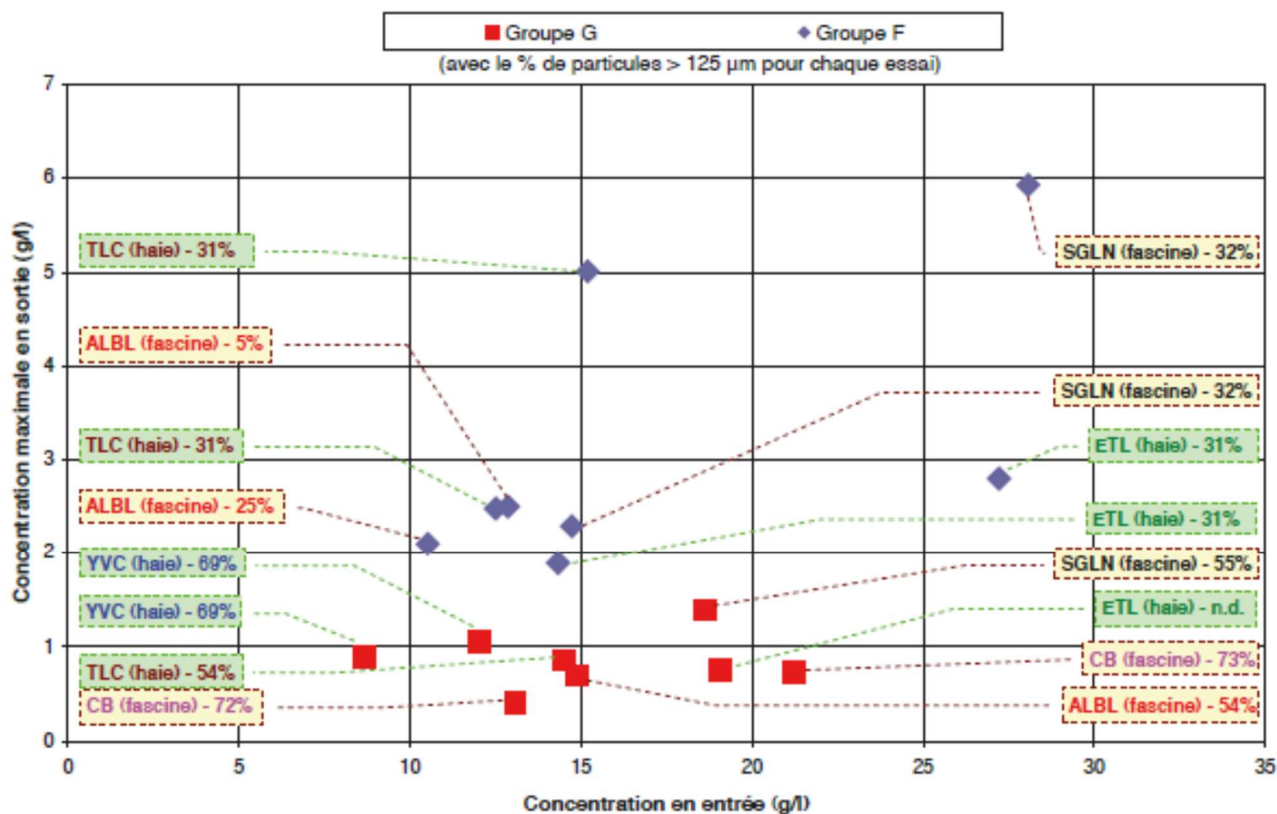
*** Taux de couvert de 25 à 30 %. **** Effet du taux très élevé en matière organique.

► **Tableau 1 : Principaux résultats d'efficacité des pratiques culturales sur la réduction des ruissellements**

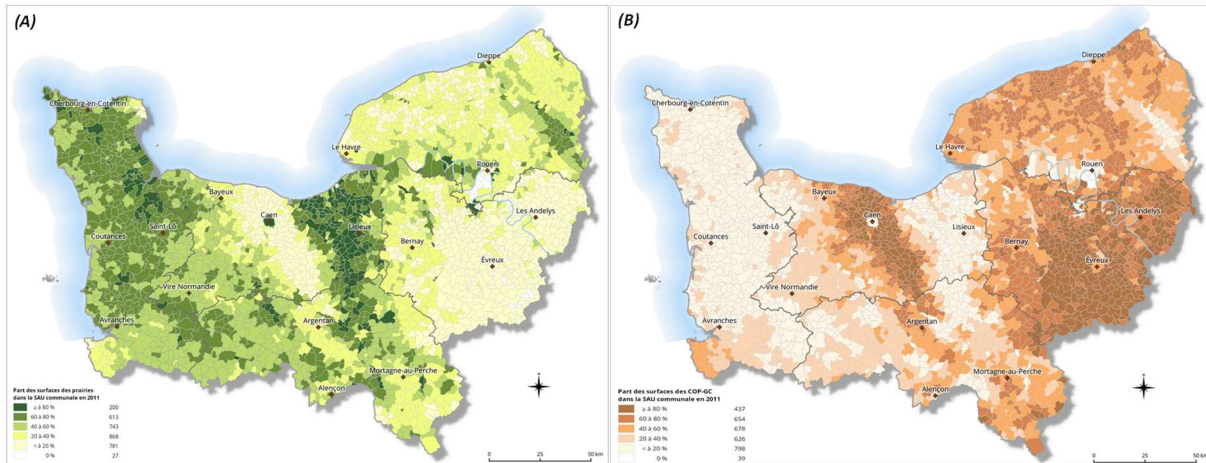
Annexe 7.1: Comparaison des vitesses d'écoulement (m/s) dans un chenal avec et sans fascine en fonction du débit (l/s/ml) (AREAS 2012)



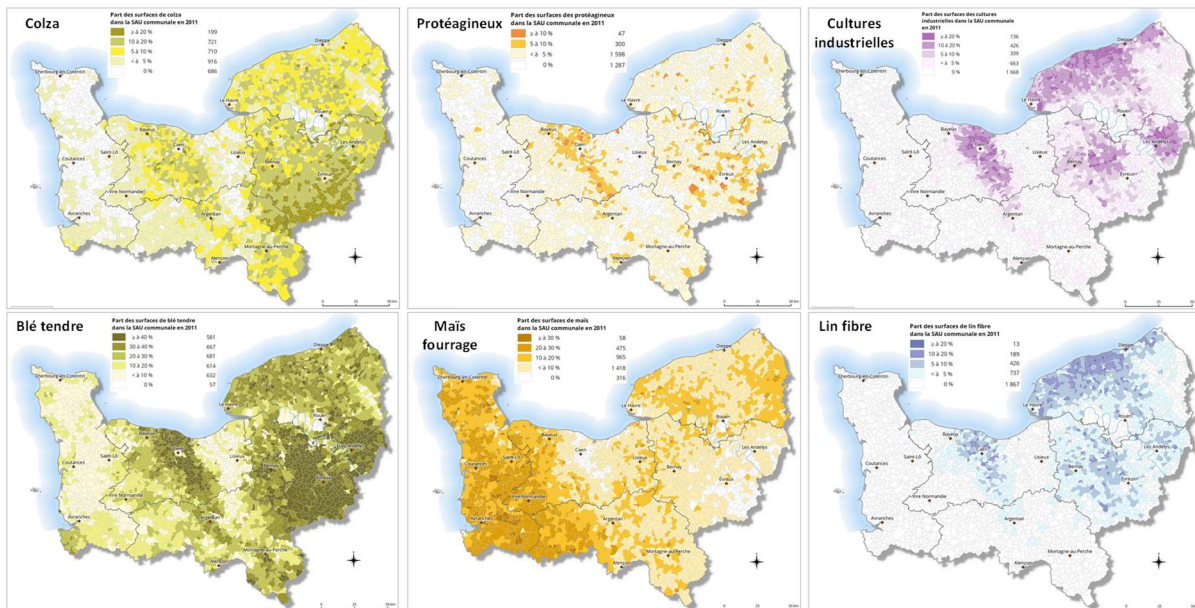
Annexe 7.2 : Concentration instantanée maximale en MES (g) en sortie de fascine et haies en fonction de la concentration entrante (g/l) dans le chenal pour des matériaux injectés de taille supérieur à 125µm.



Annexe 8.1 : Part des surfaces (A) des prairies et (B) de céréales, oléagineux, protéagineux (COP) et autres grandes cultures (GC) par commune en Normandie en 2011 (<http://draaf.normandie.agriculture.gouv.fr>)

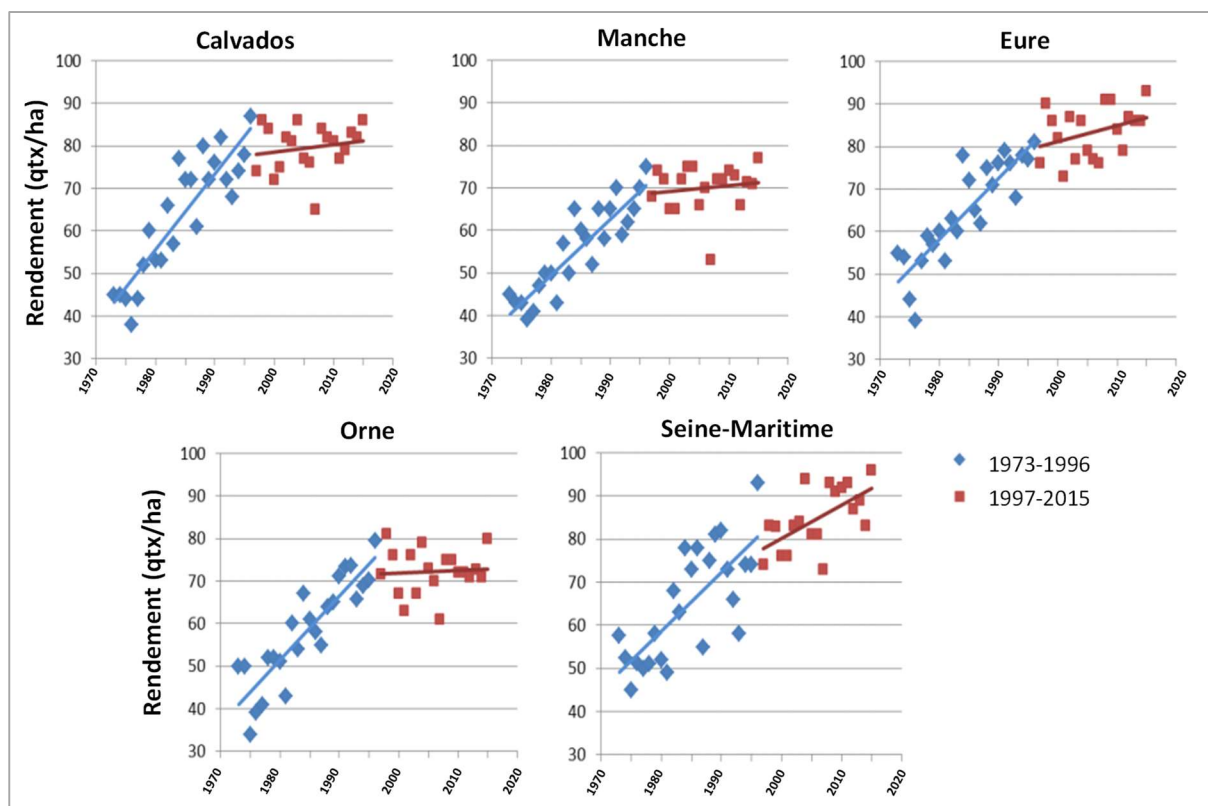


Annexe 8.2 : Part des surfaces des principales grandes cultures (colza, blé, protéagineux, maïs ensilage et grain) et cultures historiques locales (lin fibre, cultures industrielles) par commune en Normandie en 2011 (<http://draaf.normandie.agriculture.gouv.fr>)

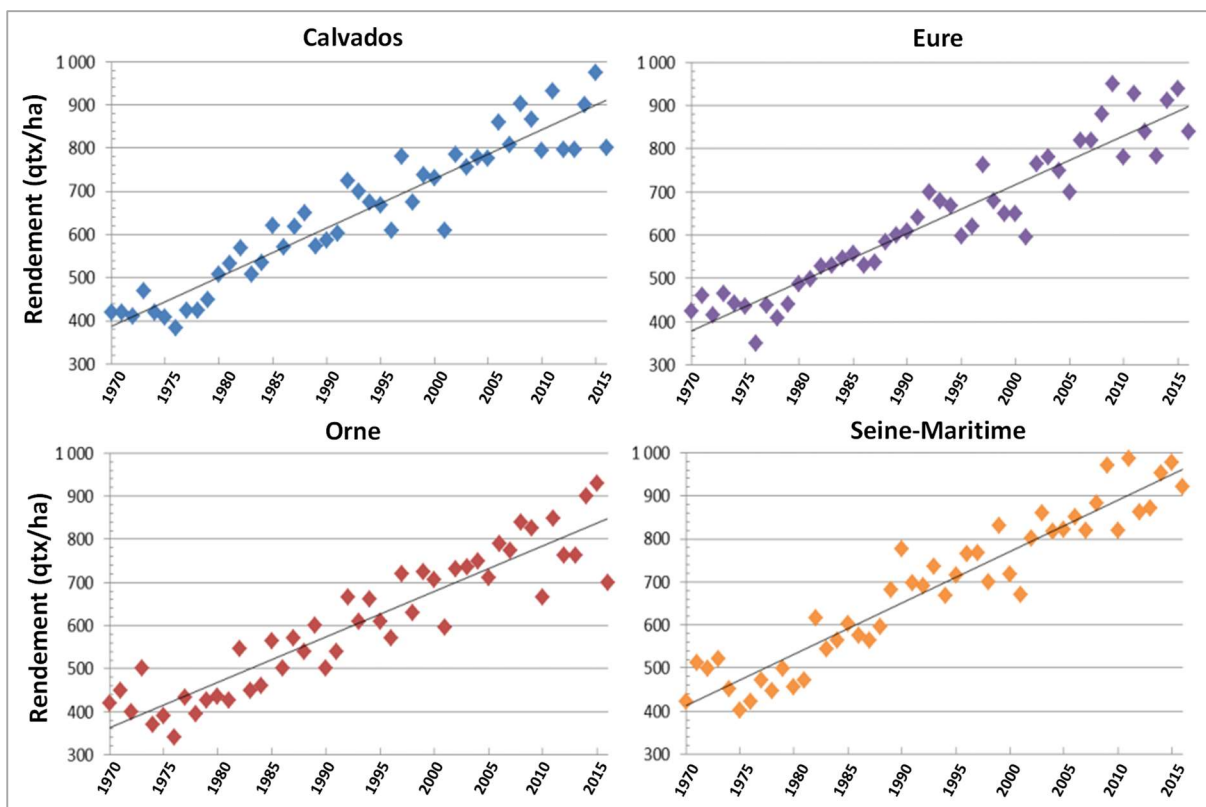


Annexes 9a-e : d'après le projet ORACLE (Diomard I. et Chéron E., Chambre Régionale d'Agriculture Normandie, Edition 2020)

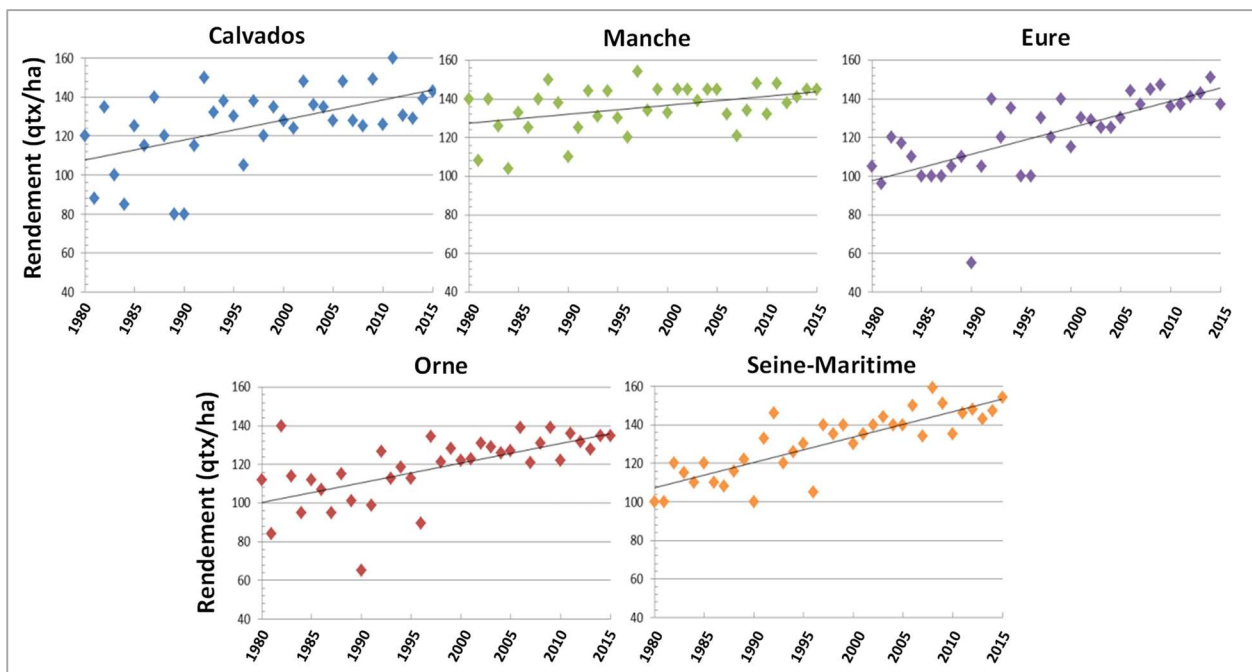
Annexe 9a : Evolutions des rendements en blé tendre dans les 5 départements de 1973 à 2015.



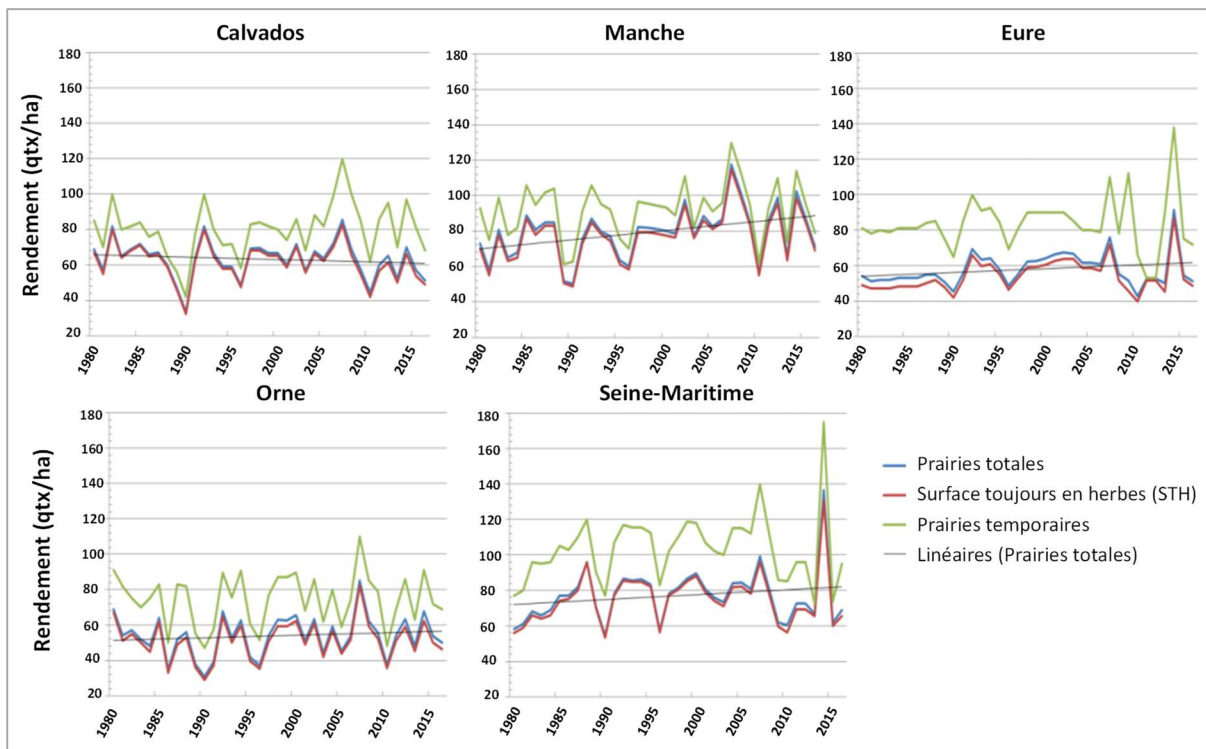
Annexe 9b : Evolutions des rendements en betterave dans 4 départements de 1970 à 2016
(Pas de données suffisamment complètes dans la Manche)



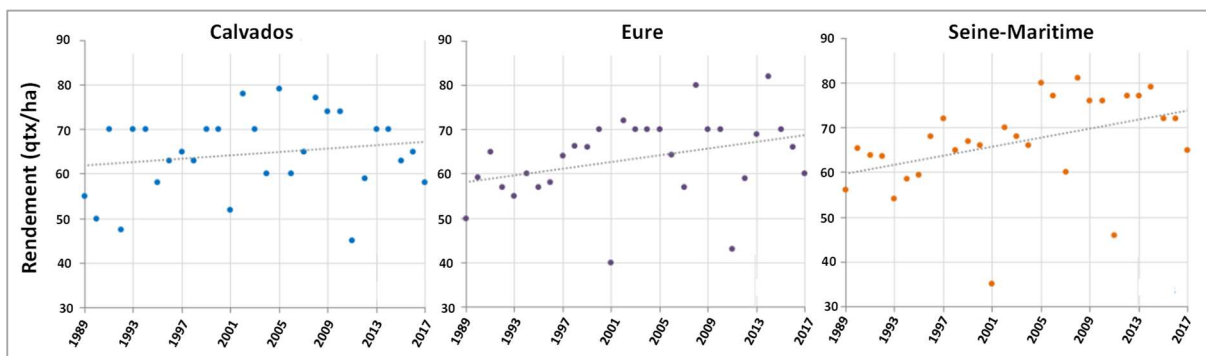
Annexe 9c : Evolutions des rendements en maïs ensilage dans les 5 départements de 1980 à 2015



Annexe 9d : Evolutions des rendements des prairies dans les 5 départements de 1980 à 2016.



Annexe 9e : Evolutions des rendements en lin textile dans les 3 principaux départements producteurs de 1980 à 2017 : Calvados (Plaine de Caen), Eure (plateaux de Saint André et du Neubourg, Pays d'Ouche) et Seine-Maritime (Pays de Caux).



Indicateurs	Trajectoires (1959-2015)	Impacts sur les productions	Actions proposées
Nombre de jours échaudants du 1 ^{er} avril au 30 juin	Augmentation ¹⁶ dans le Calvados, l'Eure, la Seine-Maritime	Défaut de remplissage des grains (céréales) Ralentissement croissance de pousse de l'herbe	Stratégie d'esquive : modifications des dates de semis, choix de variétés précoces, d'espèces prairiales plus résistantes au stress thermique
Nombre de jours de gel du 1 ^{er} mars au 30 avril	Diminution dans le Calvados, l'Eure, la Manche	Risques de brûlures sur les bourgeons floraux des espèces arboricoles (période sensible) Risques de gel lors de la levée pour le maïs	
Déficit hydrique (DH) climatique du 1 ^{er} avril au 30 septembre	Augmentation du DH dans la Manche due à une plus forte évapotranspiration (stabilité de la pluviométrie) Tendance à la hausse plus marquée en Basse-Normandie Forte variabilité interannuelle	Incidences sur la quantité de production Incidence sur la qualité : positive (hausse de la teneur en sucres solubles) ou négative (chute de la teneur en azote) Risque pour les vergers pendant la phase de formation/maturation des fruits	Recours accru à l'irrigation des vergers. Irrigation envisagée pour des cultures actuellement peu ou non irriguées en Normandie, notamment les fourrages
Pluies efficaces (infiltration et ruissellement) du 1 ^{er} octobre au 31 mars	Forte variabilité interannuelle du fait de l'hétérogénéité des précipitations	Pas de corrélation possible du fait de la forte variabilité interannuelle	Pas de conclusion sur la capacité de recharge hivernale des nappes
Episodes pluvieux intenses (>10mm ou >20mm cumulés par jour) du 1 ^{er} avril au 15 novembre	Aucune tendance générale pour la Normandie démontrée Seule la hausse constatée en Seine-Maritime est notable, et est plus importante pour des pluies supérieures à 10mm. Les risques liés aux fortes pluies sont donc de plus en plus importants en Seine-Maritime (déjà fortement touché par le phénomène d'érosion)	Impacts directs : mauvaise implantation (dégradation du semis), accentuation de la verse des cultures annuelles, dégradation des plantes en développement Impacts indirects : augmentation de l'érosion, création d'une pression mécanique par le gel avec stagnation de l'eau, perturbation des interventions culturales.	Prise en compte de l'intensité des épisodes comme indicateur complémentaire, ainsi que d'autres événements météorologiques extrêmes (vents violents, grêle) pour mieux évaluer les risques sur les cultures et proposer des actions.
Nombre de jours pluvieux pendant les moissons (juillet et août)	Hausse significative, plus importante dans la Manche Forte variabilité interannuelle Modification de la répartition des pluies qui se sont davantage étalées dans le temps en été	Remise en question l'organisation des récoltes Retard des récoltes du fait d'un degré d'humidité plus élevé des grains (céréales, pois, colza...) Retard des récoltes du fait de l'inaccessibilité aux champs par les engins agricoles (problème de programmation des moissons)	Nécessité de ré-organiser l'itinéraire technique ou d'adapter le matériel pour une plus grande rapidité car le nombre de jours possibles pour les travaux céréaliers est réduit
Degrés-jours de croissance du maïs (semis-floraison)	Cumul des températures en constante augmentation, induisant un raccourcissement du passage entre le stade du semis et de la floraison femelle	Avancée des dates de floraison et donc avancée probable des récoltes	Choix de variétés plus tardives (plus productives) mais un avancement trop important des stades peut conduire à un décalage des stades sensibles vers les mois les plus chauds et secs, ce qui pourrait impacter les rendements
Bilan hydrique pendant la période de sensibilité du maïs	Pas de tendance significative du fait du cumul des précipitations très variables d'une année à l'autre	Dans des situations de bilan faible ou négatif : défaut de pollinisation et de remplissage des grains	Réflexion sur des solutions telles que l'esquive (via changement de variétés et avancée des dates de semis) probablement accompagnée d'apport en eau supplémentaire (irrigation).
Condition climatique favorable au Carpocapse (ver de la pomme)	Hausse de la quantité de chaleur requise pour le développement du ravageur (Seine-Maritime, Calvados, Orne)	Apparition plus précoce et augmentation du nombre de cycles par an Modification des aires de répartition	Surveiller davantage et lutter contre le carpocapse
Faisabilité du soja	Hausse de la quantité de chaleur entre 1 ^{er} mai et 15 octobre (semis à maturité) depuis 50 ans. Quantité suffisante depuis 20 ans pour la culture de variétés précoces (000) pour 9 années sur 10 en moyenne.	Possibilité de cultiver le soja en Normandie depuis 20 ans	Réflexion sur le choix des variétés (plus ou moins précoces selon les différences thermiques entre départements) Nécessité de prendre en compte des besoins hydriques par un indicateur complémentaire

¹⁶ L'augmentation (ou diminution) est significative lorsque la certitude de la tendance est >95%

Indicateurs	Trajectoires (1959-2015)	Impacts sur les productions	Actions proposées
Faisabilité du lupin d'hiver	Hausse de la quantité de chaleur entre le 10 Septembre et le 31 Août (semis à maturité)	Possibilité de cultiver le lupin d'hiver en Normandie	
Date de mise à l'herbe (Date à partir de laquelle 300 degrés jours sont cumulés depuis le 1 ^{er} février)	Situation quasi-homogène en Normandie avec une légère avancée de la date de mise à l'herbe pour tous les départements sauf l'Orne (entre -1 et 2 jours/an)	Possibilité de mettre en pâture plus tôt pour utiliser l'herbe disponible	Nécessité de mettre en place un indicateur lié à la portance des sols
Fréquence des précipitations pendant la période de fanage (nombre de périodes de plus de 4 jours sans pluies du 15 Avril au 15 Juin)	Diminution significative pour le Calvados, la Manche et l'Orne. Durée moyenne des épisodes non pluvieux en baisse	Pour ces départements, le nombre de créneaux disponibles pour le fanage est en nette diminution. Moindre qualité du fourrage si le fanage est réalisé sur du foin trop humide et dans l'impossibilité de le faire sécher à l'air libre	Incitation à faire du foin plus précocement (dès qu'il est prêt à être fauché) du fait de la rareté des créneaux aptes au fanage. Réflexion sur les modes de conservation de l'herbe autres que le foin
Développement de la pyrale du maïs (Somme des températures moyennes journalières en base 10 écartées à 35°C du 1 ^{er} mars au 15 Juillet)	Augmentation significative de la quantité de chaleur disponible pour la pyrale du maïs dans les 3 départements analysés (Calvados, Orne, Seine-Maritime). Davantage marquée pour la Seine Maritime et l'Orne. Forte variabilité interannuelle	Risques de cumuls de température assez élevé pour permettre l'apparition d'une deuxième génération de pyrale Modification des aires de répartition En cas d'attaque : forage des tiges et épis à l'origine de pertes de rendements. Les blessures causées provoquent une multiplication de la fusariose des épis	Surveiller davantage et lutter contre la pyrale
Condition climatique favorable au puceron d'automne sur blé (Somme des températures moyennes journalières en base 3°C écartées à 25°C du 1 ^{er} septembre au 15 décembre)	Augmentation significative de la quantité de chaleur favorable au développement du puceron de début septembre à la mi-décembre pour les 3 départements analysés (Calvados, Orne, Seine-Maritime). Davantage marquée pour le Calvados et la Seine-Maritime.	Risque de transmission de la jaunisse nanisante Risque de multiplication plus rapide (reproduction parthénogénétique au détriment de la reproduction sexuée)	Choix de dates de semis, de variétés pour réduire les risques, surveillance des pucerons et traitement si nécessaire
Faisabilité de la récolte précoce de l'herbe (Date de franchissement de la somme des T°C base 0 de 700°CJ à compter du 1 ^{er} février)	Légère avancée de la date de récolte de l'herbe pour la Seine-Maritime (en avance de 19 jours) et l'Orne (en avance de 8 jours) mais pas pour le Calvados.	Compromis entre un ensilage tôt pour valeur alimentaire élevée et plus tardif pour un meilleur rendement : l'avancement de la période de fauche va diminuer la production	Le fauchage d'une herbe « jeune » oblige à la conserver dans un silo. Possible allongement de la période de production en herbe avec une récolte plus précoce
Faisabilité de la récolte tardive de l'herbe en zone humide (Date de franchissement de la somme des T°C base 0 de 1200°CJ à compter du 1 ^{er} février, qui marquent l'épiaison)	Légère avancée de la date théorique de récolte de l'herbe sur prairies assez tardives pour la Seine-Maritime et l'Orne mais pas pour le Calvados	Avancement en adéquation avec la hausse des températures impliquant une récolte plus précoce de l'herbe dans ces secteurs humides pour maintenir qualité et rendement.	Récolte en zone humide plus tôt, en prenant également en compte les cumuls pluviométriques et l'état des sols. Forte hétérogénéité qui rend difficile de fixer une date (telle que contractualisés dans les contrats MAEC qui promeuvent l'utilisation de l'herbe pour le pâturage et la production de foin en zones humides)
Impact des températures sur le ralentissement de la pousse de l'herbe (Nombre de jours où la température maximale est supérieure à 25°C du 1 ^{er} juin au 15 juillet)	Pas d'évolution significative du nombre de jours supérieurs à 25°C du 1 ^{er} juin au 15 juillet, en raison d'une forte hétérogénéité spatiale et interannuelle	Diminution probable de la pousse de l'herbe et implique une diminution de rendement en lien avec des températures élevées Le creux estival peut certaines années commencer plus tôt Cette période est propice au sur semis pour améliorer la diversité floristique mais si la période est trop chaude, cette pratique est compromise	Choix ou sur semis d'espèces prairiales plus résistantes au stress thermique (fétuque par exemple), semis de prairies multi-espèces en prairie temporaire.

Annexe 10: Synthèse de l'évolution des indicateurs agro-climatiques sur la période 1959-2015, impact de leur variation sur les cultures et actions d'adaptation envisagées (source : ORACLE, 2020)

Remerciements

Pôle Études et Diffusion sous la direction de M. Paillette, au sein du service régional de l'information statistique et économique de la DRAAF Normandie.

Références bibliographiques

- AREAS, Chambres d'Agriculture de Seine-Maritime et de l'Eure, 2008. Erosion, turbidité, inondation : un large champ de solutions pour les agriculteurs : 20 Fiches techniques consultables sur le site Internet de l'AREAS et des Chambres d'Agriculture de l'Eure et de la Seine-Maritime.
- AREAS - Programme Pesticeros 2019, Programme de suivi de la qualité des eaux de ruissellement à l'échelle du bassin versant rural de Bourville en Pays de Caux, dans un contexte érosif en zone de grandes cultures. Rapport de fin de programme. Edt AREAS. 164p.
- ATLAS AGRICOLE DE NORMANDIE, Agreste Normandie, édition 2018
- ATLAS AGRICOLE DE NORMANDIE, Agreste Normandie, édition 2015
- BEAUVAIS F., CANTAT O., MADELINE P., LE GOUÉE P., BRUNEL-MUGUET S., MEDJKANE M., 2019. Quelles conséquences du changement climatique sur le blé tendre en Normandie aux horizons 2050 et 2100 ? Étude d'impact prospective à partir du modèle ALADIN-Climat, *Climatologie*, 129-160 <https://doi.org/10.4267/climatologie.1414>
- BOIFFIN J., 1984. La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse de docteur ingénieur. INAPG. 320 pp. + annexes.
- BOIFFIN J., PAPY F., 1988. Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. II.- Evaluation des possibilités de maîtrise du phénomène dans les exploitations agricoles. *Agronomie* 8 (9) : 745-756.
- BOIFFIN J., LAURENT, F., RICHARD G., 2020 : Réussir l'implantation des cultures. Enjeux agroécologiques, itinéraires techniques. Coéd. Quae, Arvalis Institut du végétal, 440p. Chapitre 8 : BENOIT P, BRUCKLER L, CIURARU R, GERNEMONT S, OUVRY J-F, PELOSI C, RECOURS S, : Implantation des cultures et gestion de l'Environnement. 26p.
- CEN 2018 : Référentiel Régional Pédologique de Haute Normandie ; notice et cartographie, CEN.
- DABNEY S.M., MEYER L.D., HARMON W.C., ALONSO C.V., FOSTER G.R., 1995. Depositional patterns of sediment trapped by grass hedges. *Transactions, American Society of Agricultural Engineers*, 38:1719-1729.
- DELAHAYE D., GASCUEL C., (2013), *Ecosystèmes continentaux aquatiques et terrestres*, In Mérot Ph., Dubreuil V., Delahaye D et Desnos Ph. (Eds). Le climat change dans le Grand Ouest, Evaluation, Impacts, Perceptions. Presses Universitaires de Rennes, 251-264
- DELAHAYE D., (2008), *Modelling the watershed as a Complex Spatial System: A review*. in Modeling Process in Geography, sous la direction Yves Guermond, Wiley ed. pp. 191-213
- GEVES. (Janvier 2018). Lin fibre – Nouvelles variétés proposées à l'inscription sur la liste A du catalogue officiel français. 12 pages. https://www.geves.fr/wpcontent/uploads/Resultats-VATE_lin_2017.pdf
- KERVROEDAN L. 2018, Effet des traits et de la diversité fonctionnelle sur le ruissellement et la rétention des sédiments. Application pour le contrôle de l'érosion des sols dans les bassins versants agricoles tempérés. Thèse Univ de Picardie, 255p
- LE BISSONNAIS Y., BENKHADRA H., CHAPLOT V., FOX D., KING D. et DAROUSSIN J., 1998. Crusting, runoff and sheet erosion on silty loamy soils at various scales and upscaling from m² to small catchments. *Soil and Tillage Research*, 46 : 69-80.
- MÉROT PH., DUBREUIL V., DELAHAYE D., DESNOS PH., 2013, Changement climatique dans l'ouest, évaluation, impacts, perceptions. Collection espace et territoires, Presses Universitaires de Rennes. 458 p, [ISBN 978-2-7535-2146-9]
- LANDEMAINE, V. (2016) : Érosion des sols et transferts sédimentaires sur les bassins versants de l'Ouest du Bassin de Paris : analyse, quantification et modélisation à l'échelle pluriannuelle. Université de Rouen Normandie. 234p.
- LE GOUÉE P. 2016 : Référentiel Régional Pédologique de Basse-Normandie. France. (medihal-01535658)
- LE GOUÉE P., DELAHAYE D., BERMOND 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, 30, 887-901
- ORACLE Normandie, Observatoire Régional sur l'Agriculture et le Changement Climatique, Chambre Régionale d'Agriculture Normandie, édition 2020

- OUVRY J-F., 1989-1990. – Effet des techniques culturales sur la susceptibilité des terrains à l'érosion par ruissellement concentré – Expérience du Pays de Caux. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXV, n° 1-2, pp.157-169.
- OUVRY J-F, COUFORIER N., RICHET J-B, LHERITEAU M, PIVAIN Y, MARTIN P., LOMTE V., BARRIER C., WITKOWSKI D., SAINT-OMER L., CORRUBLE C., LUCE M.(2012). Maîtrise du ruissellement et de l'érosion des sols en Haute Normandie. Expérimentations sur les pratiques culturales 2001-2010. Synthèse des travaux. Groupe Maîtrise du ruissellement par les pratiques culturales. 36 p.
- OUVRY J-F., RICHET J-B., BRICARD O., LHERITEAU M., BOUZID M., SAUNIER M. 2012 : Fascines et Haies pour réduire les effets du ruissellement érosif. Caractérisation de l'efficacité et conditions d'utilisation. Edt AREAS Brochure 68p.
- OUVRY J-F, SAUNIER M, COUFORIER N., RICHET J-B., 2016 : Résultats des Mesures de ruissellement et d'érosion diffuse sur blé d'hiver en semis sans labour versus en semis sur labour. Expérimentations sous simulation de pluie réalisées en Pays de Caux, Rapport détaillé AREAS. 85p.
- OUVRY J-F, SAUNIER M, COUFORIER N., 2018 : Résultats des Mesures de ruissellement et d'érosion diffuse sur betteravessucrières en semis sans labour versus en semis sur labour. Expérimentations sous simulation de pluie réalisées en Pays de Caux, Rapport détaillé AREAS. 72p.
- RAPPORT AGRISCOPIE « Panorama de l'agriculture et de l'agroalimentaire en Normandie » données 2017-2018, CRAN, édition 2019
- REULIER R., DELAHAYE D., VIEL V., 2018, Agricultural landscape evolution and structural connectivity to the river for matter flux, a multi-agents simulation approach. Catena, Volume 174, March 2019, Pages 524-535
- RICHET J-B., Kervroëdan L, Saunier M, Ouvry J-F., 2020 : La haie herbacée antiérosive. Une zone tampon durable et efficace pour la rétention des particules. Érosion hydrique et trame verte. Edt AREAS. Brochure 60p.
- SEGUIN B. 2010, Le changement climatique : conséquences pour les végétaux, *Quaderni*, 71 , 27-40
- Stocker du carbone dans les sols français - Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? Synthèse de l'étude, INRA Science & Impact, 2019
- PATAULT, E., LEDUN, J, LANDEMAINE, V, SOULIGNAC, A, RICHET, J-B., FOURNIER, M., RINAUDO, J-D., OUVRY, J-F., CERDAN, O, LAIGNEL, B. (2020). Evaluation de l'efficacité des politiques publiques pour les actions visant à réduire les impacts du ruissellement et de l'érosion en Haute Normandie. Rapport final. Université de Rouen Normandie- AREAS – BRGM, 356p.
- VIEL V., DELAHAYE D., REULIER R., (2014), Evaluation of slopes delivery to catchment sediment budget for a low-energy water system: A case study from the Lingèvres catchment (Normandy, western France). *Geografiska Annaler Series A Physical Geography*, 96(4), 497-511
- Sites internet : AREAS : <http://www.areas-asso.fr/ressources/>
- ONEMA : <http://zonestampons.onema.fr/>