

GIEC normand
L'eau : Disponibilité, qualité, risques naturels

Auteurs : Benoit Laignel (Université de Rouen Normandie), Frédéric Gresselin (DREAL),
Julien Deloffre (Université de Rouen Normandie)
Contributeurs : Agence de l'eau, BRGM, GIP Seine Aval

Introduction

A l'échelle globale, les travaux de l'IPCC/GIEC (2007, 2013, 2014) montrent clairement que le changement climatique perturbe et continuera de perturber le cycle de l'eau, au travers de l'élévation de la température et de l'augmentation de l'évaporation, de la fonte des glaciers de montagne et des calottes glaciaires, de l'augmentation du contraste des précipitations entre grandes zones climatiques, de l'augmentation des événements extrêmes de type précipitations intenses, crues, tempêtes et inondations et des canicules et des sécheresses. Ainsi, les projections indiquent une augmentation des inégalités dans la répartition des ressources en eau, avec davantage d'eau sur les zones de hautes latitudes et une diminution de la ressource sur les zones tropicales et méditerranéennes. A ce changement climatique, s'ajoute la pression anthropique avec une augmentation des prélèvements en eau pour les activités agricoles et industrielles et les besoins domestiques, ainsi que des rejets plus nombreux qui dégraderont la qualité des eaux.

La Normandie n'échappe pas à ce constat, avec une pression anthropique et climatique sur la ressource en eau de surface et souterraine qui existe déjà et va s'accroître dans les prochaines décennies. Selon les travaux de Cantat et al. (2020), à l'échelle de la Normandie, le changement climatique se marque déjà par une augmentation de la température atmosphérique de l'ordre de +0,6 à +0,8°C pour la période 1981-2010 comparée à la période de référence 1951-1980 (et de + 1,2 à +2°C à partir des tendances linéaires de 1970 à 2019), un nombre de jours de chaleur (valeur maximale supérieure ou égale à 25°C) en nette augmentation, une réduction du nombre de jours de gel, de neige et de brouillard et une élévation du niveau marin depuis 1960 en moyenne de +2,2 mm +/-0,1 mm par an. Les projections à l'horizon 2100 montrent :

- une élévation de la température atmosphérique moyenne annuelle en Normandie qui pourrait être contenue à environ +1°C en cas d'application immédiate de l'accord de Paris visant à réduire la quantité de gaz à effet de serre (scénario RCP 2.6), alors que sans politique climatique internationale (scénario RCP 8.5) elle pourrait dépasser +4°C ;
- une diminution des précipitations moyennes annuelles dans le cas du scénario le plus pessimiste (RCP 8.5) qui pourrait atteindre -10% en moyenne sur l'ensemble du territoire normand et jusqu'à -15% dans certaines zones de celui-ci, et une certaine stabilité dans le cas du scénario optimiste RCP 2.6 qui n'est malheureusement pas réaliste aujourd'hui au vu des émissions de gaz à effet de serre ;
- un nombre de jours de forte chaleur (T° supérieure ou égale à 30°C) qui pourrait atteindre 30 à 40 jours à l'intérieur des terres pour le scénario pessimiste RCP 8.5 ;
- une augmentation progressive des sécheresses atmosphériques et de leur durée sur l'ensemble des scénarios. Le phénomène est particulièrement prononcé en cas d'absence de politique climatique internationale (RCP 8.5), avec un allongement moyen supérieur à 1 semaine à l'horizon 2100 ;
- des précipitations intenses (cumul dépassant 20 mm par jour, soit 20 litres/m²) qui pourraient rester stables, voire légèrement augmenter de +2 % dans le cas du scénario optimiste RCP 2.6 (mais peu réaliste actuellement), mais aussi fortement augmenter de +4 à +10% dans le cas du scénario le plus pessimiste (RCP 8.5) ;
- une élévation du niveau moyen de la mer entre +0,26 cm et +1,1 m.

Ces changements climatiques ne sont et ne seront pas sans conséquences sur la ressource en eau et c'est ce que nous proposons de synthétiser et présenter dans ce document, sur la base des données et des études disponibles.

Après avoir fait quelques rappels sur l'utilisation de la ressource en eau par l'homme, ce document s'articulera en 3 parties consacrées à : 1) l'impact du changement climatique sur l'évolution quantitative des ressources en eau de surface et souterraine, (2) l'impact du changement climatique sur la qualité de l'eau, (3) les aléas naturels, crues et inondations.

Quelques rappels sur l'utilisation de la ressource en eau par l'homme à l'échelle mondiale et de la Normandie

Le changement climatique aura des conséquences sur la qualité et la quantité d'eau disponible pour les usages de l'homme (Fig. R1).

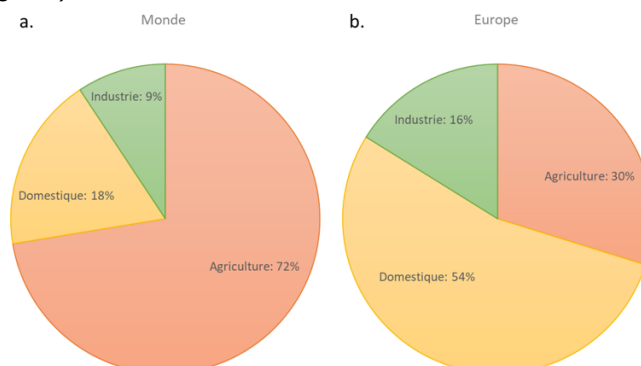


Figure R1 : Les usages de l'eau a. dans le monde et b. en Europe en 2010 (modifié de Burek et al, 2016).

A l'échelle mondiale, le GIEC (2014) souligne que l'accroissement de l'activité économique humaine (Fig. R2 : exemple du secteur de l'industrie) contribuera à une augmentation de la demande et une importante diminution des ressources en eau (avec un taux de sollicitation de 88% des ressources mondiales en eau douce). De plus, la concentration de plus en plus forte de la population dans les villes (70% de la population sera concentrée dans les villes en 2050) conduira à une urbanisation croissante au détriment des terres agricoles et des écosystèmes, et multipliera donc les besoins en eau et en infrastructures de traitement.

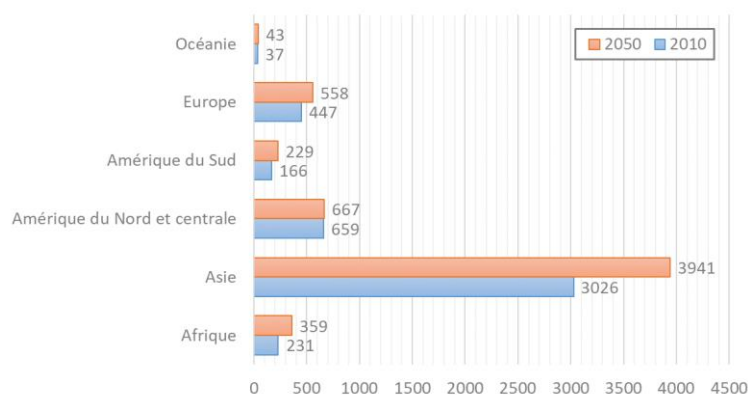


Figure R2 : La demande en eau en km³ par an du secteur de l'industrie, par continent, 2010 et 2050 suivant un scénario médian (modifié de Burek et al., 2016).

En Normandie, les prélèvements en eau représentent environ 6% de l'ensemble des prélèvements de la France, ce qui représente environ 57 km³ d'eau selon les données 2018 disponibles (<https://bnpe.eaufrance.fr/> ; données basées sur la gestion des redevances par les agences et offices de l'eau). En excluant les prélèvements d'eau liée à l'énergie et aux eaux turbinées, les usages des eaux prélevées (0,56km³) correspondent essentiellement à l'alimentation en eau potable (46,7%) et aux activités industrielles et économiques (45,2%, Fig. R3). Le reliquat se répartit entre l'irrigation et les canaux. Pour faire face à ces besoins, l'eau est prélevée pour moitié dans les nappes souterraines, (50,1%), l'autre moitié se répartissant entre les eaux de surfaces (18,7%) et les eaux littorales (31,2%).

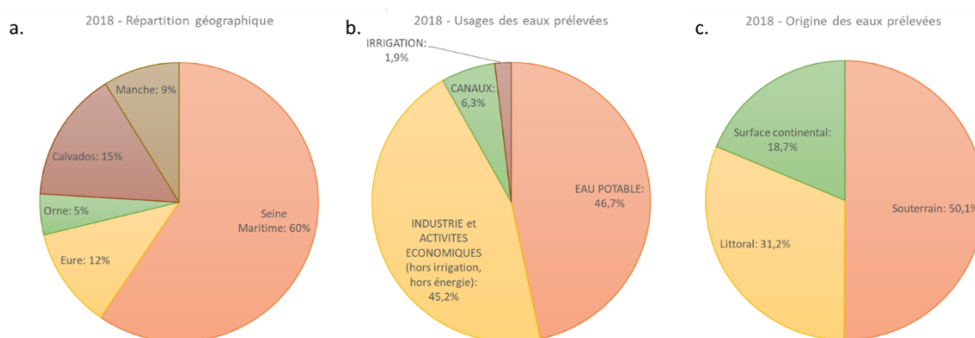


Figure R3 : Utilisation de l'eau par l'homme en Normandie ; a. Répartition par départements ; b. répartition des usages de l'eau ; c. l'origine des eaux prélevées. (Données : <https://bnpe.eaufrance.fr/>).

1. Impact du changement climatique sur l'évolution quantitative des ressources en eau

1.1. Eaux de surface

a. Evolution des rivières normandes au cours des dernières décennies

L'analyse des chroniques de débits de 25 rivières régulièrement réparties sur l'ensemble du territoire normand, sur une période de 20 années, de 1999 à 2020, montre des tendances linéaires avec des coefficients de régression systématiquement négatifs qui traduisent une diminution, pouvant être légère à relativement forte pour les bassins versants dont la superficie est la plus grande (Tabl. 1 ; Gouault et al., 2020). Cependant, les tests statistiques de ces tendances ne sont pas toujours significatifs pour certaines rivières.

Cette diminution ne s'explique pas par les précipitations qui ne montrent pas de tendance linéaire significative (Cantat et al., 2020). L'augmentation de la température et de l'évaporation, ainsi que les prélèvements pour les activités humaines et la gestion des bassins réservoirs mobilisés lors des crues sont autant d'hypothèses explicatives qui devront être vérifiées dans de futures études pour notamment définir les parts respectives de ces différents facteurs.

Les chroniques année après année des écarts à la moyenne de ces mêmes rivières montrent clairement la succession de phases excédentaires et déficitaires de débit, qui sont à mettre en relation avec l'alternance de phases pluvieuses et sèches, comme dans l'exemple de la Seine (Fig. 1). Plusieurs études ont ainsi montré un lien entre la variabilité des débits, notamment sur la Seine, et les fluctuations d'indices climatiques, tel que la NAO (North Atlantic Oscillation) (Massei et al. 2009, 2017 ; Laignel et al. 2010 ; Fritier et al. 2012 ; Chevalier et al. 2014).

Cours d'eau	Surface BV (station)	Coefficient régression (période 1999-2020)
Saane	50,7	-4,14E-05
Sée	72,9	-4,24E-05
Thar	73,1	-3,76E-05
Ganzeville	89,3	-5,53E-05
Dun	93,3	-3,25E-05
Divette	102	-3,16E-05
Beuvron	106	-4,19E-05
Commerce	118	-3,82E-05
Aure	135	-7,32E-05
Soulles	142	-9,18E-05
Austreberthe	157	-1,53E-04
Cailly	199	-1,68E-04
Seulles	256	-1,00E-04
Yères	267	-9,18E-05
Dives	282	-5,37E-05
Touques	289	-9,18E-05
Durdent	355	-2,02E-04
Andelle	377	-2,18E-04
Vire	640	-3,00E-05
Bresle	693	-2,00E-04
Sélune	770	-2,45E-05
Risle	1800	-5,48E-04
Orne	2180	-1,70E-03
Eure	5935	-1,40E-03
Seine	64604	-2,62E-02

Tableau 1 : Coefficients de régression des tendances linéaires des débits de 25 rivières normandes, sur une période de 20 années, de 1999 à 2020 (Gouault et al., 2020 ; Données issues de la Banque Hydro).

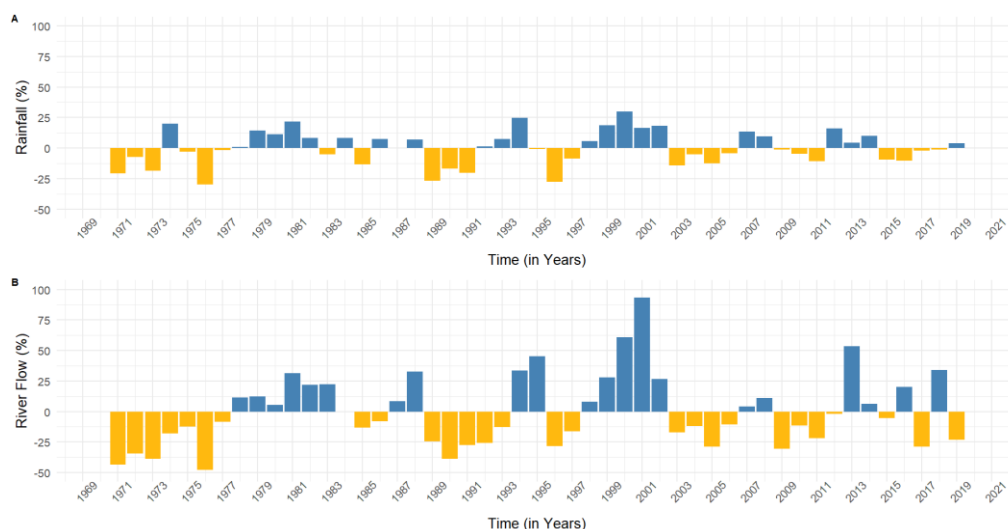


Figure 1 : Comparaison des écarts à la moyenne (%) des précipitations moyennes annuelles et des débits moyens annuels de la Seine sur la période 1970-2019 : a. Moyenne des stations d'Alençon, Caen, Cherbourg (Gonneville), Dieppe, Evreux, Le Havre (La Hève), Préaux-du-Perche et Rouen. (Données Météo-France ; Cantat et al., 2020) - b. débit de la Seine sur la station de Poses-Vernon (données Banque Hydro).

b. Projections du débit de la Seine à l'horizon 2100

Les projections à disposition ne concernent que le débit du bassin de la Seine. Celles-ci ont été réalisées dans le cadre des projets REx-HySS et EX-PLORE 2070, utilisant les anciens scénarios climatiques du GIEC (GIEC, 2007) couplées avec des modèles hydrologiques (Ducharne et al., 2009 ; Stollsteiner, 2012), et ont été confirmées par la suite par les travaux de Dayon (2015) et de Flipo et al. (2020) utilisant les nouveaux scénarios RCP du GIEC (GIEC, 2014). Ces projections (Fig. 2) indiquent une diminution des débits moyens des cours d'eau du bassin de la Seine de -10 à -30 % et de la Seine elle-même à Poses de -29% (+/- 14%) à l'horizon 2100 (soit 140 m³/s +/- 50 m³/s) par rapport au débit actuel. On assisterait à une baisse quasiment en toutes saisons, mais principalement en été lors des étiages sévères de -25 à -45 % (selon les scénarios, des incertitudes demeurent en hiver, avec soit une baisse, soit une augmentation).

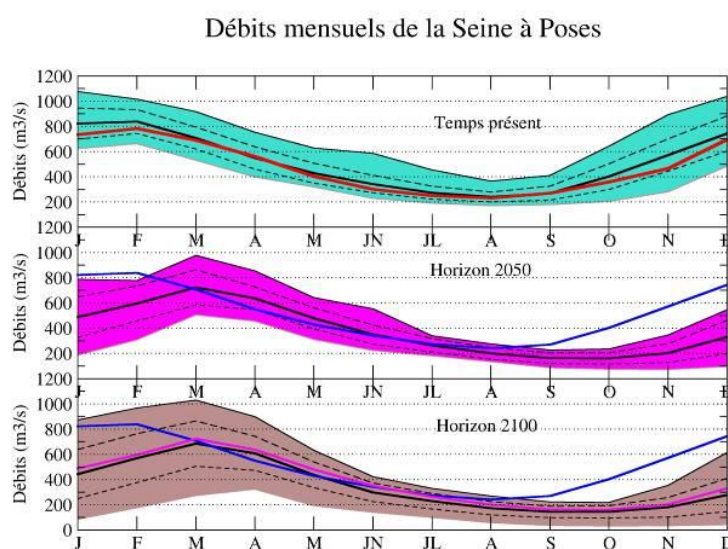


Figure 2 : Evolution des débits mensuels simulés pour la Seine à Poses dans le cadre du projet RExHySS (ensemble de 5 modèles hydrologiques et de 12 scénarios désagrégés). L'enveloppe représente les min et max simulés, le trait épais la moyenne de l'ensemble, et les pointillés l'enveloppe pour un écart-type. En haut: temps présent, la courbe rouge représente la moyenne mensuelle observée. Au milieu Horizon 2050: la courbe bleue représente la moyenne temps présent. En bas Horizon 2100: les courbes bleues et roses représentent les simulations temps présent et milieu de siècle respectivement (Ducharne et al., 2009).

Des travaux plus récents réalisés par Flipo et al. (2020), toujours sur le bassin de la Seine, ont confirmé cette tendance à la diminution du débit dans les projections, et notamment l'été. Ainsi, la simulation avec le modèle MIROC5 pour le scénario le plus pessimiste RCP 8.5 indique une réduction de 50% du débit moyen en août (mais variable selon la position dans le bassin), avec une augmentation inquiétante de la période d'étiage, qui pourrait, dans le futur, commencer 1 mois plus tôt et s'étendre jusqu'à fin octobre.

1.2. Eaux souterraines

a. Evolution des niveaux des aquifères au cours des dernières décennies

La variation du niveau piézométrique (niveau d'un aquifère) dépend de différents facteurs, parmi lesquels l'évolution des régimes de précipitation, des interactions avec les eaux de surface, le relief, les grands fleuves, la distance à la mer... Par ailleurs, la lithologie et la structuration tectonique conditionnent la capacité de stockage et déterminent les conditions de libération des eaux stockées dans les réservoirs sous-terrains (aquifères). Les formations superficielles (altérites, limons, alluvions, colluvions et également les sols) influent également sur le remplissage des aquifères en jouant le rôle de réservoir primaire et de filtre. Ce dernier influence fortement les conditions de recharge des grands systèmes aquifères et contribue aussi fortement au maintien des milieux humides, des cours d'eau...

Ces variations sont enregistrées par les puits/forages/piézomètres/sources de différents réseaux de suivi quantitatif : suivi patrimonial BRGM-OFB, Départements et Syndicats Départementaux, SAGE, Collectivités, Universités, Industriels, etc... dont une partie des informations sont centralisées sur le portail ADES (www.ADES.eaufrance.fr).

Concernant l'évolution de la réserve des eaux souterraines, les études se sont concentrées uniquement sur la nappe de la craie et pour une période allant des années 80 à 2005 et mériteraient d'être étendues sur une période plus longue et sur d'autres nappes pour confirmer l'évolution temporelle observée. Les tendances linéaires dans l'évolution piézométrique (niveau) de la nappe de la craie sont plus complexes que celles des débits des rivières et pas toujours significatives (Fig. 3) : les tendances peuvent être à l'augmentation, à la stagnation, voire à la diminution, selon la localisation géographique des piézomètres (Slimani, 2009 ; Slimani et al., 2009 ; Laignel et al., 2010 ; Laignel, 2012).

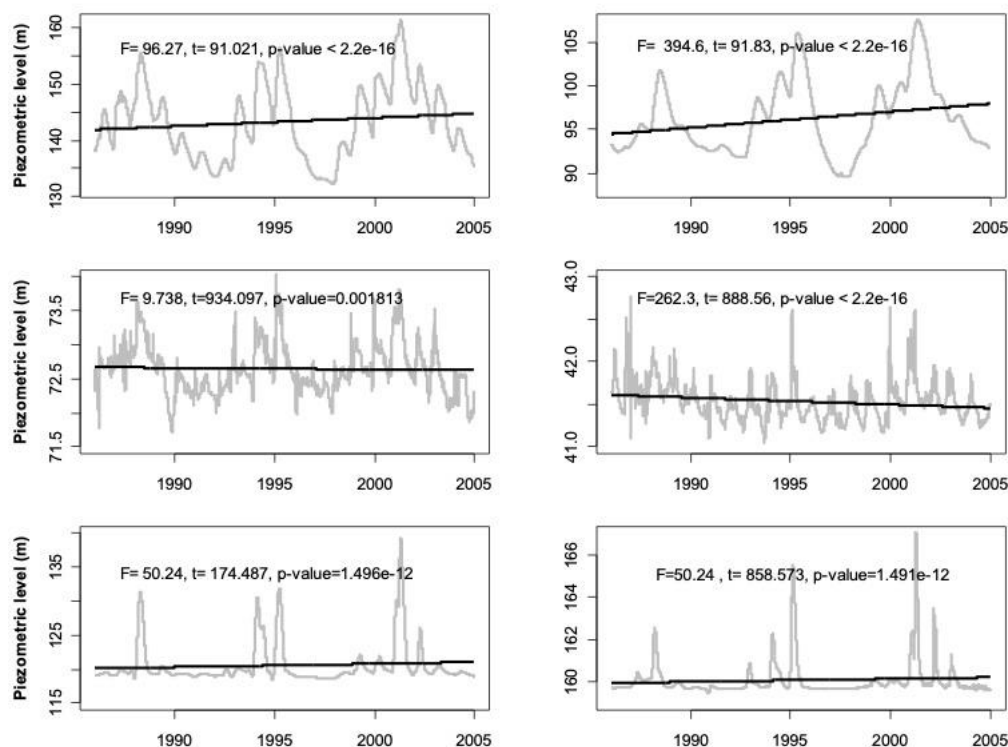


Figure 3 : Evolution inter-annuelle et tendances linéaires de 6 piézomètres situés dans la nappe de la craie en Normandie (Slimani, 2009 ; Slimani et al., 2009 ; Laignel et al., 2010 ; Laignel, 2012).

Cette complexité s'explique en partie par un comportement différentiel des piézomètres en relation avec le contexte structural de la région en zone à substrat crayeux (Slimani, 2009). De plus, la lithologie et l'hydrogéologie jouent également un rôle important dans la complexité des réactions observées.

Vernoux et Seguin (2011) ont réalisé ce même constat à l'échelle nationale. En effet, dans le cadre de l'établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines, ils ont réalisé une analyse statistique des données piézométriques du réseau de suivi national. Afin de détecter d'éventuelles tendances liées au changement climatique, un certain nombre d'ouvrages ont été sélectionnés en fonction des critères suivants : piézomètre en nappe libre avec plus de 30 ans de données. Ainsi, 375 piézomètres sur les 3344 disponibles dans la banque ADES ont fait l'objet d'une analyse statistique : recherche de tendance (régression linéaire et test de Mann-Kendall), de rupture (test de Pettitt) et évaluation de leur significativité (au sens statistique). Les premiers calculs de tendance sur les 375 piézomètres sélectionnés (données brutes) montrent une tendance à la baisse pour 54%, à la hausse pour 29% et à la stabilité pour 17%. La répartition géographique de ces tendances montre une forte hétérogénéité : seule la nappe de la craie montre une tendance marquée à la baisse en Champagne et Bourgogne, tandis que cette même nappe montre une tendance marquée à la hausse dans le bassin Artois-Picardie. Malheureusement, en ce qui concerne la Normandie, peu de piézomètres répondaient à ces critères et n'ont donc pas fournis de résultats exploitables (Annexe 1).

Après une phase de concertation avec l'ONEMA (OFB actuellement), le Ministère de l'Environnement, les DREALs, les Agences de l'eau et les directions régionales du BRGM, un réseau national de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines a été défini en 2015, et est maintenant opérationnel (déclaré comme méta-réseau dans ADES). Ce réseau national défini par Vernoux (2015) suit 39 aquifères, dont seulement 3 en Normandie (Annexe1). Ces travaux sur les nappes souterraines au niveau national, nécessiteraient d'être actualisés et poussés à l'échelle plus fine de la Normandie.

b. Projection de l'évolution des nappes du bassin de la Seine à l'horizon 2100

Les résultats des modélisations sur la réponse des principaux aquifères du bassin de la Seine (Craie, Eocène, Oligocène) au changement climatique (projets RExHySS, Ducharne et al., 2009 et EXPLORE 2070, Stollsteiner, 2012) soulignent une baisse importante de la recharge de ces aquifères (Fig. 5) : déficits moyens sur l'ensemble des aquifères simulés de 2200 Mm³/a en milieu de siècle et de 2700 Mm³/a en fin de siècle, soit des diminutions respectives de -25% et -30%. Cette baisse de 2700 Mm³/a serait du même ordre que les volumes actuellement prélevés pour les activités humaines sur le bassin de la Seine.

Cette diminution de la recharge conduirait à un rabattement (baisse du niveau piézométrique) de l'ensemble des aquifères du bassin de la Seine (Fig. 4). A titre d'exemple, le rabattement de la nappe de la craie pourrait localement atteindre, voire dépasser 10 mètres dans les zones de plateaux comme dans le Pays de Caux ou dans l'Eure (Fig. 5)

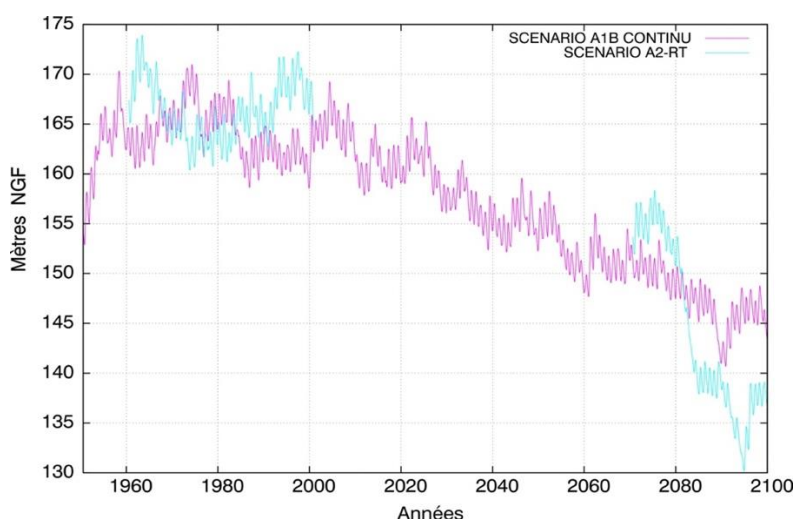


Figure 4 : Évolution de la piézométrie calculée dans la nappe de la Craie à Omécourt (Oise) par le modèle MODCOU, selon deux scénarios de changement climatique (modèle climatique ARPEGE, scénarios d'émissions A2 et A1B, méthode de désagrégation des Régimes de Temps) (Ducharne et al., 2009).

Toutefois, de par sa construction et sa portée à l'échelle de l'ensemble du bassin de la Seine, le modèle MODCOU ne peut donner qu'une idée générale et macroscopique des effets du changement climatique à l'échelle de ce grand bassin. La réalité au plan local pourrait être fort différente dans certains cas. En effet, les hétérogénéités hydrogéologiques sont très prononcées sur ce bassin, et en particulier dans le secteur normand, et les chiffres avancés pourraient très bien sur-estimer ou sous-estimer les conséquences réelles du changement climatique.

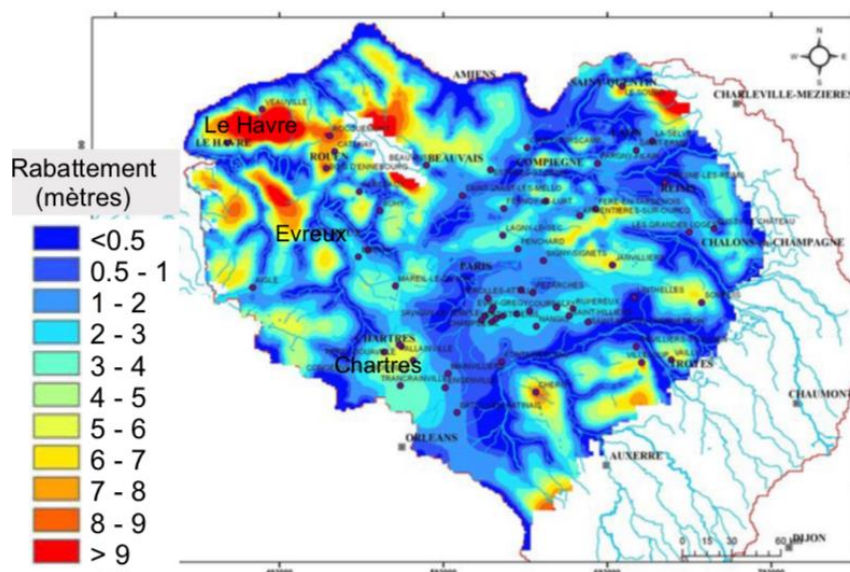


Figure 5 : Rabattement du niveau de la nappe de la craie du bassin de la Seine à l'horizon 2100 pour un scénario modéré du GIEC (source : Explore 2070, Modèle MODCOU BRGM, Stollsteiner, 2012).

Aussi, compte-tenu des effets annoncés, il semble aujourd'hui nécessaire d'affiner ces résultats à l'échelle des principaux bassins versants de Normandie, pour mieux pouvoir ensuite les intégrer dans les stratégies et plans d'actions appropriés au territoire pour lutter contre les effets du changement climatique et s'y adapter.

Ce travail pourrait aisément s'appuyer sur les modèles globaux ou maillés existants (ou en cours de développement) sur le territoire normand (ex : Modèles MARTHE/GARDENIA du BRGM concernant le Bajo-Batho sur la plaine de Caen et autour, les bassins du sud Manche, de l'Avre, de l'Iton, du Commerce, du Cailly-Aubette-Robec, du territoire de la Métropole de Rouen, ...).

2. Impact du changement climatique sur la qualité de l'eau

Les impacts du changement climatique sur la qualité de l'eau résultent du réchauffement de l'eau, qui joue sur la cinétique des différents processus biogéochimiques, et des changements de débit en lien avec les précipitations et l'évaporation, qui agissent sur la dilution ou surconcentration d'éléments chimiques, la sédimentation et les temps de rétention (In Laignel et al., 2010 ; Laignel, 2012 ; Kazmierczak et al, 2019).

2.1. Température de l'eau

La température est un des facteurs de contrôle du fonctionnement des écosystèmes aquatiques (Caissie, 2006 ; Daufresne *et al.*, 2003 ; Magnuson *et al.*, 1979 ; Comte *et al.* 2013 ; Ebersole *et al.* 2001). Les variations de température instantanées, journalières, saisonnières et inter-annuelles jouent un rôle essentiel dans les habitats, les déplacements, la reproduction et le développement des espèces poïkilothermes comme les poissons qui n'ont pas d'aptitude à réguler leur température corporelle (Brett et Higgs, 1970 ; Tseitin, 1980 ; Wieser et al., 1988 ; Wolter, 2007).

De plus la température joue également un rôle sur la teneur de l'eau en oxygène dissous et sur les processus biogéochimiques. Ainsi, l'oxygène dissous est indispensable à la respiration des poissons et participe également aux réactions de décomposition de la matière organique et à celles du recyclage des nutriments. La baisse de sa disponibilité en lien avec l'augmentation de la température peut mettre en péril la survie de certaines espèces aquatiques, ainsi que la prolifération d'autres espèces (macrophytes, algues et cyanobactéries) conduisant à des dysfonctionnements des écosystèmes.

A l'échelle du bassin de la Seine, W. Thomas de la DRIEE Ile de France a mis en place une base de données de température de l'eau. Celle-ci a été exploitée par les scientifiques du Piren-Seine et le GIP Seine Aval, qui ont montré une hausse des températures des eaux, qui atteint jusqu'à +2,5°C pour la Seine à Paris, où l'on dispose d'une chronique particulièrement longue depuis 1870 (Rivière et al., 2018, PIREN-Seine). L'OFB gère également une base de données sur la température des cours d'eau

(<http://www.naiades.eaufrance.fr/acces-donnees#/physicochimie>) au même titre que la DREAL Normandie.

Par ailleurs, afin de rendre compte du réchauffement des cours d'eau sous l'effet du changement climatique, Ducharne (2008) a utilisé une modélisation statistique sur le bassin de la Seine (e.g. Stephan et Preud'homme, 1993 ; Webb et Nobilis, 1997 ; Caissie et al., 1998). Celle-ci permet de définir une relation affine entre la température de l'eau journalière et la température de l'air au voisinage, moyennée sur les jours précédents. Ces relations furent explorées sur la période « chaude » de 1993-1999 et en 88 stations qui échantillonnent toute la variété des cours d'eau du bassin de la Seine (Ducharne, 2008). Suite à la convergence de la température de l'eau vers sa température d'équilibre radiatif au fur et à mesure que l'eau s'écoule vers l'aval, les paramètres de ces relations peuvent être définis en fonction de l'ordre de Strahler des cours d'eau (Annexe 2), avec d'excellentes performances, puisque l'essentiel de la variance de la température de l'eau est ainsi expliqué ($R^2 > 0.88$ aux petits ordres de Strahler, i.e. à l'amont du bassin, et atteignant 0.95 à partir de l'ordre 4).

A partir de l'ordre 6, i.e. dans les principaux axes (Seine jusqu'à l'aval de l'Yonne, Marne jusqu'à la confluence à la Saulx, Oise jusqu'à la confluence à l'Aisne), la pente de la relation est très proche de 1, si bien qu'une augmentation de la température de l'air se reporte directement sur celle de l'eau. Ce résultat a été utilisé pour déduire les températures de l'eau sous changement climatique dans le cadre du projet GICC-Seine, en ajoutant l'augmentation moyenne de température de l'air donnée par les scénarios climatiques aux valeurs actuelles. Par soucis de simplicité, ce résultat a été extrapolé à l'ensemble du bassin et la saisonnalité du réchauffement climatique a été négligée (Ducharne et al., 2007).

Plus récemment, l'étude menée par W. Thomas de la DRIEE Ile de France, précédemment citée, à partir de la base de données de température des eaux de Seine a confirmé ce résultat, où la température de l'eau en Seine devrait augmenter dans le futur d'un ordre de grandeur équivalent à celle de l'air (Rivière et al., 2018, PIREN-Seine).

Outre le bassin de la Seine, en Normandie, le régime thermique des cours d'eau n'a été étudié récemment que dans les bassins de la Risle, de l'Orne et de la Touques (David et al. 2017 ; Gresselin et al., 2018 ; Gresselin et al., soumis). La Seine, l'Orne et la Touques ont une température fortement liée à celle de l'air, avec des coefficients de détermination R^2 très fort entre ces deux paramètres (Fig. 6). Néanmoins, la température de l'eau peut être influencée par d'autres paramètres comme les eaux souterraines, comme dans l'exemple de la Touques où la température d'environ 11°C varie peu au cours de l'année (Gresselin et al., soumis).

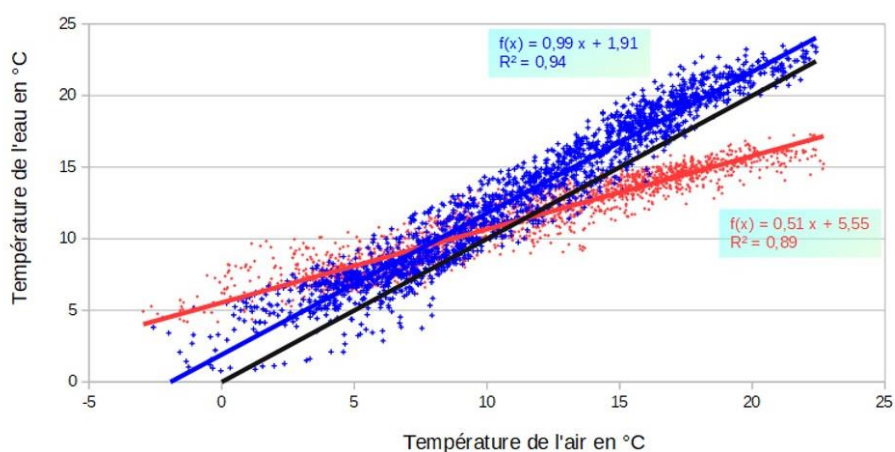


Figure 6 : Corrélation entre la température de l'air et de l'eau de l'Orne à Clécy et de la Touques à Mardilly (moyenne mobile sur 7 jours).

La température des cours d'eau normands est également influencée par le débit, la proportion de ruissellement dans l'écoulement (Gresselin et al., soumis) et par la présence d'une ripisylve. A partir du printemps, le débouffrage des arbres poussant sur les berges modifie effectivement le bilan énergétique local (ombrage et consommation d'énergie pour la respiration et la croissance de l'arbre). Pour les rivières étroites bordées d'une ripisylve dense, l'influence des facteurs nycthémeraux croît de l'hiver au printemps, puis stagne ou fléchit jusqu'à la chute des feuilles (Fig. 7). C'est le cas pour l'Odon amont, la Touques amont, mais aussi pour la Sélune en amont du barrage de Vezins. La Barges qui est un

cours d'eau étroit et encaissé (cours d'eau recalibré), couvert d'une ripisylve dense, semble isolée des variations thermiques journalières de l'air.

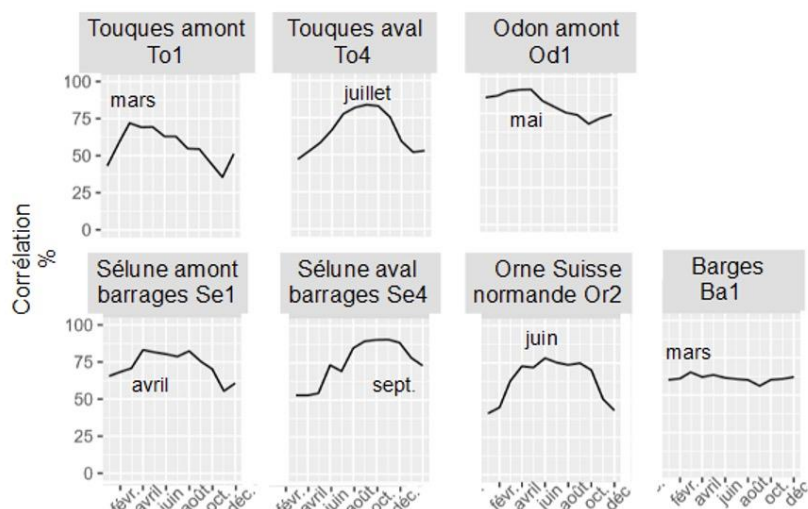


Figure 7 : Moyenne mensuelle de la corrélation entre l'amplitude thermique journalière de l'air et de l'eau pour quelques rivières de Normandie occidentale (Kauffmann et al., travaux en cours).

Les autres cours d'eau normands n'ont fait l'objet jusqu'à présent d'aucune étude sur l'évolution des températures. Les rivières fortement soutenues par la nappe de la craie (Pays de Caux, petits affluents de la Seine entre Rouen et le Havre, Pays d'Auge, Perche, Pays d'Ouche), mais aussi celles du Nord-Cotentin et des bocages granitiques, soutenues par des aquifères de socle très productifs, pourraient avoir un comportement différent de celui des rivières étudiées.

Effectivement les interactions nappes-rivières conditionnent fortement la température des eaux de ces dernières comme l'a montré l'observatoire de la Risle Médiane mené par le BRGM en lien avec de nombreux partenaires, dont l'Université de Rouen, la DREAL et L'OFB.

Le contrôle thermique des cours d'eau par les nappes a clairement été mis en évidence dans le cadre de cet observatoire qui a étudié les relations nappe-rivières dans le secteur karstique de la Risle médiane (David et al., 2017). La température de la nappe étant relativement stable dans la partie matricielle de la nappe de la craie (entre 11°C et 12°C), ainsi, lorsque la nappe et la rivière sont connectées (à l'amont et à l'aval du tronçon karstique de la rivière), les apports de débit de la nappe viennent tamponner la température de la rivière : ils refroidissent la rivière en été et la réchauffent en hiver. En revanche, dans le secteur où la nappe ne contribue pas au débit de la rivière (secteur « perché »), la rivière est soumise uniquement aux influences de la température atmosphérique et des autres facteurs décrit ci-dessus. L'influence atmosphérique augmente alors avec l'éloignement du point de déconnexion nappe/ri vière (le temps de contact rivière/atmosphère augmente).

De plus, les effets sur la vie aquatique (populations piscicoles, macro-invertébrés, végétation aquatique) ont été évalués dans le cadre de cet observatoire. Il apparaît que le nombre de jours de stress pour les populations piscicoles, voire de risque de mortalité pour certaines espèces (nombre de jours montrant une température supérieure à 25°C et inférieure à 4°C) sont observés essentiellement sur les secteurs où la nappe ne contribue pas directement au débit de la rivière et où l'influence de la température atmosphérique sur la température de la rivière est importante (David et al., 2017). Ainsi, il apparaît déjà clairement que les seuls impacts de l'augmentation de la température atmosphérique sur la vie aquatique seront accentués sur les tronçons karstiques des rivières de la région Normandie.

2.2. Hypothèses sur l'évolution de la qualité de l'eau en lien uniquement avec les précipitations

Il est possible de dégager deux périodes distinctes dans l'année où la Normandie devrait voir une dégradation de la qualité de l'eau : lors des précipitations intenses et durant les sécheresses.

L'augmentation des précipitations intenses de +2 à +10% (cumul dépassant 20 mm par jour, soit 20 litres/m²) prévue dans le cadre des scénarios régionaux d'évolution du climat à l'horizon 2100 (Laignel Nouaceur, 2018 ; Cantat et al., 2020), devrait entraîner une augmentation du ruissellement et de l'érosion des sols qui aboutira à une augmentation de la turbidité et d'éventuelles contaminations associées aux particules (contaminants métalliques et bactériens...) des cours d'eau et des captages

des eaux souterraines, du fait du contexte karstique de la Normandie crayeuse (Massei et al., 2003 ; Valdes et al., 2007, 2014 ; Slimani et al., 2009 ; Duran et al., 2016 ; Dufoyer et al., 2019).

Dans le cadre du projet EVAPORE (coordonné par l'AREAS, le BRGM et le laboratoire M2C de l'université de Rouen Normandie ; financement de l'Agence de l'Eau Seine Normandie), des simulations ont été menées sur les impacts économiques du ruissellement, des inondations et des coulées boueuses (liées à l'érosion des sols) sur le bassin versant de la Lézarde en prenant deux scénarios de changement climatique, un modéré RCP4.5 et un pessimiste RCP8.5 (Patault et al., 2020). Il en ressort qu'à l'horizon 2050, sur cet unique bassin, les dommages moyens annuels augmenteraient de +14 à +29% (Fig. 8). Le même travail a été mené pour mesurer l'impact de la turbidité sur le captage AEP de Radicatel et il a été montré que les dommages moyens annuels augmenteraient de +11 à +27%.

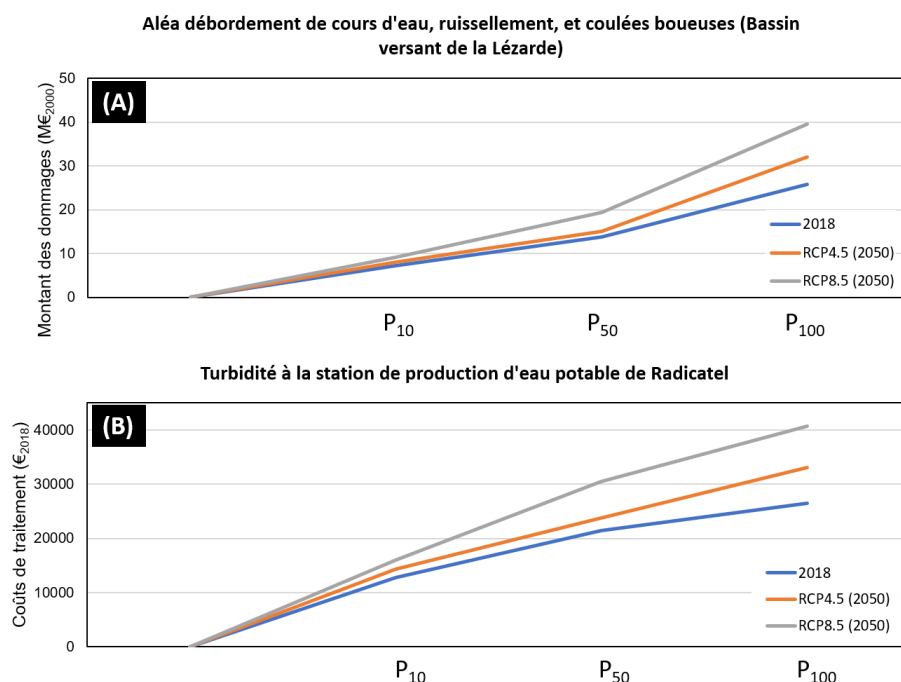


Figure 8 : Montant des dommages liés au ruissellement, inondations et coulées boueuses sur le bassin versant de la Lézarde (A), et des coûts de traitement des eaux en lien avec la turbidité à la station de production d'eau potable de Radicatel (B), sous deux scénarios de changement climatique (un modéré RCP4.5 et un pessimiste RCP8.5) (Patault et al., 2020).

A l'inverse le déficit des précipitations, pouvant aller jusqu'à -15% et l'augmentation des sécheresses atmosphériques de 2 à 7 jours à l'horizon 2100 (Laignel et Nouaceur, 2018 ; Cantat et al., 2020), conduira à des diminutions des débits et des étiages sévères des cours d'eau entraînant une surconcentration des éléments chimiques présents dans l'eau par moindre dilution, et éventuellement des pollutions par dépassement de certains seuils réglementaires (production d'eau potable, bon état écologique et chimique des cours d'eau...).

De plus, de manière conjointe, une diminution du débit des cours d'eau et une augmentation de la température de l'eau des rivières, devraient entraîner des problèmes d'oxygénation de ces dernières. Par ailleurs, sans diminution des rejets industriels, agricoles et domestiques des stations d'épuration, ceux-ci conduiront à une dégradation de la qualité des eaux du fait de la diminution du volume d'eau des nappes et des cours d'eau et de leur moindre dilution en particulier en été. Ceci impliquera une tension supplémentaire ou exacerbée sur les ressources en particulier lors des périodes où les besoins sont accentués.

2.3. Evolution de la qualité biogéochimique de l'eau en lien avec les scénarios du changement climatique sur l'évolution à la fois de la température et des précipitations

Les résultats concernant les effets du changement climatique sur la qualité biogéochimique de l'eau ont été, eux aussi, principalement obtenus pour le bassin de la Seine et il n'est pas toujours aisé de retirer des informations s'appliquant à la Normandie (projet GICC-Seine ; étude ARMINES/MINES ParisTech ; Billen et al., 1994 ; Garnier et al., 1995 ; Billen et Garnier, 1999 ; Gallois et Viennot, 2018).

Comme déjà précisé précédemment, les impacts du changement climatique sur la qualité de l'eau résultent du réchauffement de l'eau, qui joue sur la cinétique des différents processus biogéochimiques, et des changements de débit, qui agissent sur la dilution, la sédimentation et les temps de rétention.

Le projet GICC-Seine, s'est intéressé notamment au réchauffement atmosphérique et à la baisse des débits d'étiage, qui constituent les changements les plus importants pour la qualité biogéochimique des cours d'eau, puisque c'est en été que s'expriment l'essentiel des processus biogéochimiques qui la contrôlent (phyto et zooplancton, activité bactérienne). L'objectif était de comparer l'ordre de grandeur de ces impacts à ceux qui pourraient résulter de l'évolution probable des principales contraintes anthropiques directes dans le bassin, à savoir la pollution azotée diffuse d'origine agricole, telle que simulée par le modèle couplé STICS-MODCOU-NEWSAM et les rejets ponctuels, domestiques et industriels (Ducharne et al., 2007). L'analyse fut menée à l'aide du modèle RIVERSTRAHLER (Billen et al., 1994 ; Garnier et al., 1995 ; Billen et Garnier, 1999).

L'impact cumulé du changement climatique simulé à l'issue du 21^e siècle serait une augmentation des teneurs en nitrates par rapport à celles en 2000, que ce soit dans les aquifères (+20 mg/l environ) ou dans les cours d'eau (+10 mg/l environ). La différence entre ces deux compartiments s'explique par la contribution des écoulements de surface aux débits, par la dénitrification riveraine et vraisemblablement également par les temps de transfert à travers les sols. Une généralisation du décret de janvier 2004 sur l'agriculture raisonnée (réduction de la fertilisation azotée de -20% et introduction de CIPAN) aurait un impact opposé du même ordre.

Une prospective spécialisée, intégrant l'évolution de la démographie, des taux de raccordement, du secteur industriel et du progrès technologique d'épuration et de dépollution, indique une réduction importante des apports ponctuels au cours du 21^e siècle, allant de 30 à 75% selon les polluants. L'impact de ce scénario est considérable sur les nutriments, et entraîne une amélioration notable de l'oxygénation et de l'eutrophisation. Le changement climatique accentue la baisse de la biomasse algale, mais contrecarre l'oxygénation du milieu. Ces impacts du changement climatique s'expliquent essentiellement par le réchauffement de l'eau, alors que les changements de débits simulés n'ont pratiquement aucun impact (Ducharne, 2008). L'importance relative de ces deux facteurs de changement pourrait bien sûr être modifiée si les changements de débit étaient plus importants.

Des scénarios prospectifs plus récents des pollutions diffuses d'origine agricoles ont été proposés par Gallois et Viennot (2018) par modélisation sur le bassin Seine Normandie en combinant le contexte de changement climatique avec deux scénarios d'évolution des pratiques agricoles sur les doses d'irrigation : un scénario A basé sur la poursuite de la spécialisation et de l'intensification de l'agriculture, un scénario B représentatif d'une agriculture avec un état de transition écologique. Il en résulte une cartographie des concentrations en nitrates calculées pour les formations aquifères affleurantes à 5 échéances de simulation : 2017, 2021, 2027, 2035 et 2050 (Annexes 3 et 4). Il est, cependant, difficile à cette échelle de décrypter les évolutions pour le territoire normand. Ce type de modélisation devrait être affinée à l'échelle de la Normandie en tenant compte des hétérogénéités hydrogéologiques locales pour en tirer des conclusions.

2.4. Intrusion marine et salinisation des eaux souterraines

La diminution du niveau des nappes d'eau souterraines, liée à la diminution de leur recharge (cf. 2.2) et à l'évolution des prélèvements pour les activités humaines, combinée avec l'élévation du niveau des mers (actuellement en moyenne de +2,2 mm +/- 0,1 mm par an sur les côtes normandes et qui devrait atteindre +26 cm à +1,10 m selon les scénarios de l'IPCC/GIEC, 2013), devrait conduire à une intrusion des eaux marines et à une salinisation des aquifères côtiers (Annexe 5), comme on le constate déjà dans plusieurs régions du monde et notamment sur le bassin méditerranéen avec des salinités des eaux souterraines qui peuvent atteindre des niveaux importants (ex : 21 g/l dans les eaux souterraines du Cap Bon en Tunisie, alors que 50 ans auparavant la salinité était de 1 g/l, Gaaloul et al, 2015). Certains forages normands sont déjà impactés par ce phénomène de biseau salé comme les vallées de l'Orne et de l'Aure et la côte ouest du Cotentin (BRGM RP66052-FR, Laurent et al., 2017).

Les projections par modélisation réalisées par le BRGM (BRGM RP-66229-FR, Croiset et al., 2016), mettant en jeu l'élévation du niveau marin et la baisse du niveau des nappes liée au changement climatique (scénario RCP 8.5) et à l'augmentation des prélèvements par les activités humaines de plus 10%, montrent que ce phénomène devrait s'intensifier, avec une pénétration du biseau salé qui atteindrait entre 100 et 1000 m à l'intérieur des terres dans les aquifères littoraux du Calvados et voire

jusqu'à 3500 m en suivant l'axe de certaines vallées côtières, où des baisses de débit ont été mise en évidence (Fig. 9). Les fleuves comme l'Orne et la Dives seraient particulièrement impactés. Ces travaux mettent en évidence, la sensibilité particulière du littoral Normand à ce type de phénomène, sensibilité qu'il convient encore d'étudier pour les aquifères situés le long des côtes crayeuses et de l'estuaire de la Seine notamment. Il sera donc nécessaire d'organiser à l'avenir le suivi du phénomène pour adapter la réponse aux enjeux territoriaux et au contexte hydrogéologique. C'est le cas par exemple des études en cours DREAL/AESN/OSUR/Collectivités.

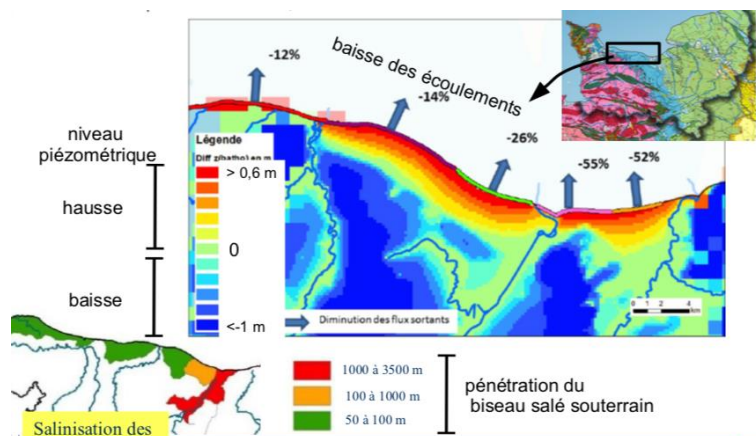


Figure 9 : Impact conjugué de l'élévation du niveau marin et de la baisse du niveau des nappes liées au changement climatique (scénario RCP 8.5) et à l'augmentation des prélèvements pour les activités humaines (+ 10%) (BRGM RP-66229-FR, Croiset et al., 2016).

L'élévation du niveau marin pourrait également engendrer une modification des dynamiques estuariennes avec en particulier une remontée vers l'amont du gradient de salinité et du bouchon vaseux des estuaires. En Seine, cette remontée des gradients estuariens a été modélisée sur la base des hypothèses d'évolution des débits de Ducharne et al. (2009) et suivant les projections d'élévation du niveau marin du GIEC. Cette remontée implique une modification des habitats aquatiques et des répercussions sur la faune et la flore (Bacq et al., 2013).

3. Aléas naturels : crues et inondations

L'augmentation des précipitations intenses de +2 à +10% (cumul dépassant 20 mm par jour, soit 20 litres/m²) prévue dans le cadre des scénarios régionaux d'évolution du climat à l'horizon 2100 (Laignel et Nouaceur, 2018 ; Cantat et al., 2020), devrait entraîner, sans modifications majeures de l'occupation du sol, une augmentation du ruissellement, des crues des rivières et donc des inondations dans les vallées et vallons secs de la région Normandie.

A cela s'ajoutent les crues par débordement de la nappe qui sont fréquentes en Normandie. Ils surviennent plutôt dans les points bas de la topographie, tout particulièrement dans les zones humides bordant les cours d'eau, notamment près du littoral. La mer bloque les écoulements souterrains venant du continent, forçant les nappes à émerger en bordure de côte dans de vastes zones marécageuses. Les débordements de nappe sont également fréquents dans les bas de versants argileux, notamment dans la partie armoricaine du territoire. Ils surviennent aussi régulièrement en position de plateaux lorsque ces derniers sont recouverts de limons perméables recouvrant un substratum imperméable. C'est le cas notamment en Pays d'Ouche où les pluies hivernales suffisent à remplir tous les ans le réservoir aquifère constitué par la couche de limons. Des débordements peuvent survenir plus rarement dans certaines vallées habituellement sèches, en amont des sources. Il existe actuellement deux cartes des inondations potentielles par remontée de nappe, celle à l'échelle nationale du BRGM téléchargeable sur le portail Géorisques (<https://www.georisques.gouv.fr/> ; <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-65452-FR.pdf> ; Brugeron et al., 2017) et celle des services de l'état téléchargeable en ligne uniquement pour la Normandie occidentale (http://carmen.application.developpement-durable.gouv.fr/8/risques_naturels_inondation.map) (Annexe 6 et 7). Ces deux cartes représentent ainsi les premières tentatives qui mériteraient d'être affinées à une échelle plus adaptée pour être prises en compte dans les plans d'aménagement.

De plus, à titre d'hypothèse, on pourrait assister dans les zones basses du littoral, du fait de l'élévation du niveau marin (26 cm à 1,10 m) à une élévation corollaire du niveau des nappes. En conséquence, cela entraînerait une modification des secteurs sensibles aux remontées de nappes, en terme de surfaces exposées (déplacement des zones de risques et accentuation dans les zones basses), et donc probablement également l'apparition de nouvelles zones humides. Cependant, ceci reste seulement une hypothèse qui devra être confirmée par des études ultérieures.

Par ailleurs, dans les basses vallées littorales (estuaires), nous devrions également observer une augmentation de la fréquence et de l'intensité des inondations liée aux concomitances entre différents phénomènes que sont l'élévation du niveau marin, les précipitations intenses, les crues de rivière, les crues de nappes, les tempêtes et submersions et la marée. L'élévation du niveau de la mer aboutira notamment à un phénomène de blocage de l'écoulement des eaux et donc à des inondations plus nombreuses et plus intenses.

Par exemple, les événements du début de l'année 2018 (exemple de la tempête Eleanor : formation de surcotes en lien avec de forts vents d'ouest, coefficient de marée supérieur à 100, débit de la Seine entre 1100 et 1300m³/s ; crue : débit de la Seine supérieur à 2100m³/s, coefficient de marée supérieur à 90) illustrent l'importance de la combinaison des différents forçages pour expliquer les niveaux d'eau atteints et inondations observés dans l'estuaire de la Seine (Fig. 10). Les niveaux d'eau atteints à Elbeuf sont ainsi plus élevés lors de l'épisode de crue que lors de la tempête, illustrant le poids prépondérant du débit à l'amont de l'estuaire. A l'inverse, à Tancarville, les niveaux atteints sont plus élevés lors de l'épisode de tempête que lors de celui de crue, illustrant le poids prépondérant de la marée et de la météo à l'embouchure. Dans les secteurs intermédiaires comme Rouen, les niveaux atteints lors des deux épisodes sont comparables, malgré une combinaison des forçages complètement différente. De plus, la concomitance de forçages non extrêmes en milieu côtier ou fluvial peut tout de même générer un risque inondation/submersion. Par exemple, si une crue de faible période de retour (sans répercussion sur la partie fluviale) se déroule lors de marée de vives eaux et qu'en plus la baie de Seine présente une légère surcote (sans risque pour le littoral), avec des conditions météorologiques légèrement défavorables (petite dépression et vent d'ouest), alors des inondations risquent de se produire en estuaire. En cas de concomitance de conditions marines très défavorables (forte tempête, gros coefficient de marée...) et de conditions de crue importante, tous les secteurs de l'estuaire seraient impactés, avec des niveaux particulièrement renforcés dans les secteurs intermédiaires de l'estuaire. Cette spécificité ne peut être ignorée dans les études de l'aléa inondation des grands estuaires (pour lesquels les concomitances jouent un rôle majeur). D'autant plus dans l'actuel contexte du changement climatique, où les évolutions des forçages et en particulier du niveau marin vont accentuer cette sensibilité.

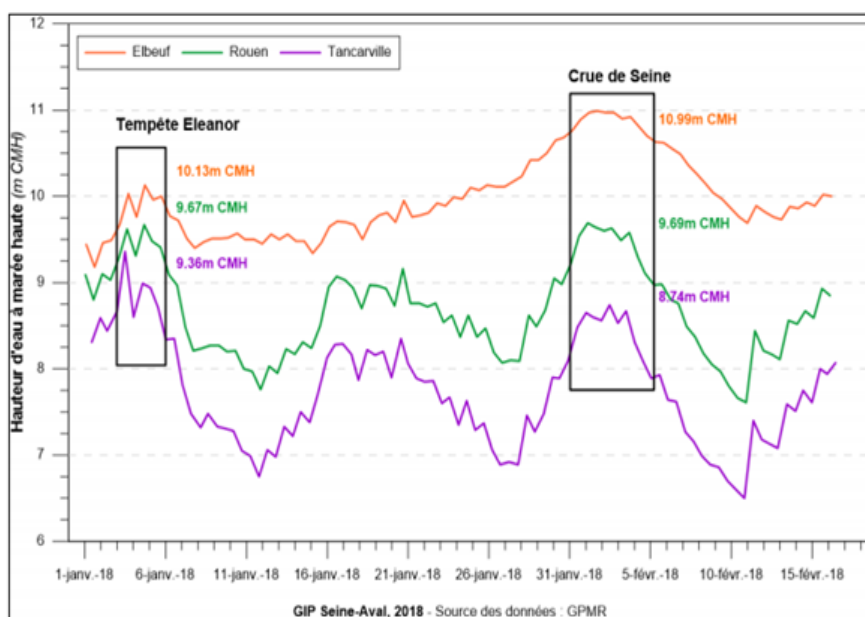


Figure 10 : Hauteur atteinte à marée haute à Elbeuf, Rouen et Tancarville entre le 01 janvier et 15 février 2018 (Source : GIP Seine Aval).

Ces dernières années, des progrès ont été accomplis sur la compréhension et la modélisation de ces concomitances, mais il existe encore très peu de publications scientifiques à l'échelle internationale et encore moins à l'échelle régionale sur ces phénomènes. Ceci nécessite de poursuivre les efforts, car les projections sur les zones potentiellement inondables peuvent être assez différentes dans les basses vallées selon que l'on tient compte de l'ensemble des concomitances ou non.

Néanmoins, il existe actuellement deux cartographies qui tiennent compte pour partie des concomitances (Fig. 11). Il s'agit de la cartographie de Climate Central (concomitance entre les crues et l'élévation du niveau de la mer ; ClimateCentral.org ; Kulp et al., 2019 ; Kopp et al., 2017) à l'échelle globale et celle du GIP Seine aval à l'échelle de l'estuaire de la Seine (concomitance entre les crues, les tempêtes et l'élévation du niveau de la mer ; Etudes ARTELIA & GIP Seine-Aval : Fisson et al., 2014, 2016).



Figure 11 : Superposition de deux cartes montrant les zones inondées de l'estuaire de la Seine suite au changement climatique par Climate Central (ClimateCentral.org ; Kulp et al., 2019 ; Kopp et al., 2017) et le GIP Seine-Aval (ARTELIA & GIP Seine-Aval : Fisson et al., 2014, 2016). La différence entre les deux cartes apparaît en rose (la couleur bordeaux correspond aux zones potentiellement inondées modélisées par ARTELIA et GIP Seine Aval ; les couleurs bordeaux + rose correspondent aux zones potentiellement inondées modélisées par Climate Central).

La superposition des cartes des zones inondées dans le futur en lien avec l'élévation du niveau des mers, réalisées par le GIP Seine aval et par Climate Central, montre cependant des différences notables en rose à la fois à l'amont et à l'aval de l'estuaire de Seine (Fig. 11) : les zones inondées sont plus étendues dans le cadre de la modélisation par Climate Central que celle du GIP Seine Aval. Il apparaît à la lecture des méthodologies utilisés que celle de Climate Central serait peu appropriée aux estuaires et à cette échelle.

Ainsi, les résultats des effets de l'élévation du niveau marin sur les niveaux de pleine mer sur les 170 km de l'estuaire de Seine obtenus par modélisation par le GIP Seine aval montrent que (Lemoine, 2015):

- l'amortissement de la propagation de l'élévation du niveau marin est principalement régit par le débit,
- pour les débits proches du débit moyen, l'élévation du niveau des mers est retranscrite intégralement, voire amplifiée, sur l'ensemble du linéaire de l'estuaire,
- l'amortissement de la propagation de l'élévation du niveau marin est généralement plus important pour un coefficient de marée élevé,
- la prise en compte (ou non) des murets anti-inondation ne modifie pas les niveaux de pleine mer obtenus dans le lit mineur.

Cependant, aucune des deux modélisations proposées par Climate Central et le GIP Seine aval ne prennent en compte les remontées de nappe dans le phénomène d'inondation ; celle-ci pouvant accroître localement l'inondation, ou inversement accélérer le retour à la normal (ressuyage favorisé par infiltration). Celles-ci devront donc être intégrées dans les futures études de modélisation.

Par ailleurs, récemment une simulation du blocage de l'écoulement des eaux liée à une élévation future du niveau marin en situation de tempête a été effectué dans la basse vallée de la Bresle (Graff, 2019). La tempête Martin du 27 décembre 1999 a été ainsi rejouée en ajoutant une élévation du niveau des mers de 1 m (Fig. 12).

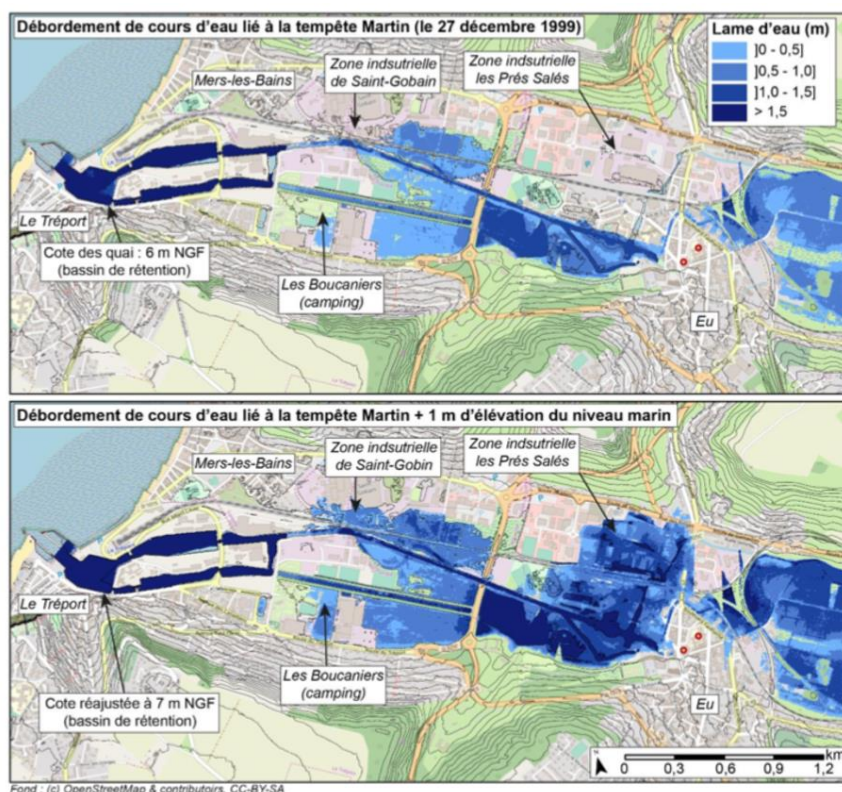


Figure 12 : Modélisation hydraulique du blocage de l'écoulement des eaux avec 1 m d'élévation du niveau de la mer lors de la tempête Martin du 27 décembre 1999 sur la basse vallée de la Bresle (Graff, 2019).

Cette étude indique alors que pour 1 m d'élévation du niveau des mers, une tempête comme celle Martin, occasionnerait un volume en eau et une surface inondée supplémentaires respectivement de 840 000 m³ et de 180 hectares dans la basse vallée de la Bresle par rapport à la situation de la tempête de 1999. Néanmoins, il est légitime de penser que ces chiffres sont sous-estimés dans la mesure où les volumes d'eau entrants liés à la submersion de tempête ne sont pas pris en compte, montrant là encore la nécessité d'arriver à une modélisation qui tienne compte de l'ensemble des phénomènes.

Ces cartes issues de modélisation sont des outils précieux pour permettre une réflexion et une gestion optimisée de ces espaces s'appuyant sur la modification de la zonation actuelle des basses vallées (niveaux d'eau et inondations, salinité, température, régime fluvial,...) et ainsi sur les zones à protéger ou non (que ce soit pour les biens et les personnes ou pour les espaces naturels) et les actions de restauration éventuellement à mener.

Cependant, aucune des modélisations ne prend en compte l'ensemble des phénomènes. Or, comme déjà précisé, les projections sur les zones potentiellement inondables peuvent être assez différentes dans les basses vallées selon que l'on tient compte de l'ensemble des concomitances ou non. Des efforts devront donc être faits dans ce sens dans les futures études.

Un risque naturel de type inondation dans le cadre du changement climatique pourrait également mener à un effet cascade de risques à la fois industriels, sanitaires, mais aussi économiques, comme l'illustre parfaitement la boucle de la Seine à Rouen où sont superposées une carte d'inondation et une des sites ICPE, dont SEVESO. Les inondations sont issues de modélisations (produites par ARTELIA/GIP Seine Aval et Climate Central) combinant des crues modérées de période de retour de 10 ans avec une élévation du niveau marin dans le cadre du changement climatique. Que ce soit la modélisation de ARTELIA/GIP Seine Aval ou celle de Climate Central (modélisation à prendre néanmoins avec précaution car peu adaptée aux estuaires), ces dernières montrent clairement que de nombreuses sites ICPE et SEVESO seront touchées par ces inondations (Fig. 13).

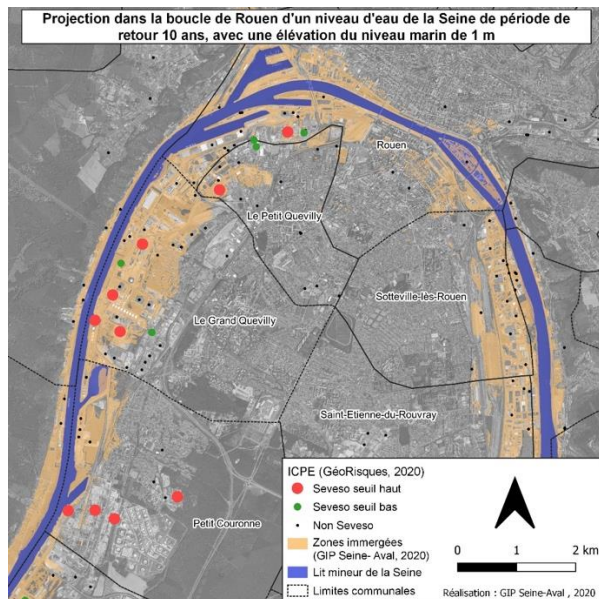


Figure 13A : Projection ARTELIA/GIP Seine, modifiée avec ajout des sites SEVESO.

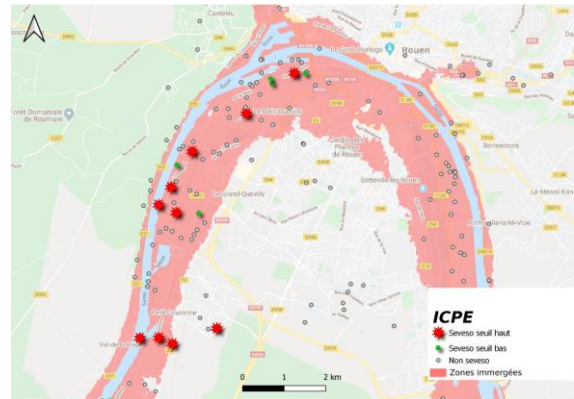


Figure 13B : Projection Climate central. ClimateCentral.org ; Kulp et al., 2019 ; Kopp et al., 2017 ; modifiée avec ajout ICPE par Patault et Laignel.

Figure 13 : Lien entre le risque d'inondation (dans le cadre du changement climatique) et le risque industriel pour les ICPE (dont SEVESO).

Pour la simulation ARTELIA/GIP Seine Aval (12A), celle-ci est réalisée avec une élévation du niveau marin de 1 m et des crues avec une période de retour de 10 ans.

Pour la projection de Climate Central (12B), les zones immergées en 2050 combinent l'élévation du niveau marin (RCP 4.5) et des crues modérées (période de retour de 10 ans).

Ces inondations entraîneront des problèmes sanitaires (Ladner et al., 2020), avec des impacts physiques sous la forme de blessures ou de noyades, des impacts psychologiques post-traumatiques et des impacts indirects comme les maladies hydriques liées à la dégradation de la qualité de l'eau lors de ces événements.

A cela s'ajoutera des risques de vieillissement prématuré des infrastructures routières et des bâtiments pouvant mener également à des problèmes d'insalubrité, des dysfonctionnements des réseaux d'assainissement et des remobilisations des polluants stockés dans les sols qui seront inondés, ainsi qu'une profonde modification des écosystèmes.

Conclusions

Les effets du changement climatique sur la ressource eau en Normandie se marquent actuellement principalement par une diminution très légère à relativement forte des débits selon les cours d'eau (avec cependant des tests statistiques qui ne sont pas toujours significatifs pour certaines rivières), une augmentation de la température de l'eau corolaire de l'augmentation de la température atmosphérique et des tensions sur la ressource lors des périodes de sécheresse.

Les projections futures indiquent que le changement climatique devrait mener à une diminution de la ressource en eau à la fois de surface et souterraine, à une dégradation de la qualité de l'eau et à des inondations plus intenses et plus fréquentes.

La diminution future de la ressource en eau sera à mettre en lien avec l'élévation de la température, l'augmentation de l'évaporation et la diminution des précipitations moyennes annuelles, mais aussi avec l'augmentation tendancielle des prélèvements pour les activités humaines (industrie, agriculture, besoins domestiques). Ces hypothèses explicatives devront être vérifiées dans de futures études pour notamment définir les parts respectives de ces différents facteurs.

Au-delà de ces hypothèses, cette diminution de la ressource devrait conduire à des conflits d'usages croissants et à des restrictions plus fréquentes et plus longues à certaines périodes, principalement l'été.

La dégradation de la qualité de l'eau sera liée à :

- l'élévation de la température de l'eau qui aura de nombreuses conséquences potentielles, comme la diminution de l'O₂ dissous, l'accélération de certaines réactions biogéochimiques entraînant un dysfonctionnement des écosystèmes aquatiques ;
- l'augmentation des précipitations intenses qui mènera à davantage de ruissellement, d'érosion et de turbidité dans les eaux de surfaces et souterraines avec des polluants associés ;
- des sécheresses et des périodes d'étiage plus sévères en lien avec la diminution des précipitations (notamment l'été) qui conduiront à une diminution des volumes d'eau dans les rivières et à une diminution de la dilution et ainsi à une surconcentration de certains éléments chimiques pouvant occasionner des pollutions ponctuelles ;
- une intrusion marine et une salinisation des aquifères côtiers en lien avec l'élévation du niveau marin et la baisse des nappes du fait du changement climatique et des prélèvements.

D'autre part, sans diminution des rejets industriels, agricoles et domestiques des stations d'épuration, ceux-ci conduiront à une dégradation de la qualité des eaux du fait de la diminution du volume d'eau des nappes et des cours d'eau et de leur moindre dilution en particulier en été. A l'inverse lors des fortes pluies, les by-pass des stations d'épurations pourraient également apporter des polluants dans le milieu.

Les inondations seront vraisemblablement plus fréquentes et plus intenses en raison notamment des concomitances de différents phénomènes incluant l'élévation du niveau des mers, l'augmentation des précipitations intenses, des crues de rivières et des nappes et les tempêtes et submersions.

Les conséquences du changement climatique sur la disponibilité et la qualité de la ressource en eau, et donc sur l'alimentation en eau de la région, pourront être multiples comme cela a été énoncé dans ce document. Combiné à ces éléments, il sera également nécessaire de se baser sur des projections fiables des besoins en eau, en lien avec les changements territoriaux et sociétaux, en tenant compte de leur impact économique. Il s'agira alors d'adopter de nouveaux modes de gestion de la ressource en eau adaptée aux nouveaux contextes climatiques, hydrologiques, hydrogéologiques et socio-économiques...

Néanmoins de nombreuses incertitudes demeurent qu'il faudra lever au travers d'un renforcement des études scientifiques. En effet, une majorité des études, et notamment sur les projections futures se concentrent actuellement sur le bassin de la Seine, et donc seulement sur une partie de la Normandie, à savoir le bassin aval de la Seine. Ces études ne permettent pas d'avoir une vision exhaustive de l'ensemble du territoire normand et de ces spécificités.

Sur l'ensemble des thèmes (évolution quantitative et disponibilité de la ressource, qualité de l'eau, à la fois sur les eaux de surface et souterraines, aléas inondation, salinisation des eaux...), il sera important de proposer des études plus fines pour avoir une vision exhaustive de l'impact du changement climatique sur l'ensemble des bassins versants du territoire normand en tenant compte de leur hétérogénéités hydrogéologiques et notamment pour les projections futures, à l'aide de modélisation. Ces projections et nouveaux modes de gestion de la ressource devront être repris dans les documents de planification : SDAGE, SAGE, Schéma Directeurs AEP Départementaux, PGRE, etc... Ces données seront essentielles pour fiabiliser les scénarios utilisés dans les modèles, et donc, leurs résultats, et par entraînement, les choix et stratégies à adopter.

Dans le détail, il s'agira de :

- poursuivre l'acquisition des connaissances fondamentales sur les interactions sol/sous-sol/cours d'eau/nappes souterraines (cartographies, réseaux de mesure...). Pour citer quelques exemples, nous manquons de connaissances sur les nappes d'eau dans le Massif Armoricaïn et il apparaît nécessaire de réorganiser et densifier le réseau de mesures de la température des cours d'eau et des nappes. Des sites-pilotes de mesures des relations entre cours d'eau et nappes souterraines pourraient être ainsi mis en place ;
- de mieux comprendre et modéliser les relations nappes-rivières pour mieux appréhender les risques hydrologiques en tenant compte des hétérogénéités hydrogéologiques du territoire normand ;
- de mieux appréhender les effets combinés des facteurs climatiques (température, évaporation précipitations) et anthropiques (prélèvements) sur la disponibilité de la ressource (au travers d'analyses statistiques et de modélisation plus poussée, intégrant notamment le Machine learning) ;
- renforcer les études sur les effets combinés des aléas météorologiques (précipitations intenses, tempêtes) et de l'élévation du niveau marin sur les inondations (au travers également d'analyses statistiques et de modélisation plus poussée, intégrant notamment le Machine learning). Même si ces

dernières années, des progrès ont été accomplis sur la compréhension et la modélisation des concomitances, il existe encore aujourd'hui trop peu de publications scientifiques sur le sujet et l'ensemble des phénomènes ne sont pas pris en compte dans les inondations, comme par exemple l'interaction avec les nappes souterraines. Ceci nécessite de continuer à faire des efforts sur les projections futures des zones potentiellement inondables en intégrant l'ensemble des phénomènes et leurs concomitances éventuelles, à savoir les crues de rivières, les crues de nappes, l'élévation du niveau marin, les tempêtes et leurs submersions ;

- approfondir les études sur les effets combinés du changement climatique et de l'homme (notamment au travers des rejets...) sur la qualité de l'eau ;
- poursuivre et approfondir les études sur le biseau salé dans les nappes souterraines, notamment en Normandie orientale et sur l'axe Seine, à la fois par des suivis et des simulations numériques.

Références bibliographiques

Bacq N., Lemoine J.P., Moussard S., Le Hir P., Lobry J., 2013. Projet MESSCENE : Modélisation des fonctions écologiques de l'Estuaire de la Seine et ScENarios d'Évolution – rapport final. Rapport du GIP Seine-Aval, projet financé par la fondation de France, 69 p.

Billen, G., Garnier, J., Hanset, P., 1994. Modelling phytoplankton development in whole drainage networks: The RIVERSTRAHLER model applied to the Seine river system. *Hydrobiologia*, 289: 119-137.

Billen, G., J. Garnier, 1999. Nitrogen transfer through the Seine drainage network: a budget based on the application of the RIVERSTRAHLER Model. *Hydrobiologia*, 410: 139-150.

Brett J. R. et Higgs D. A., 1970. Effect of temperature on the rate of gastric digestion in fingerling Sockeye Salmon, *Oncorhynchus nerka*, *J. Fish. Res. Board Can.*, vol.27, 1767-1779.

Brugeron A., Bessiere H., Bourguine B., Stollsteiner P., 2017. Etude méthodologique pour l'amélioration de la cartographie de sensibilité aux remontées de nappes et réalisation d'une carte nationale. Rapport BRGM/RP-65452-FR.

Burek P., Satoh Y., Fischer G., Kahil M.T., Scherzer A., Tramberend S., Nava L.F., Wada Y., 2016. Water Futures and Solution - Fast Track Initiative (Final Report). IIASA Working Paper. IIASA, Laxenburg, Austria: WP-16-006

Caissie, D., El-Jabi, N., St-Hilaire, A., 1998. Stochastic modelling of water temperatures in a small stream using air to water relations, *Can. J. Civ. Eng.*, 25, 250-260,

Caissie D., 2006. The thermal regime of rivers : A review. *Freshwater Biology*, 51,1389–1406.

Cantat O., Laignel B., Nouaceur Z., Costa S., 2020. Changement climatique et Aléas météorologiques. Rapport GIEC normand, 39 p.

Chevalier L., Laignel B., Massei N., Munier S., Becker M., Turki I., Coynel A., Cazenave A., 2014. Hydrological variability of major French rivers over the past decades, assessed from gauging stations and GRACE observations. *Hydrol. Sci. J.-J. Sci. Hydrol.*, 59, 10, 1844-1855.

Comte L., Buisson L., Daufresne M. et Grenouillet G. 2013. Climate-induced changes in the distribution of freshwater fish : observed and predicted trends. *Freshwater Biology*, 58, 625-639.

Coiset N., Le Cozannet G., Laurent A., 2016. Vulnérabilité des aquifères côtiers aux intrusions salines en Normandie occidentale. Utilisation du modèle hydrodynamique de la plaine de Caen et du bassin de la Dives. Rapport BRGM/RP-66229-FR, 57 p.

Daufresne M., M. C. Roger, H. Capra et N. Lamouroux, 2003. Long term changes within the invertebrate and fish communities of the upper Rhone River : effects of climate factors. *Global change Biology* 10:124-140

David P.Y., Charlier J.B., Ladouche B., Cary L., Pennequin D., Meire B., Schaefer I., Hugot V., 2017. Observatoire de la Risle moyenne – Volets n°2, 3, 4 et 5 : Etude de l'hydro-système Risle-Nappe de la craie. Rapport final. BRGM/RP-67480-FR, <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-67480-FR.pdf>, 111 fig., 10 tabl., 11 ann., 225 p.

Dayon G., 2015. Evolution du cycle hydrologique continental en France au cours des prochaines décennies. Thèse Doctorat, Univ. Toulouse III, 209 p.

Ducharne A, Baubion C, Beaudoin N, Benoit M, Billen G, Brisson N, Garnier J, Kieken H, Lebonvallet S, Ledoux E, Mary B, Mignolet C, Poux X, Sauboua E, Schott C, Théry S, Viennot P, 2007. Long term prospective of the Seine river system: Confronting climatic and direct anthropogenic changes. *Science of the Total Environment*, 375/1-3 : 293-312, 10.1016/j.scitotenv.2006.12.011.

Vérifier dans le texte

Ducharne, A., 2008. Importance of stream temperature to climate change impact on water quality. *Hydrology and Earth System Science*, 12, 797-810.

Ducharne A, Habets F, Déqué M, Evaux L, Hachour A, Lepaillier A, Lepelletier T, Martin E, Oudin L, Pagé C, Ribstein P, Sauquet E, Thiéry D, Terray L, Viennot P, Boé J, Bourqui M, Crespi O, Gascoin S, Rieu J, 2009 - Rapport final du Projet REXHySS : Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme. www.sisyphe.jussieu.fr, 62 p.

Dufoyer A., Massei N., Lecoq N., Maréchal J.-C., Thiéry D., Pennequin D., David P.-Y., 2019. Links between karst hydrogeological properties and statistical characteristics of spring discharge time series: a theoretical study. *Environmental Earth Sciences*, 78(14):400

Duran L., Fournier M., Massei N., Dupont J.-P., 2016. Assessing the Nonlinearity of Karst Response Function under Variable Boundary Conditions. *Groundwater*, 54(1):46-54

Ebersole J.L., Liss W.J. et Frissell C.A., 2001. Relationship between stream temperature, thermal refugia and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* abundance in arid-land streams in the northwestern United States. *Ecology of Freshwater Fish*, 10, 1–10.

Fisson C., Lemoine J.P., Gandilhon F., 2014. Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation en estuaire de Seine. Synthèse. 32 p.

Fisson C., Lemoine J.P., Gandilhon F., Schaguene J., David E., 2016. Référentiel ligne d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine : concertation, analyses statistiques et modélisation. *La Houille Blanche*, 1, 30-39.

Flipo N., Gallois N., Labarthe B., Baratelli F., Viennot P., 2020. Pluri-annual water budget on the Seine basin : past, current and future trends. Flipo N., Labadie P., Lestel L. *The Seine River Basin*, Springer, 2020, Handbook of environmental chemistry, 10.1007/698-2019-392.

Fritier, N, Massei, N, Laignel, B, Durand, A, Dieppois, B, Deloffre, J, 2012 - Links between NAO fluctuations and inter-annual variability of winter-months precipitation in the Seine River watershed (north-western France). *C.R. Geoscience*, 344, 8, 396-405.

Gaaloul N., Laignel B., Nouacer Z., Habaieb H., 2015. Impact des changements climatiques sur les eaux souterraines en Tunisie. *Revue Géologues*. Numéro 187. Décembre 2015.

Gallois N., Viennot P., 2018. Modélisation de la pollution diffuse d'origine agricole des grands aquifères du bassin Seine-Normandie : Préparation de l'état des lieux AESN 2019, rapport technique d'étude ARMINES/MINES ParisTech, Octobre 2018 : Scénarios d'évolution climatique (MINES ParisTech), 105 p., Actualisation des modélisations couplées STICS-MODCOU et modélisation de scénarios agricoles sous changement climatique, 245 p.

Garnier J., G. Billen, M. Coste., 1995. Seasonal succession of diatoms and chlorophyceae in the drainage network of the River Seine : Observations and modelling. *Limnology. & Oceanography*, 40: 750-765.

Gouault R., Deloffre J, Laignel B. 2020. Évolution long-terme des débits des rivières de Normandie. Mémoire de Licence 3 Sciences de l'Environnement de Gouault R. encadré par Deloffre J. et Laignel B., Département Géosciences et Environnement, Université de Rouen Normandie, 26 p.

Graff, 2020. Contribution à la cartographie multirisques de territoires côtiers : approche quantitative des conséquences potentielles et des concomitances hydrologiques (Normandie, France). Thèse de Doctorat, Université de Caen Normandie et Université de Rouen Normandie, 425 p.

Gresselin F., Dardaillon B., Parais F., Kauffmann F., Bordier C. 2018. Le rôle des eaux souterraines dans la régulation du cycle thermique des rivières : l'exemple de la Touques et de l'Orne. *Géologues*, 199, 42-46.

Gresselin F., Dardaillon B., Bordier C., Parais F. et Kauffmann F., Soumis. Use of statistical methods to characterize the influence of groundwater in the thermal regime of rivers in Normandy (France). Comparison between a river influenced by the chalk table in the Paris Basin, the Touques, and another not, the Orne. Soumis à Société géologique de Londres.

IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.

IPCC, 2013. Changements climatiques 2013. Les éléments scientifiques. Résumé à l'intention des décideurs. 34 p.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Kazmierczak L., Laignel B., Charrier F., 2019. La ressource en eau et le risque inondation dans la Métropole rouennaise : constat et analyse prospective dans un contexte de changement climatique. Rapport du GIEC local pour la Métropole Rouen Normandie, 24 p.

Kopp, R.E., R.M. DeConto, D.A. Bader, C.C. Hay, R.M. Horton, S. Kulp, M. Oppenheimer, D. Pollard, and B.H. Strauss, 2017: Evolving understanding of Antarctic ice-sheet physics and ambiguity in probabilistic sea-level projections. *Earth's Future*, 5, no. 12, 1217-1233, doi:10.1002/2017EF000663.

Kulp S.A., Strauss B.H., 2019. New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding. *Nature Communication*, 10, 4844.

Ladner J., Legrand C., Kazmierczak L., Charrier F. et al., 2020. Les enjeux de santé publique dans un contexte de changement climatique à l'échelle de la Métropole Rouen Normandie. Rapport du GIEC local pour la Métropole Rouen Normandie, p. 24.

Laignel B., Massei N., Rossi A., Mesquita J., Slimani S., 2010. Water resources variability in the context of climatic fluctuations on both sides of the Atlantic Ocean. *Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources*. Proc. of the Sixth World FRIEND Conference, Fez, Morocco, October 2010). IAHS Publ. 340, 612-619.

Laignel B. et collaborateurs, 2010. Les effets du changement climatique dans le contexte des changements globaux. Expertise collective sur l'estuaire de la Seine. Projet du programme Seine Aval, <http://seine-aval.crihan.fr/web/>, 58 p.

Laignel B., 2012. Enregistrement et effets du climat sur les stocks d'eau de l'échelle globale à régional (bassin de la Seine). *Bulletin des Sciences Géographiques*, Alger, 27, 2-22.

Laignel B., Nouaceur Z., 2018. Évolution du climat à l'échelle de la Métropole Rouen Normandie. Rapport du GIEC local de la Métropole Rouen Normandie, 24 p.

Laurent A., Le Cozannet G., Couëffé R., Schroetter J.M., Croiset N., Lions J., 2017. Vulnérabilité des aquifères côtiers aux intrusions salines en Normandie occidentale. Rapport BRGM/RP-66052-FR, 189p.

Lemoine J.P., 2015. Analyse par modélisation de l'impact de l'élévation du niveau marin sur les niveaux de pleine mer dans l'estuaire de la Seine. Étude réalisée par le GIP Seine-Aval, 34p.

Magnuson J.J., Crowder L.B. et Medvick, P. A. 1979. Temperature as an ecological resource. *Am Zool*, 19, 331-343.

Massei N., Wang H.Q., Dupont J.P., Rodet J., Laignel B., 2003 - Assessment of direct transfer and resuspension of particles during turbid floods at a karstic spring. *Journal of Hydrology*, 275, 109-121.

Massei N., Laignel B., Deloffre J., Mesquita J., Motelay A., Lafite R., Durand A., 2009 - Long-term hydrological changes of the Seine river flow (France) and their relation to the North Atlantic Oscillation over the period 1950-2008. *International Journal of Climatology*, 30, 14, 2146-2154.

Massei N., Dieppois B., Hannah D.M., Lavers D.A., Fossa M., Laignel B., Debret M., 2017. Multi-time-scale hydroclimate dynamics of a regional watershed and links to large-scale atmospheric circulation: Application to the Seine river catchment, France. *Journal of Hydrology*, 546, 262-275 ; DOI : 10.1016/j.jhydrol.2017.01.008.

Patault, E., Ledun, J., Landemaine, V., Soullignac, 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, 356 p.

Rivière A., Flipo N., Thomas W., Ducharme A., Cucchi K., Berrhouma A., Kiliç D., Seraphin P., Gallois N., Baudin A., Marlot L., 2018. Régime thermique d'un hydrosystème. Colloque annuel du PIREN-Seine, 4 et 5 octobre 2018.

Slimani, S., 2009. Les fonctionnements hydrologiques de l'aquifère karstifié de la Craie de Haute-Normandie: conséquences des contextes morphologiques et structuraux. Thèse Doctorat, Univ. Rouen, 261 p.

Slimani S., Massei N., Dupont J.P., Valdès D., Mesquita J., Laignel B., 2009 - Combined climatic and geological forcings on the spatio-temporal variability of piezometric levels in the chalk aquifer of Upper Normandy (France) at pluridecennial scale. *Hydrogeology Journal*. DOI 10.1007/s10040-009-0488-1.

Stefan, H.G., Preud'homme, E.B., 1993. Stream temperature estimation from air temperature, *Water Resources Bulletin*, 29, 27-45.

Stollsteiner P., 2012. Projet Explore 2070 - Evaluation de l'impact du changement climatique. BRGM/RP-61483-FR, Vol. 1, 53 p.

Tseitlin V.B., 1980. Duration of gastric digestion in fishes. *Mar. Ecol. Progr.*, 2, 277–280.

Valdes D., Dupont J.P., Laignel B., Ogier S., Leboulanger T., Mahler B.J., 2007 - A spatial analysis of structural controls on karst groundwater geochemistry at a regional scale. *Journal of Hydrology*, 340, (3-4): 244-255.

Valdès d, Dupont jp, Laignel b, Slimani s, Delbart C, 2014. Infiltration processes in karstic chalk investigated through a spatial analysis of the geochemical properties of the groundwater : the effect of the superficial layer of clay-with-flints. *Journal of Hydrology*, 519, 23-33.

Vernoux J.F., Seguin J.J., 2011. Etablissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines - année 1, rapport BRGM/RP-59286-FR, <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-59286-FR.pdf>, 69 fig., 27 tabl., 4 ann., 131 p.

Vernoux J.F., 2015. Réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines. Rapport BRGM/RP-64858-FR, 18 fig., 7 tabl., 1 ann., 51 p.

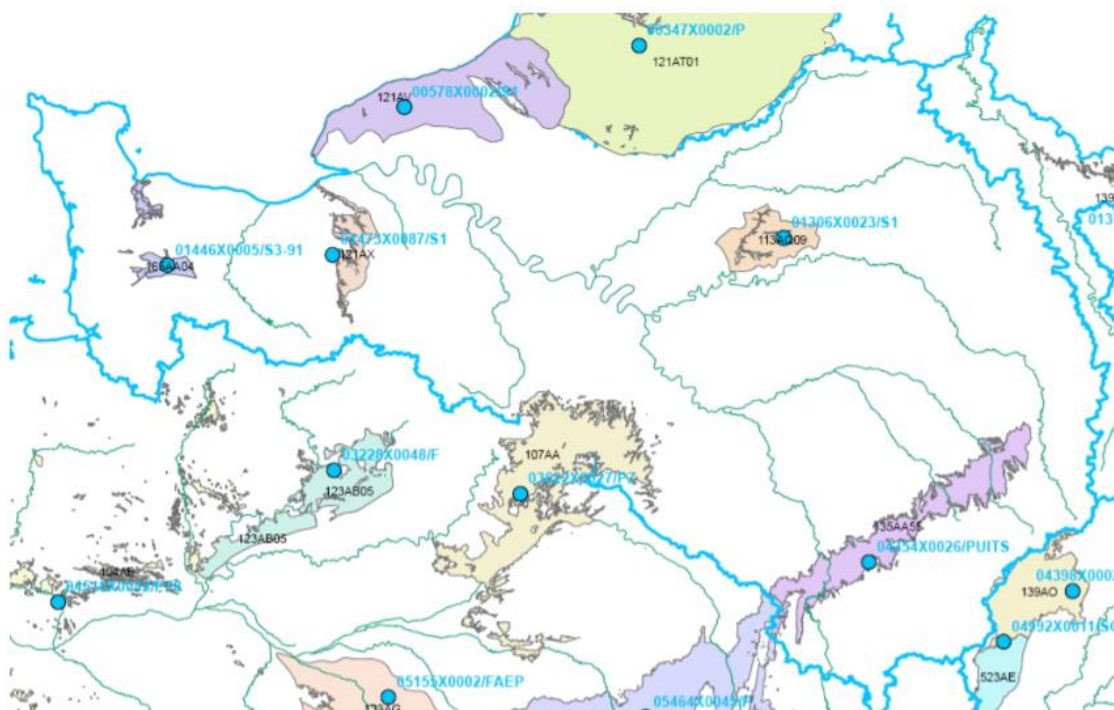
Webb, B.W., Nobilis, F., 1997. Long-term perspective on the nature of the air-water temperature relationship: a case study, *Hydrol. Proc.*, 11, 137-147.

Wieser W., Frostner H., Schiemer F. et Mark W., 1988. Growth Rates and Growth Efficiencies in Larvae and Juveniles of *Rutilus rutilus* and Other Cyprinid Species : Effects of Temperature and Food in the Laboratory and in the Field. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* • <https://doi.org/10.1139/f88-116>

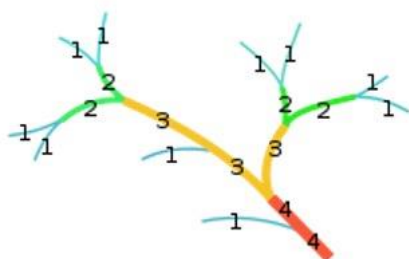
Wolter C., 2007. Temperature influence on the fish assemblage structure in a large lowland river, the lower Oder River, Germany. *Ecol. Freshwater Fish.*, 16, 493–503.

Annexe

Annexe 1 : Ouvrages intégrés au réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique (Vernoux, 2015).

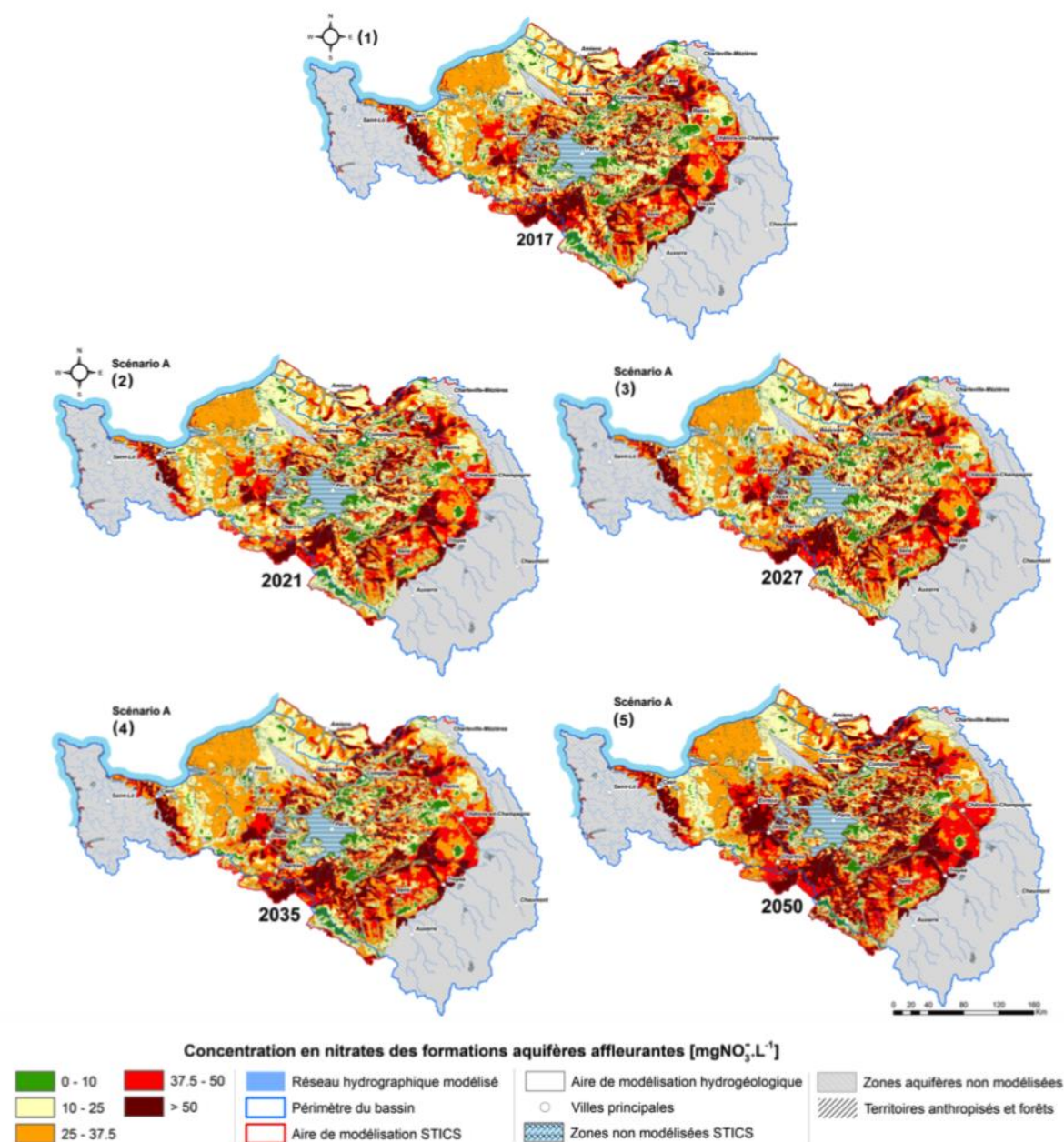


Annexe 2 : Détermination de l'ordre de Strahler d'un cours d'eau.



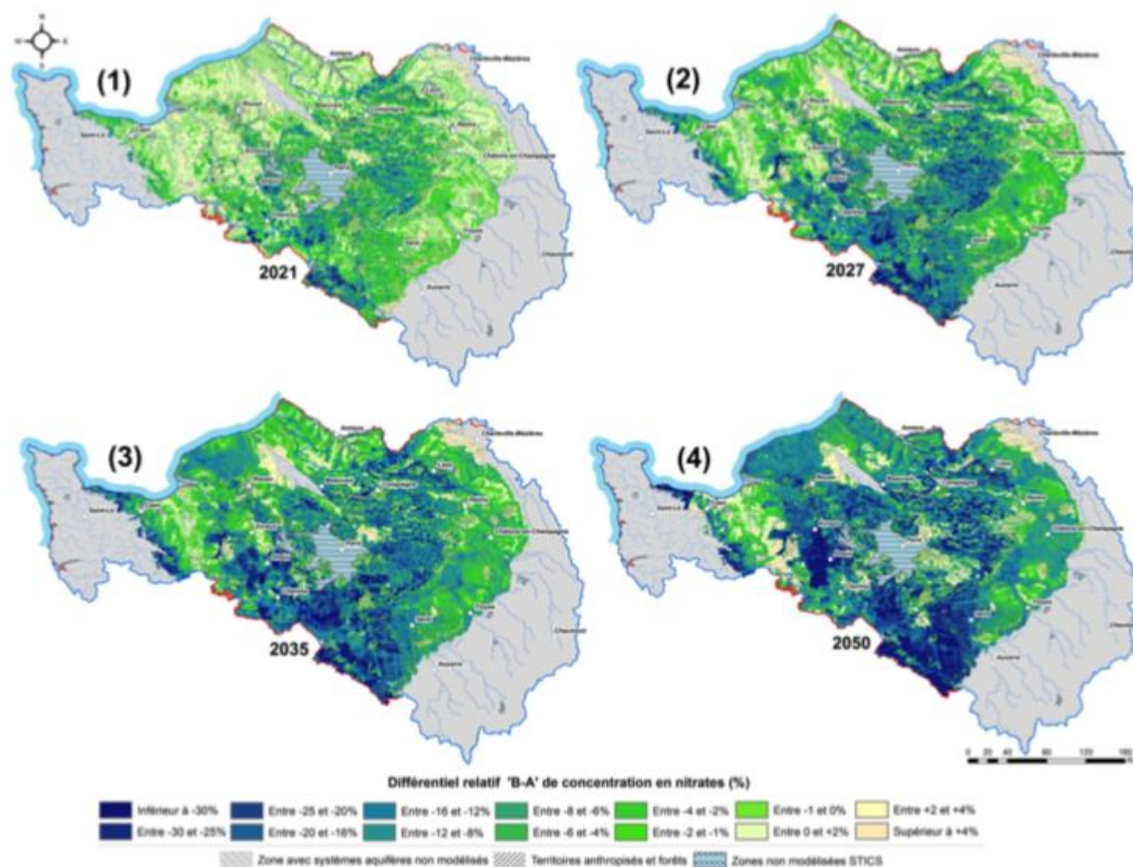
Annexe 3 : Concentrations en nitrates des formations aquifères affleurantes à différentes dates de simulation sous forçage agro-climatique A : (1) 2017, (2) 2021, (3) 2027, (4) 2035, (5) 2050.

Scénarios prospectifs proposés par Gallois et Viennot (2018) sur le bassin Seine Normandie en combinant le contexte de changement climatique avec deux scénarios d'évolution des pratiques agricoles sur les doses d'irrigation de nitrates : un scénario A basée sur la poursuite de la spécialisation et de l'intensification de l'agriculture représenté sur cette carte, un scénario B représentatif d'une agriculture avec un état de transition écologique, non représenté sur cette carte.

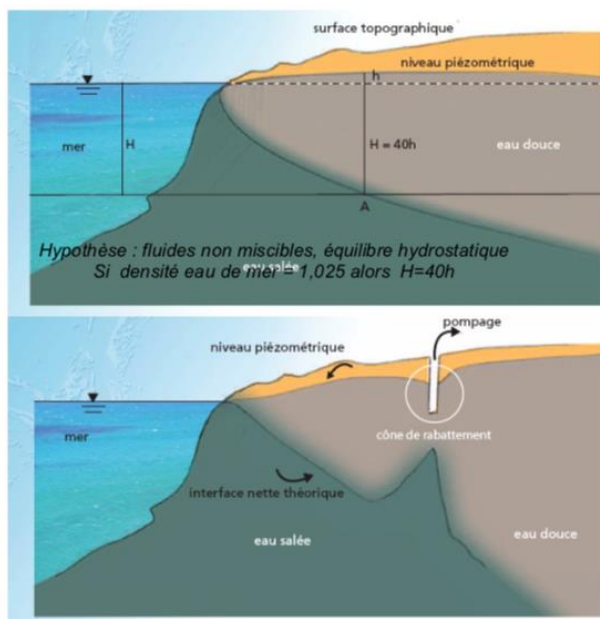


Annexe 4 : Variations relative (exprimé en pourcentage) des concentrations en nappes calculées sous forçage B par rapport à celle obtenues sous forçage A pour 4 dates de simulation : (1) 2021, (2) 2027, (3) 2035, (4) 2050.

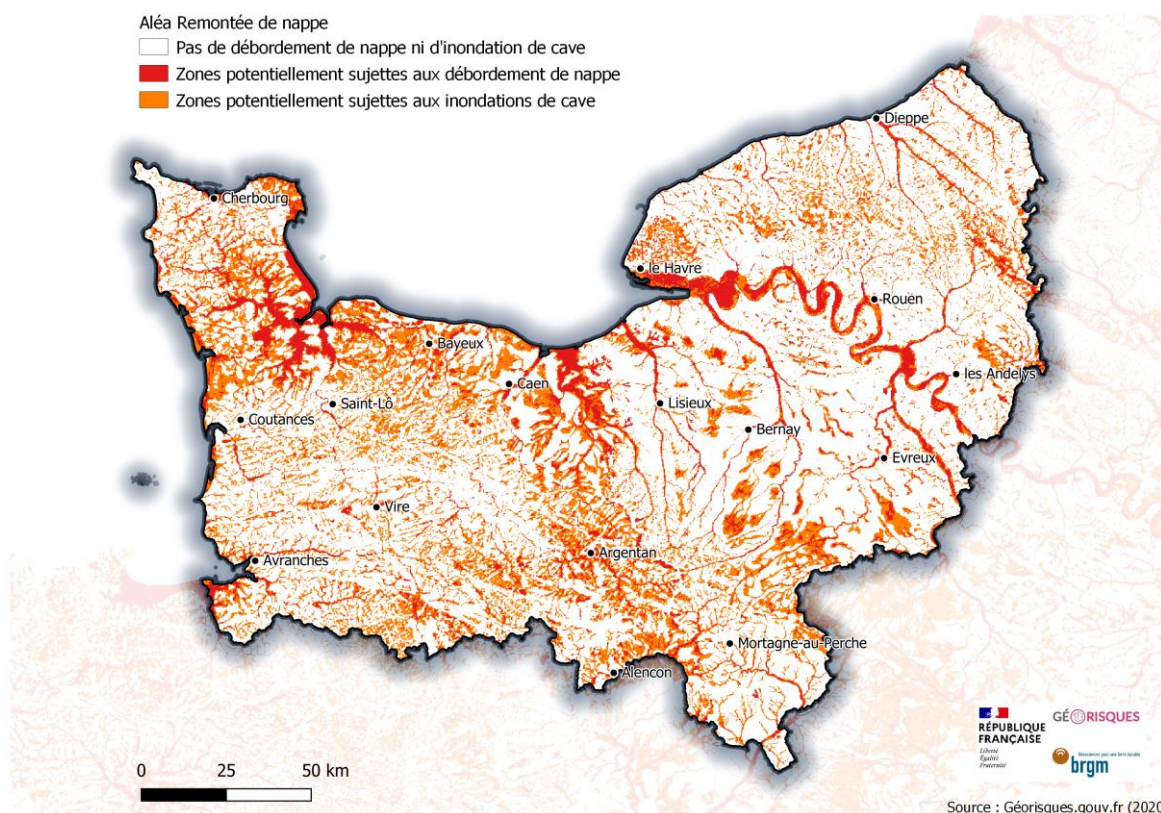
Scénarios prospectifs proposés par Gallois et Viennot (2018) sur le bassin Seine Normandie en combinant le contexte de changement climatique avec deux scénarios d'évolution des pratiques agricoles sur les doses d'irrigation de nitrates : un scénario A basée sur la poursuite de la spécialisation et de l'intensification de l'agriculture représenté, un scénario B représentatif d'une agriculture avec un état de transition écologique.



Annexe 5 : Phénomène d'intrusion marine et de salinisation des aquifères côtiers suite à l'élévation du niveau des mers et de la baisse du niveau des nappes (Source : Dörfli et Augeard).



Annexe 6 : Carte de sensibilité aux remontées de nappe en Normandie (Géorisques ; <https://www.georisques.gouv.fr/> ; <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-65452-FR.pdf> ; Brugeron et al., 2017).



Annexe 7 : Carte des zones prédisposées aux inondations par débordement de nappe phréatique en Normandie (Source : Services de l'État).

Cette cartographie est disponible et téléchargeable en ligne depuis 2007 pour la Normandie occidentale (http://carmen.application.developpement-durable.gouv.fr/8/risques_naturels_inondation.map). Elle n'a pas encore été portée à la connaissance du public et des collectivités en Normandie orientale.

