



La **ressource** en eau et le risque d'**inondation** dans la Métropole rouennaise :

constat et analyse prospective dans un
contexte de changement climatique

**RÉFÉRENTS GIEC
LOCAUX**

Benoît LAIGNEL
Zeineddine NOUACEUR

AUTEURS

Léo KAZMIERCZAK
Benoît LAIGNEL
Zeineddine NOUACEUR
Frédéric CHARRIER

CONTRIBUTIONS

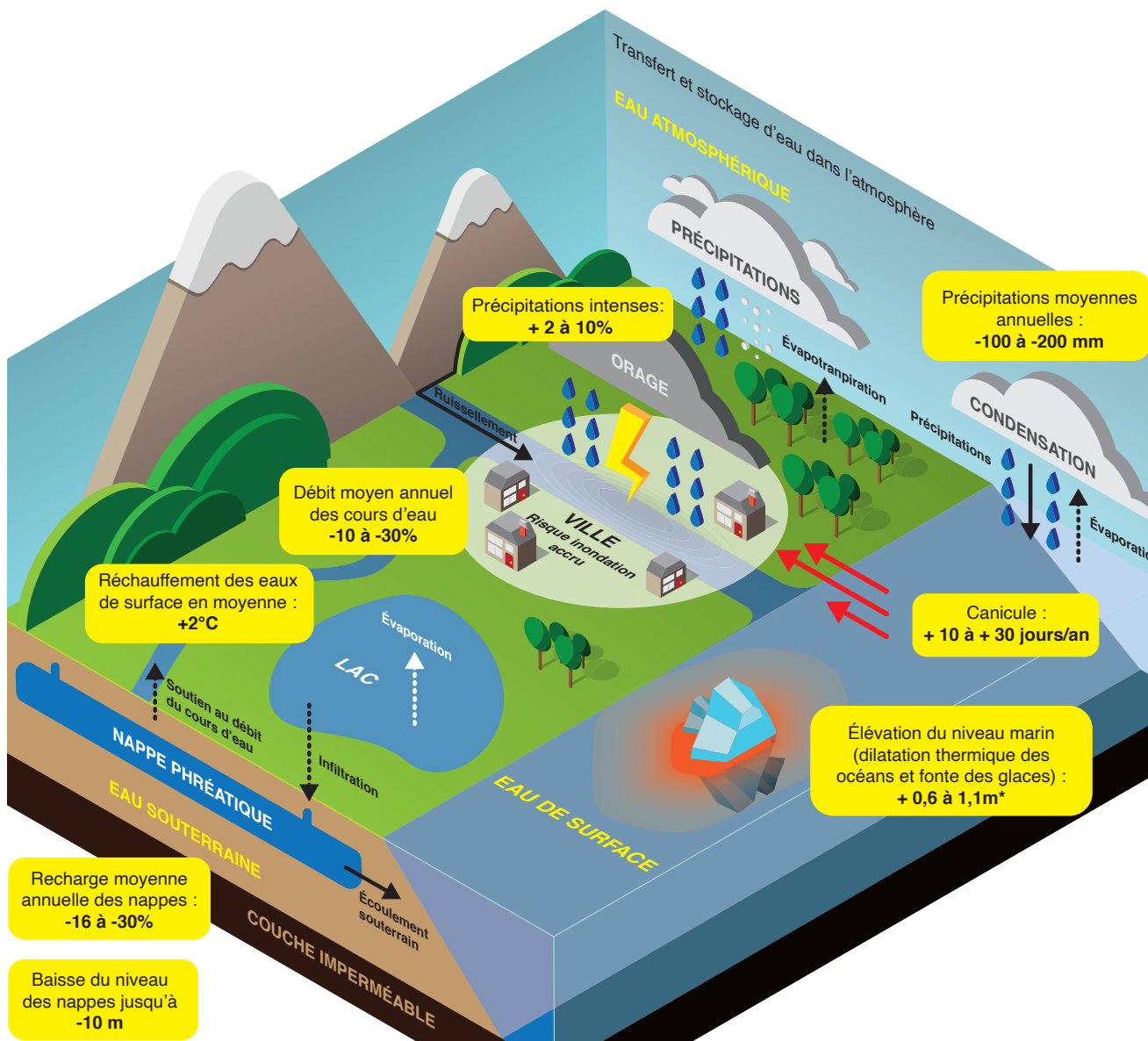
Delphine JACONO
(Agence de l'Eau Seine Normandie)
Jean-Philippe LEMOINE
(Groupement d'Intérêt Public Seine Aval)
Sophie MAILLOT
(Métropole Rouen Normandie)

Sommaire

RÉSUMÉ	5
CONSTAT	6
ÉVOLUTION QUANTITATIVE DES RESSOURCES	8
Évolution des eaux de surfaces : débit de la Seine et des rivières	8
Évolution des eaux souterraines	10
CRUES ET INONDATIONS	12
ÉVOLUTION DE LA QUALITÉ DE L'EAU	16
CONCLUSION	18
RECOMMANDATIONS POUR L'AMÉLIORATION DES CONNAISSANCES	19
BIBLIOGRAPHIE	20

Résumé

IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE CYCLE DE L'EAU À L'ÉCHELLE DE LA NORMANDIE À L'HORIZON 2100



À l'échelle de la Métropole Rouen Normandie, les effets du changement climatique sur la ressource en eau sont multiples : augmentation de la température atmosphérique entraînant un réchauffement de l'eau des cours d'eau, diminution du débit moyen annuel de la Seine et des rivières, baisse de la recharge moyenne annuelle et du niveau des nappes d'eau souterraine, élévation du niveau marin...

Ces changements auront des répercussions au niveau de la Seine et de ses affluents, et des eaux souterraines (nappe de la craie) dans lesquels s'effectuent les prélèvements. Il en résulterait des restrictions plus importantes et de plus en plus fréquentes, générant en conséquence des conflits d'usage entre l'industrie, l'alimentation en eau potable et les activités agricoles.

De plus, sous l'effet de l'augmentation des épisodes de précipitations extrêmes et du phénomène de blocage des écoulements par la remontée du niveau marin, la vulnérabilité au risque inondation de la Métropole pourrait s'accroître, exposant une part plus importante de la population.

Enfin, le réchauffement de l'eau et la diminution des débits de la Seine et des rivières affecteront la qualité de l'eau, ainsi que les milieux et la vie aquatiques. Cet impact sur la biodiversité fera l'objet d'une synthèse spécifique par le GIEC local.

*Les chiffres de l'élévation du niveau de la mer correspondent à une augmentation médiane de + 60 cm (si la hausse des températures est limitée à + 2°C) et à + 110 cm dans le cas d'un réchauffement global de + 5°C et avec un risque de 5% d'atteindre 2,38 m.

Le scénario optimiste du GIEC (RCP2.6) n'a été pris en compte dans ce résumé, à l'exception de l'élévation du niveau marin : il est estimé peu réaliste au regard des actions actuellement menées à l'échelle mondiale en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre, mais correspond au scénario de l'Accord de Paris. Les données présentées sont issues des anciens scénarios du GIEC A1B (médian) et A2 (pessimiste) (cf. synthèse du GIEC local sur l'évolution du climat et projets REXHYSS et EXPLORE 2070).

Constat

L'impact du changement climatique est déjà perceptible à l'échelle de la Métropole et sera accentué dans les décennies à venir. Des répercussions directes sont envisagées sur la quantité et la qualité de l'eau, deux paramètres essentiels pour définir l'évolution de la ressource en eau en adéquation avec les besoins. L'objectif de cette fiche de synthèse est de mieux comprendre, à l'échelle de la Métropole de Rouen, les incidences du changement climatique sur l'évolution des ressources en eau et des inondations en relation avec les facteurs qui en sont à l'origine (précipitations extrêmes, phénomènes de blocage de l'écoulement fluvial par la mer, etc...).

La quantité et la qualité de l'eau dans un territoire dépendent de deux paramètres principaux : le climat et les activités humaines.

Il est reconnu que le changement climatique bouleverse le cycle de l'eau en affectant les précipitations, l'infiltration et le ruissellement sur et dans les sols ainsi que l'évaporation, la sur-saturation de vapeur d'eau et la condensation dans l'atmosphère. Ces changements ont des conséquences sur les inondations, les sécheresses, le débit des cours d'eau et la recharge des nappes souterraines (GIEC, 2013). Localement, la synthèse réalisée par le GIEC local sur l'évolution du climat à l'échelle de la Métropole Rouen Normandie (Laignel et Nouaceur, 2018) indique à l'horizon 2100 :

- **Une augmentation des températures moyennes** annuelles (de l'air entre +1 à +6°C), et des eaux de surface d'environ 2°C en moyenne sur l'ensemble du bassin de la Seine,
- **Une baisse des précipitations annuelles** de l'ordre de -100 à -200 mm (selon les scénarios médians et pessimistes). Le scénario optimiste (RCP 2.6) montre une stabilité à une légère baisse des précipitations annuelles (-100 mm) ; ce scénario est toutefois considéré comme peu réaliste actuellement si les mesures pour limiter les gaz à effet de serre ne sont pas renforcées.
- **Un allongement des canicules** de 10 à 30 jours,
- **Une augmentation des précipitations extrêmes** de + 2% pour un scénario optimiste, et entre + 4 et 10% pour le scénario pessimiste,
- **Une augmentation du niveau marin** entre 0,6 à 1,1 m

L'évapotranspiration (transfert d'eau vers l'atmosphère par évaporation au niveau du sol et par transpiration des végétaux) joue aussi un rôle important dans le cycle de l'eau. Néanmoins, il est difficile d'évaluer son évolution car les modèles climatiques et hydrologiques montrent deux tendances différentes (Ducharne et al., 2009).

Les prélèvements réalisés par les activités humaines impactent également le cycle de l'eau. À l'échelle de la Métropole Rouen Normandie, trois usages sollicitent la ressource en eau dans le territoire (Figure 1) :

- le secteur industriel avec des besoins entre 2013 et 2016 qui ont atteint en moyenne 122 millions de m³ d'eau de surface (Seine et affluents) et 18 millions de m³ d'eau souterraine (nappe de la craie et alluviale). Ces prélèvements ont fortement baissé en 2014 avec environ 98 millions de m³ d'eau prélevés en surface (soit - 30 % par rapport à la moyenne observée).
- les usages domestiques et assimilés (notamment pour l'alimentation en eau potable et les activités raccordées au réseau - Figure 2) dont les besoins entre 2013 et 2016 se sont élevés en moyenne à 34 millions de m³ d'eaux prélevés exclusivement dans les nappes souterraines. La tendance dans l'évolution de ces besoins est à la stagnation voir à la diminution. Plusieurs raisons permettent de l'expliquer : l'évolution des comportements vis-à-vis de l'économie d'eau, et la diminution des pertes au sein des réseaux.
- Les prélèvements agricoles sont marginaux (< 50 000 m³) par rapport aux besoins industriels et domestiques et sont effectués exclusivement dans les eaux souterraines. Cela s'explique par le fait que les activités agricoles dans la Métropole nécessitent peu d'irrigation.

L'eau prélevée pour les usages domestiques et assimilés est ensuite traitée, après usage, à l'échelle de la Métropole par 21 stations d'épuration et 2 lagunes. L'eau traitée est alors rejetée dans le milieu naturel (4 rejets se font par infiltration et le reste dans les cours d'eau : 16 rejets en Seine, 2 au niveau de l'Austreberthe et 1 dans l'Aubette). En 2016, 37,9 millions de m³ d'eaux usées ont été traités et rejetés par les stations d'épuration avec une pluviométrie moyenne cumulée de 763 mm (moyenne de 12 pluviomètres réparties sur la Métropole). En incluant les réseaux d'eaux pluviales, on dénombre au total 214 points de rejets dont 126 en Seine. Lors de fortes précipitations, une partie des rejets est directement rejetée en Seine. Sur les 60 points suivis de l'ensemble des réseaux, ce volume a été évalué à environ 3,8 millions de m³.

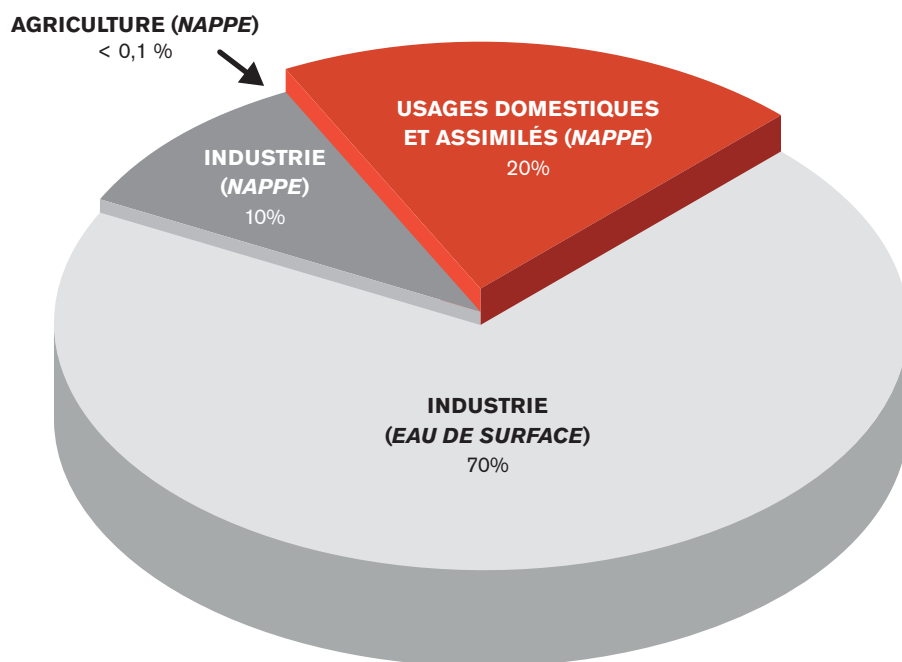


FIGURE 1 : Répartition des prélèvements en eau sur le territoire de la Métropole Rouen Normandie selon les usages et le lieu de prélèvement - Moyenne observée entre 2013 et 2016

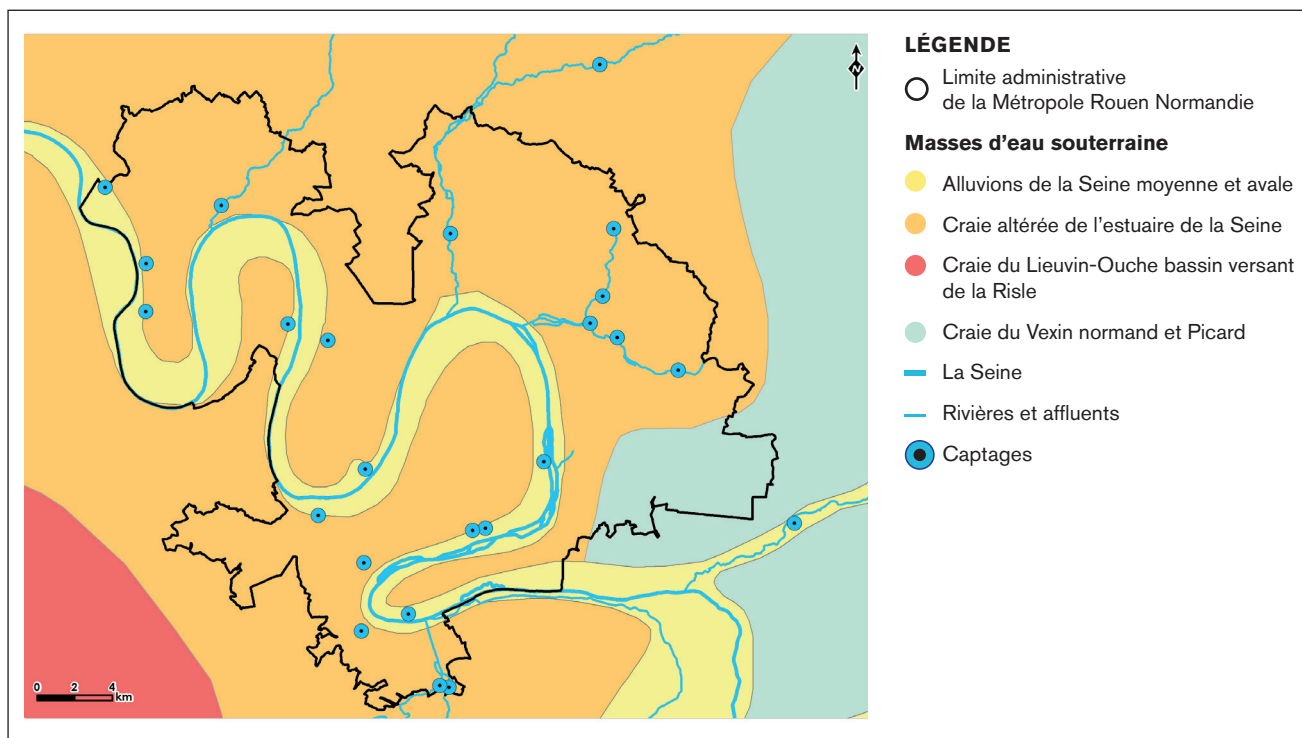


FIGURE 2 : Captages exploités pour l'alimentation en eau potable (AEP) de la Métropole

Évolution quantitative des ressources

Le changement climatique affectera quantitativement les ressources en eau de la Métropole Rouen Normandie à travers le changement des débits de la Seine et de ses affluents (Cailly, Austreberthe, Aubette et Robec...), et du niveau de la nappe de la craie.

ÉVOLUTION DES EAUX DE SURFACES : DÉBIT DE LA SEINE ET DES RIVIÈRES

Évolution récente

Depuis 1946 et selon la tendance ajustée, le débit moyen de la Seine mesuré à Poses a augmenté de + 10 à + 30 %. Cette évolution concerne également le débit moyen de la plupart de ses affluents et des rivières littorales. (Mesquita, 2009 ; Laignel et al., 2010, Laignel, 2012).

Projections

Les projections réalisées dans le projet RExHySS, selon 12 scénarios climatiques désagrégés et 6 modèles hydrologiques, ont montré, à l'horizon 2100, une baisse du débit moyen annuel des cours d'eau de 10 à 30 %, dont de la Seine à Poses de 28 % par rapport au débit actuel (soit 140 m³/s – Figure 3). Cette baisse se traduirait en été par des étiages plus sévères de la Seine (entre - 25 à - 45 %). Cette diminution serait cependant moins sensible en hiver (Stollsteiner, 2012). Ces projections sont basées sur les anciens scénarios d'émissions de gaz à effet de serre du GIEC (A1B - médian et A2 - pessimiste) et ont été reprises dans le cadre du projet EXPLORE 2070 qui a utilisé le scénario médian

A1B (Stollsteiner, 2012). Elles ont été confirmées par une étude plus récente qui s'est appuyée sur les nouveaux scénarios du GIEC (RCP) (Dayon, 2015 - Figure 4). Les incertitudes autour de cette valeur avoisinent les 50 m³/s (soit environ 10 % du débit moyen actuel) et proviennent d'abord des modèles climatiques, puis des modèles hydrologiques.

Malgré les incertitudes concernant l'amplitude de la diminution des débits de la Seine, les modèles restent robustes et confirment une baisse systématique. Cette perspective impliquerait des répercussions sur les prélèvements en eau - notamment du secteur industriel qui utilise majoritairement l'eau de la Seine - et sur la qualité physico-chimique des eaux. La vie aquatique au sein de la Seine et de ses affluents pourrait être alors affectée par une surconcentration de polluants (issus des rejets urbains) et de nutriments (provenant des activités agricoles) (cf. Évolution de la qualité de l'eau).

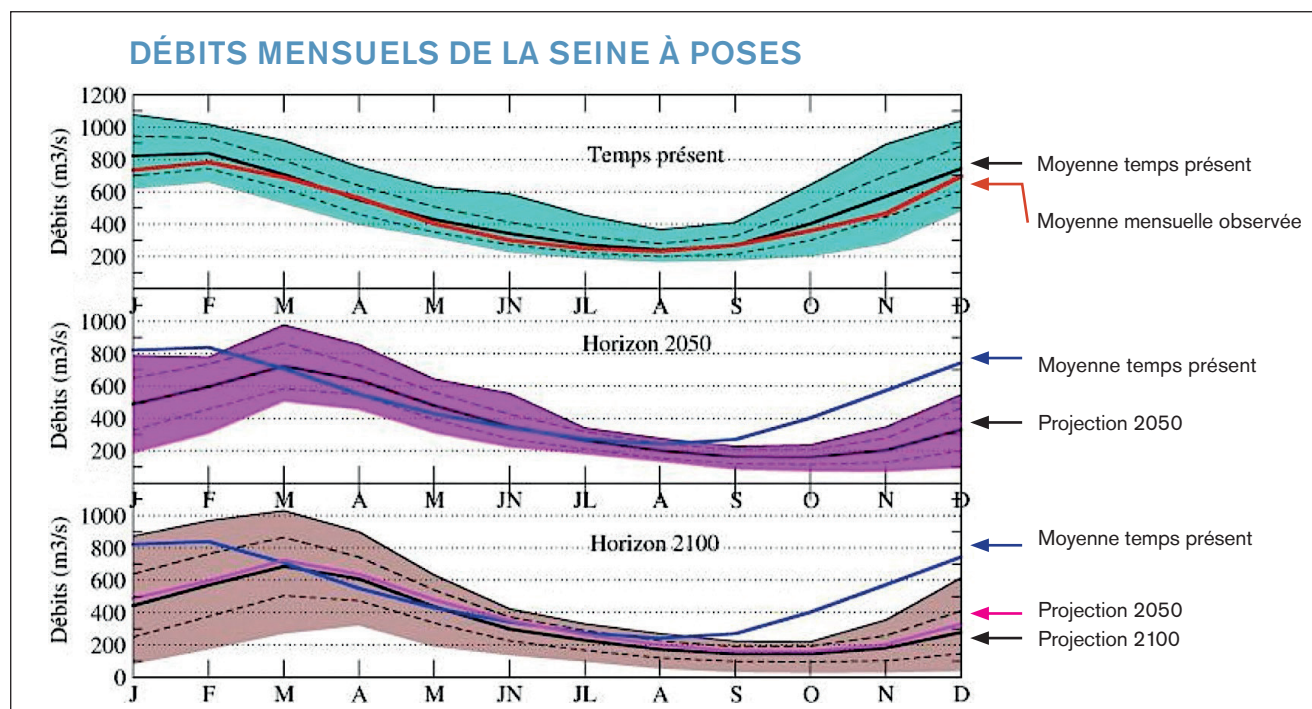


FIGURE 3 : Évolution des débits mensuels simulés pour la Seine à Poses dans le cadre du projet RExHySS (ensemble de 5 modèles hydrologiques et de 12 scénarios désagrégés). L'enveloppe représente les min et max simulés, le trait épais la moyenne de l'ensemble, et les pointillés l'enveloppe pour un écart-type (Source : Ducharne et al., 2009).

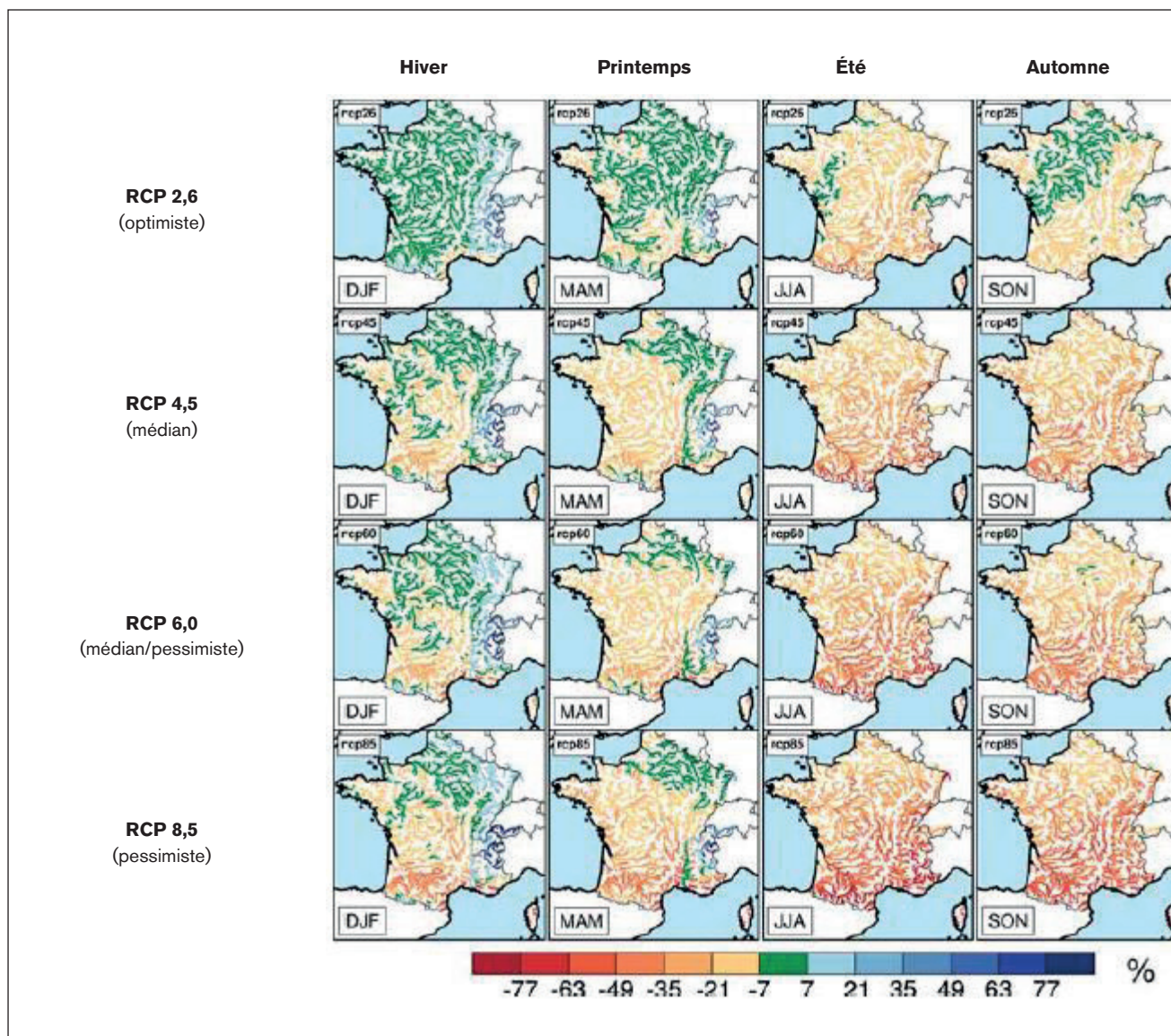


FIGURE 4 : Projection de l'évolution des débits moyens du réseau hydrographique français par saison (%) pour la fin du siècle (2070-2100) selon la période de référence 1960-1990 pour les quatre scénarios RCP, et obtenue avec le modèle MODCOU. Les saisons sont indiquées par les premières lettres des mois : DJF : Décembre-Janvier-Février, MAM : Mars-Avril-Mai, JJA : Juin-Juillet-Août SON : Septembre-Octobre-Novembre. (Source : Dayon, 2015).

ÉVOLUTION DES EAUX SOUTERRAINES

Connaître l'évolution de l'aquifère de la craie est essentiel : il assure le débit de base de la Seine et de ses affluents, ainsi que des rivières littorales, et constitue la ressource en eau potable du territoire (cf. Constat).

Évolution récente

Contrairement au débit de la Seine (à Poses) et de ses affluents, les tendances dans l'évolution piézométrique apparaissent beaucoup plus complexes (Slimani, 2009 ; Slimani et al., 2009 ; Laignel et al., 2010 ; Laignel, 2012). En effet, suivant la localisation géographique des piézomètres, la tendance du niveau de la nappe de la craie peut être à l'augmentation, à la stagnation, voire à la diminution. Les tendances ne sont d'ailleurs pas toujours significatives.

Projections

La réponse au changement climatique des principaux aquifères du bassin de la Seine (Craie, Eocène, Oligocène) a été simulée dans le cadre du projet RExHySS à l'aide

du modèle hydrogéologique MODCOU. Les 19 scénarios désagrégés testés mettent en avant **une baisse importante de la recharge de ces aquifères** (Ducharne et al., 2009). Cela se traduirait en 2050 par un déficit moyen annuel représentant environ 25 % de la recharge actuelle (2 200 millions de m³/an) et 30 % de la recharge d'ici 2100 (Ducharne et al., 2009).

Ces déficits de recharge sous changement climatique sont du même ordre de grandeur que les volumes actuellement prélevés sur la totalité du bassin de la Seine, tous usages confondus. Par conséquent, la pression sur la ressource en eau souterraine sera accentuée sur tout le bassin.

La diminution de la recharge entraînerait alors **une baisse sensible du niveau piézométrique** (rabattement de la nappe) dans l'ensemble des formations aquifères du bassin de la Seine (Figure 5). Selon le projet EXPLORE 2070, le rabattement de la nappe pourrait localement dépasser 10 mètres dans les zones de plateaux comme le Pays de Caux (Stollsteiner, 2012). **Ainsi, les zones de plateaux de la Métropole pourraient être également concernées par ce rabattement.**

Étant interconnectées, la réduction de la recharge des nappes engendrerait également une baisse du débit de base des rivières alimentées par ces nappes.

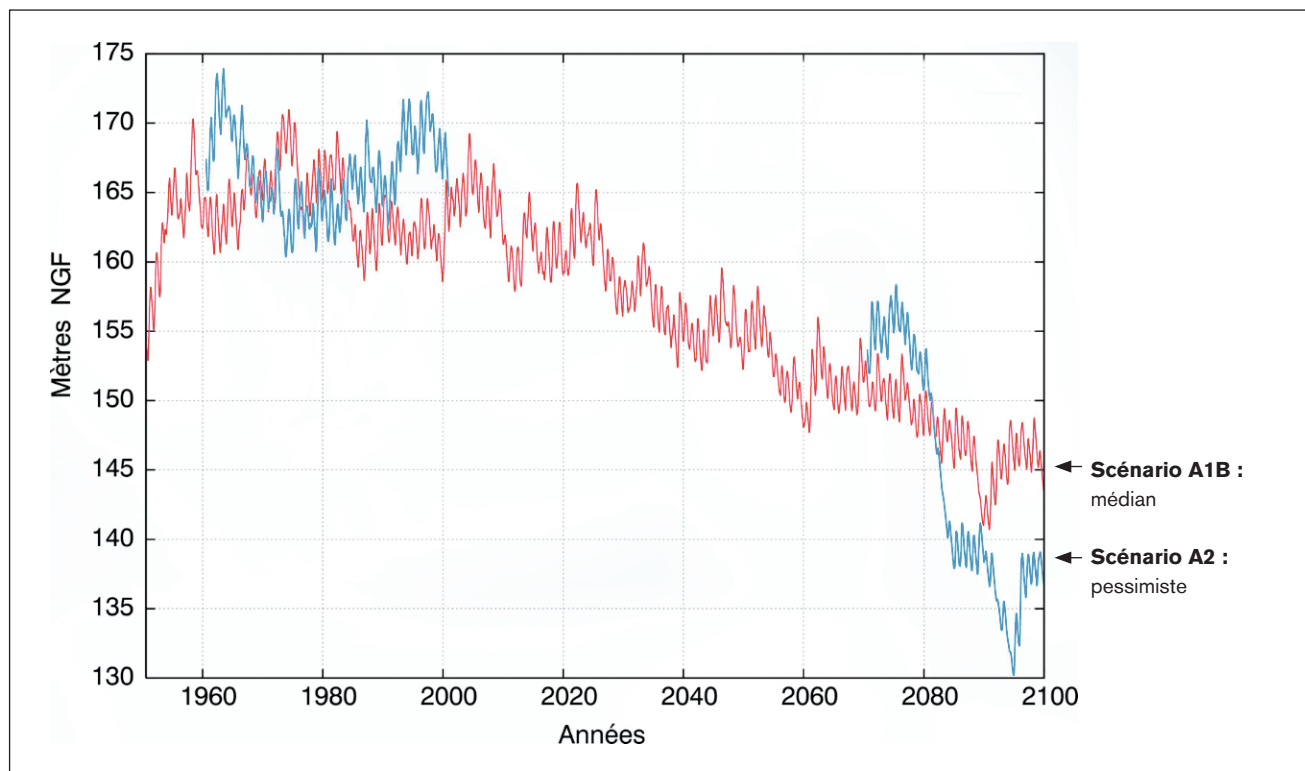


FIGURE 5 : Évolution de la piézométrie calculée dans la nappe de la Craie à Omécourt (Oise) par le modèle MODCOU, selon deux scénarios de changement climatique (modèle climatique ARPEGE, scénarios d'émissions A2 et A1B, méthode de désagrégation des Régimes de Temps) (Ducharne et al., 2009).

La probable diminution des ressources en eau souterraine (qui représente 30 % de nos prélèvements) pourrait engendrer des modifications dans les usages de l'eau, tous usages confondus, impactant l'alimentation en eau potable (dont la nappe est la principale ressource sur le territoire de la Métropole) et le secteur industriel. Des périodes de restriction en eau pourraient alors être renforcées et plus fréquentes. À titre d'exemple, dans le cas où les recharges hivernales s'avèreraient insuffisantes, des restrictions pourraient se produire plus tôt dans l'année, et pas uniquement en été (Figure 6). **La diminution en eau souterraine aurait alors une incidence sur les activités économiques consomma-**

trices en eau, ainsi que l'alimentation en eau potable, contraignant la Métropole à chercher davantage de gisements en eau potable.

Les modèles hydrologiques montrent aussi une plus grande fréquence des sécheresses agricoles, mais aussi un allongement de ces épisodes sur plusieurs mois en moyenne à l'horizon 2031-2060 pour les scénarios climatiques médian (RCP 4,5) et pessimiste (RCP 8,5). De plus, la sévérité de ces sécheresses s'amplifierait par rapport à celles de la période 1961-1990. (Boé et al., 2018). Cette perspective est en corrélation avec les projections sur l'allongement des canicules à l'échelle de la Normandie réalisées par le GIEC local (Lai-

gnel et Nouaceur, 2018 ; cf. Constat)

Le territoire de la Métropole semble actuellement moins soumis à ce phénomène de sécheresse, avec une agriculture faiblement irriguée et utilisant peu la ressource en eau souterraine. Ce constat ne vaut cependant que pour le temps présent. L'évolution du climat, et notamment l'augmentation des températures, pourrait amener l'agriculture normande à évoluer vers de nouvelles cultures dont les rendements sont meilleurs, mais également vers des cultures plus exigeantes en eau (ex. culture du maïs). Il est à noter que l'impact du changement climatique sur l'agriculture sera développé dans le cadre d'une synthèse du GIEC local dédiée à ce thème.

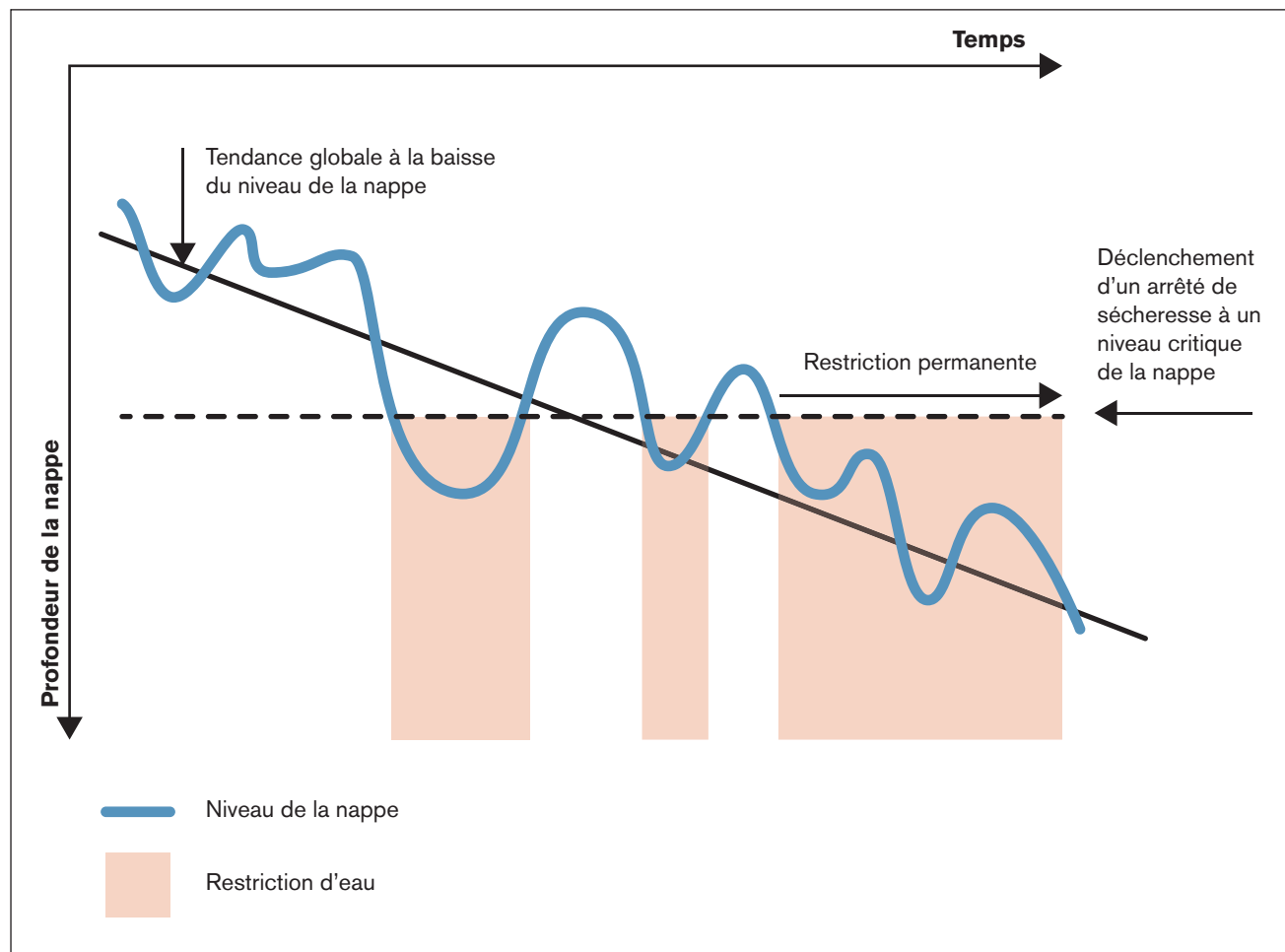


FIGURE 6 : Schéma illustrant les périodes de restriction en eau (lors d'arrêts de sécheresse) en fonction de l'évolution du niveau de la nappe phréatique

Crues et inondations

Le degré de vulnérabilité du territoire de la Métropole dépend du type d'évènement et la sensibilité des communes aux débordements et/ou aux inondations par ruissellement (Figure 7). Les coûts engendrés par les inondations selon le type d'évènement peuvent aussi varier. À titre d'exemple, les dommages causés par les inondations ont été évalués en moyenne à 860k€ par commune à l'échelle nationale lors de l'épisode de juin 2016, et entre 1 et 6 millions € pour la Seine maritime pour la crue de janvier-février 2018. (CCR, 2016 ; CCR, 2018).

ÉVOLUTION RÉCENTE

Un inventaire des principales inondations historiques recensées a été réalisé par le Groupement d'Intérêt Public (GIP) Seine-Aval grâce aux archives. Ce travail a montré que **les inondations et les submersions ne sont pas des épisodes exceptionnels**, et a ensuite permis de classer les événements qui en sont à l'origine en trois types (ARTELIA & GIP SA, 2013a, Fisson et al., 2014) :

- Les événements de type **fluvial** engendrés par une crue de la Seine et qui ont un impact sur les niveaux d'eau en amont de l'estuaire. Les archives datant des XII^e et XIII^e siècles ont montré que les crues de la Seine n'étaient pas des événements exceptionnels alors que la boucle de Poses était encore peu urbanisée. Les crues de 2001, 2013, juin 2016 sont des exemples récents de ce type d'évènement.
- Les événements de type **maritime** résultant de tempêtes accompagnées de forts coefficients de marée. Les impacts sur les niveaux d'eau sont plus marqués à l'aval de Heurteville. Les événements janvier 1999, 2004, 2008, 2010 en sont des exemples.
- Les événements de type **fluvio-maritime**

résultant à la fois d'un débit important de la Seine et d'une tempête. Les exemples de décembre 1999, 2002, et février 2018 correspondent à type d'évènement.

Un quatrième évènement renvoie aux inondations des communes éloignées de la Seine survenant **sous l'effet du ruissellement** aggravé par l'urbanisation et la battance des sols, et de la remontée de la nappe phréatique.

PROJECTIONS

L'évolution de climat en Normandie à l'horizon 2100 (Laignel et Nouaceur, 2018) indiquent une stabilité ou une augmentation des précipitations extrêmes de + 2 % pour le scénario optimiste, mais peu réaliste actuellement au regard des émissions de gaz à effet de serre, et une augmentation entre + 4 % et + 10 % pour le scénario pessimiste. Ces fortes précipitations pourraient accroître les phénomènes de crues et d'inondations, avec une participation moindre à l'infiltration et à la recharge des nappes. Les risques d'inondation seraient d'autant plus importants dans les secteurs urbanisés : sans modifications majeures de l'occupation des sols, il semble en effet fort probable que les crues et les inondations s'accroissent.

En estuaire de Seine, un autre phénomène doit être pris en compte dans la survenue d'une inondation. Il s'agit du blocage de l'écoulement de l'eau du fleuve par la marée, phénomène d'autant plus fort lorsque les marées sont importantes. Il est aussi fortement probable que des inondations ponctuelles dues à ce processus de blocage renforcé par l'élévation du niveau marin soient plus fréquentes.

Afin de mieux appréhender le risque inondation à l'échelle de l'estuaire de Seine, une étude a été lancée par le GIP Seine Aval vi-

sant à définir l'occurrence et les niveaux d'eau à prendre en compte dans sa gestion selon plusieurs scénarios (Fisson C., Lemoine J.-P., 2016) :

- en conditions actuelles,
- en prenant en compte une élévation du niveau marin de 60 cm,
- en considérant des murets de protection contre les inondations.

Cette étude a révélé que les zones les plus sensibles aux débordements de la Métropole Rouen Normandie étaient localisées près des boucles de la Seine.

(ARTELIA & GIP Seine-Aval, 2013b et 2014 ; Fisson et al., 2014). Il subsiste toutefois des incertitudes concernant la représentation de l'étendue spatiale des inondations dans le lit majeur.

En conséquence, le risque d'inondation sera aggravé par deux phénomènes : l'augmentation des précipitations extrêmes et l'élévation du niveau marin. Le changement climatique conduirait ainsi à une augmentation de la fréquence et de l'impact des inondations, affectant les populations et les infrastructures. La Stratégie locale de gestion des risques inondation du Territoire à Risque important d'Inondation (TRI) Rouen-Louviers-Austreberthe (DREAL, 2014) montre que la population exposée en permanence et les emplois en zone inondable augmenteraient avec une crue de probabilité moyenne avec une prise en compte de l'élévation du niveau moyen de la mer à l'échéance 100 ans. À l'échelle européenne, une étude publiée en 2018 dans la revue Climate estime que ces dommages coûteraient de l'ordre de 15 milliards d'euros par an pour un scénario d'élévation de la température de + 1,5°C. Le nombre de personnes affectées augmenterait alors de 86%. (Alfieri et al., 2018).

² La Métropole Rouen Normandie est située dans l'estuaire de la Seine délimité en amont par le barrage de Poses et en aval par la baie de la Seine. S'étendant sur 170 km, il se distingue en trois parties : l'Estuaire amont composé d'eaux douces (de Poses à Vieux-Port), l'Estuaire moyen où les eaux douces et salées se mélangent (de Vieux-Port à Honfleur) et l'Estuaire aval composé d'eaux salées (à partir de Honfleur). Lieu de rencontre entre le débit de la Seine et la marée, l'estuaire constitue un milieu dynamique qui évolue en permanence.

³ Le marégraphe du Havre a enregistré une augmentation moyenne du niveau

marin de l'ordre de 1,69 mm/an (+/- 0,4 mm/an) depuis 1938 et de 2,19 mm/an (+/- 1,5 mm/an) depuis 1993 (Pirazzoli, 2008 ; DREAL HN, 2011). Au final, cela représente en moyenne + 13 cm depuis 1938 (Source : GIP Seine-Aval, à partir des données du réseau SONEL). Une étude très récente de l'Académie américaine des sciences (PNAS) prévoit une augmentation médiane du niveau marin entre + 69 cm (si la hausse des températures est limitée à + 2 °C) et + 111 cm dans le cas d'un réchauffement global de + 5 °C et avec un risque de 5 % d'atteindre 2,38 m.

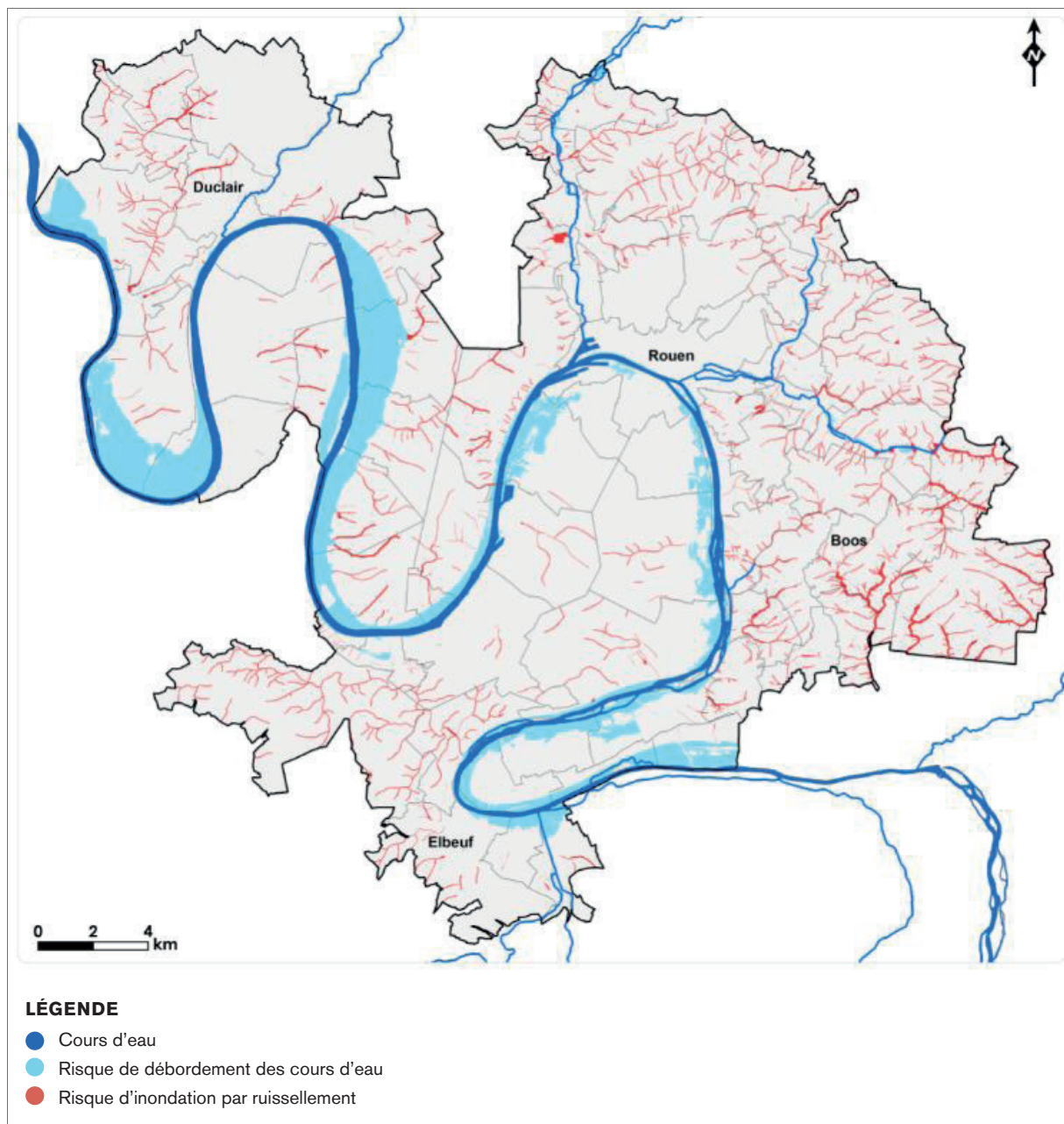


FIGURE 7 : Risques d'inondation sur le territoire de la Métropole Rouen Normandie

Suite au projet « Les effets du changement climatique dans le contexte des changements globaux. Expertise collective sur l'estuaire de la Seine » du programme Seine-Aval, le GIP Seine-Aval a réalisé une projection de ce que pourrait devenir l'embouchure en termes de zones inondées à partir du MNT⁴ de l'embouchure de la Seine montrant un passage de la cote 8 CMH (niveau moyen de pleine mer en vive-eau, Figure 9.a) à la cote 9 CMH (Figure

9.b). Ce chiffre de + 1 m correspond à une élévation du niveau marin de 60 cm auquel s'ajoute une augmentation de 40 cm selon le phénomène de surcotes. Cependant, il ne s'agit que d'une simple image qui ne doit être en aucun cas considérée comme la future configuration de l'embouchure. En effet, elle ne tient pas compte des interactions entre les stocks de surface (débit du fleuve et des affluents), souterrain et de la mer : seule une

élévation de la mer est reportée sur un MNT. Néanmoins, cette image a le mérite de positionner la réflexion sur une modification de la zonation actuelle de l'embouchure (niveaux d'eau, salinité, température, régime fluviale...) et ainsi sur les zones à protéger et les actions de restauration. Ainsi, l'on constate que toutes les zones basses et humides seraient potentiellement inondées : ville du Havre, vasière nord, Marais Vernier...

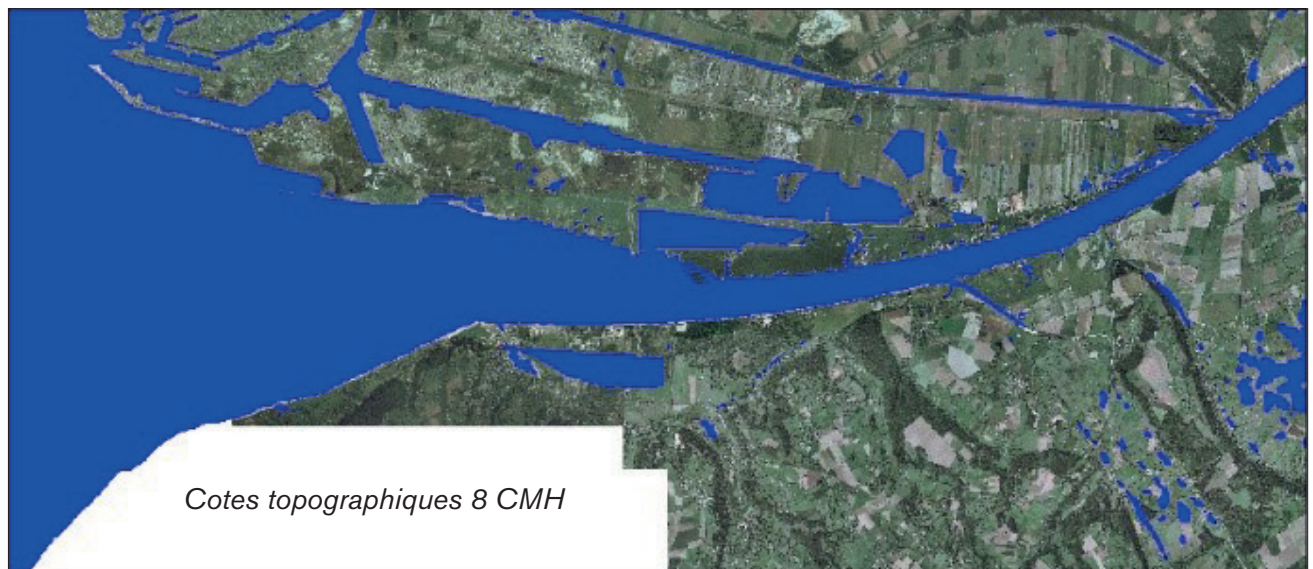


FIGURE 9.a : Modélisation du niveau moyen de pleine mer en vive-eau
(cote 8 CMH) de l'embouchure de la Seine – Sources : IGN, PAR, PAH, MDE

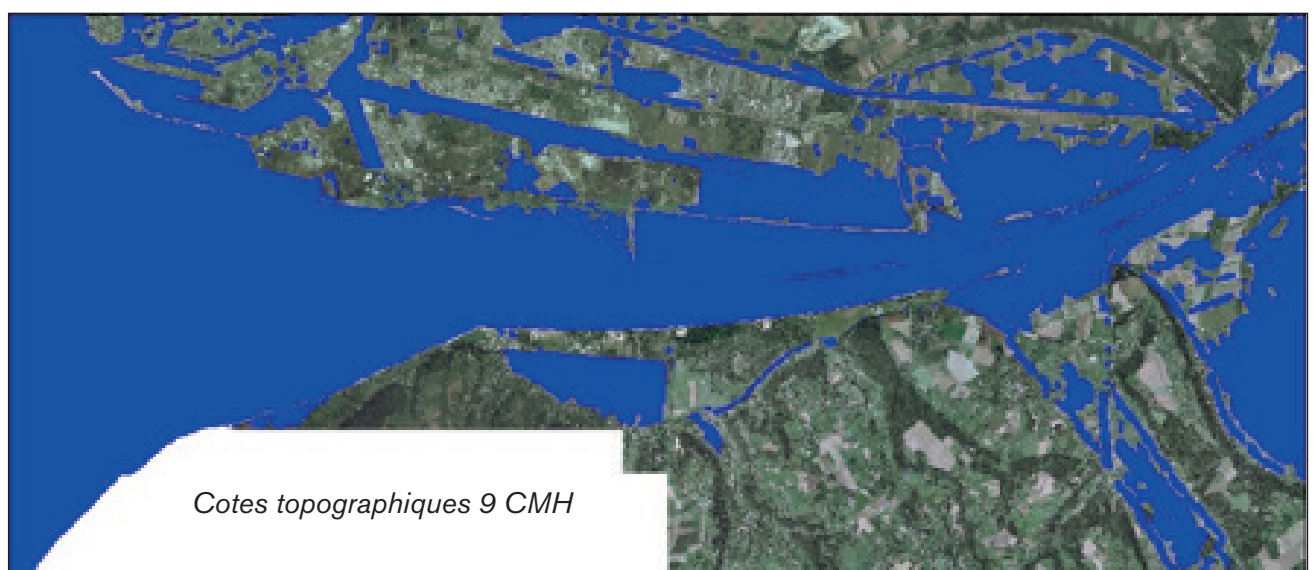


FIGURE 9.b : Projection (cote 9 CMH) avec une élévation du niveau marin (60cm + 40cm de surcote)
Sources : IGN, PAR, PAH, MDE

⁴ Le Modèle Numérique de Terrain est une représentation de la topographie (altimétrie/bathymétrie) d'une zone terrestre.

Le Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval (GIP SA)

a réalisé une modélisation montrant comment l'élévation se propagerait en estuaire de Seine selon trois débits de la Seine et deux coefficients de marée de 78 et 106 (Figure 8). La propagation de l'élévation du niveau marin est modulée par le débit de la Seine et est plus importante avec débit et un coefficient de marée faibles. Par exemple, pour une hausse de 1 mètre au Havre (Lemoine J.-P., 2015) :

- Pour des débits proches des débits moyens de la Seine à Poses (400 m³/s), l'élévation du niveau marin serait intégralement retranscrite, voir amplifiée à Rouen, c'est-à-dire que l'eau s'élèverait de + 1 m à Rouen pour les deux coefficients.

- Pour un débit de 1 200 m³/s, la propagation de l'élévation du niveau marin jusqu'à Rouen serait de 70 % (+ 0,70 m) pour un coefficient de 106, et environ 85 % (+ 0,85 m) pour un coefficient de 78.

- Lors d'une crue de la Seine (débit de 2000 m³/s), une moindre part serait retranscrite à Rouen, c'est-à-dire que l'eau s'élèverait de +50 cm à Rouen (pour un coefficient de 106) et de +60 cm (pour un coefficient de 78).

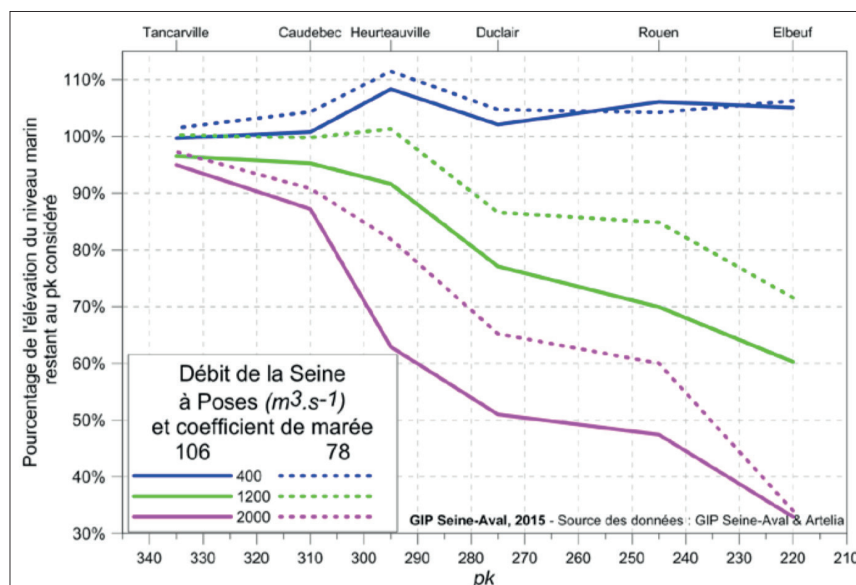
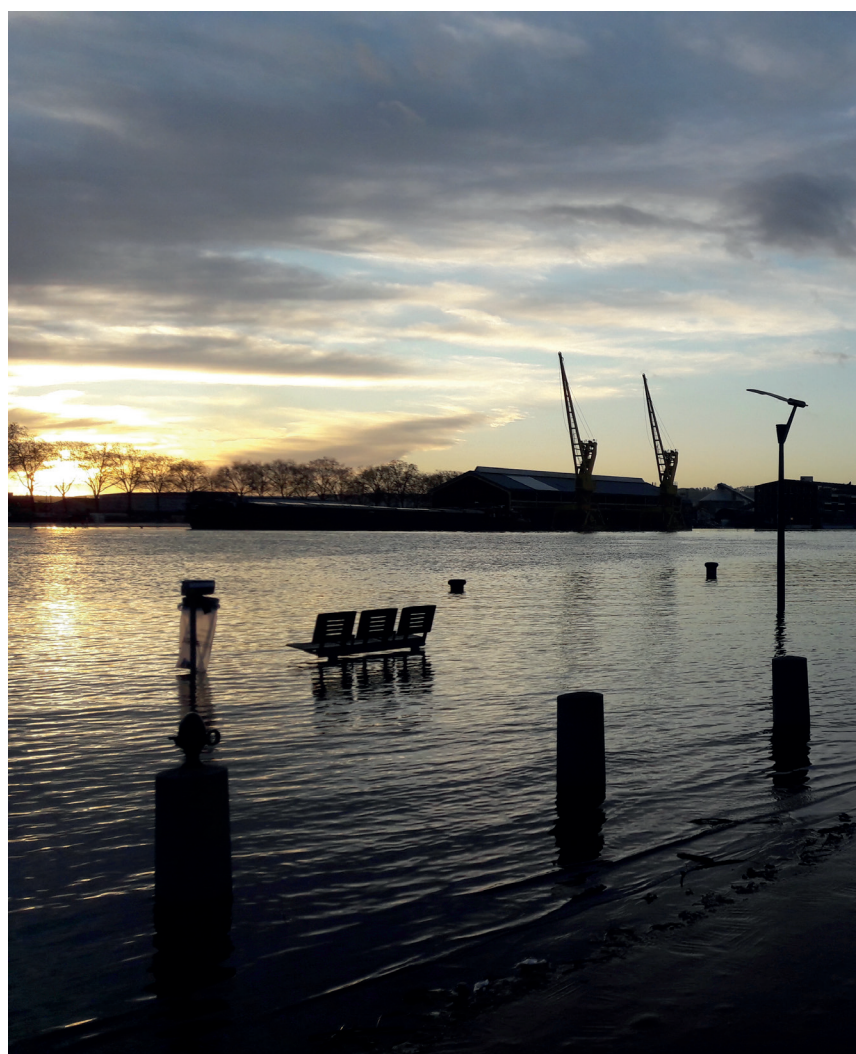


FIGURE 8 : Impact de l'élévation du niveau marin sur les niveaux de pleine mer avec des coefficients de 78 et 106 calculés pour des débits différents de la Seine à Poses. – Sources : Lemoine, 2015.
Pk = point kilométrique



Évolution de la qualité de l'eau

La qualité de l'eau est caractérisée selon un panel de paramètres physico-chimiques (température, acidité, oxygène, salinité...), biologiques (nutriments, biodiversité aquatique...), sédimentologiques (matières en suspension appelées « MES »), et morphologiques (extension des vasières...). Leur évaluation participe à la définition du bon état ou bon potentiel écologique et chimique des masses d'eau de surface, et du bon état chimique et quantitatif des masses d'eau souterraine définie dans la Directive-cadre européenne sur l'eau (DCE).

ÉVOLUTION RÉCENTE

En 2015 (Source : Agence de l'Eau Seine Normandie) :

- L'état écologique et chimique des masses d'eau de transition situées dans la Métropole étaient mauvais. L'échéance pour l'atteinte du bon potentiel écologique et chimique de ces masses d'eau est repoussée à 2027.

- Par ailleurs, 28 % des 53 masses d'eau souterraine du bassin de la Seine étaient en bon état chimique, et 96,2 % en bon état quantitatif. Toutefois, l'état chimique des masses d'eau souterraine de la Métropole était médiocre. L'atteinte du bon état chimique pour toutes les masses d'eau souterraine du bassin ne sera pas respectée pour 2027 comme le demande la DCE.

PROJECTIONS

Le changement climatique influe directement sur la température de l'eau et les débits, qui ont ensuite une incidence sur le bon état éco-

logique et chimiques des masses d'eau. Le changement climatique pourrait alors représenter une contrainte supplémentaire pour le rétablissement du bon état des masses d'eau, et pour l'amélioration de la qualité de l'eau en général.

Les modèles climatiques prévoient une augmentation en moyenne de la température de l'eau de 2 °C sur l'ensemble du bassin de la Seine. Ce réchauffement impliquerait des changements notables sur la biologie des masses d'eau avec un fort développement du phytoplancton, du zooplancton et de l'activité bactérienne (Ducharne et al., 2004 ; Ducharne et al., 2009 ; Laignel et al., 2010 ; Ducharne et Perrin, 2013). Combiné à la baisse des débits, le réchauffement des eaux pourrait être un facteur amplifiant l'eutrophisation de certaines masses d'eau plus particulièrement en période d'étiage et lors de vagues de chaleur. Toutefois, le réchauffement des eaux tendrait à réduire les teneurs en ammonium et en phosphate dans l'eau, avec une diminution de l'ordre de 30 à 75 % (alors que les changements de débits semblent ne produire aucun impact) (Ducharne, 2008). Ces réactions chimiques participerait à une amélioration de l'oxygénation et réduirait les phénomènes d'eutrophisation des eaux de surfaces, mais qui serait contrecarrée par une baisse de la biomasse algale (Cugier et al., 2005 ; Laignel et al., 2010).

Le changement climatique et notamment la baisse des débits des cours d'eau pourraient également impacter les phénomènes de dilution, de sédimentation et les temps de rétention (Laignel et al., 2010). Il en résulterait notamment une moindre dilution des polluants (pesticides, hormones, solvants,...) issus des rejets urbains, industriels et agricoles.

À l'inverse, les épisodes de fortes précipita-

tions pourraient engendrer une augmentation des matières en suspension (MES) et des contaminants associés dans l'eau, ainsi qu'un débordement des réseaux d'assainissement. Le risque principal concerne le rejet direct d'eaux non traitées dans les cours d'eau.

À l'échelle de l'estuaire, l'influence des paramètres climatiques sur la dynamique des matières en suspension (MES) reste à étudier. La dynamique de ces matières renvoie au fonctionnement hydro-sédimentaire des estuaires : elle permet à l'estuaire de réguler, notamment à travers le bouchon vaseux, les flux de polluants chimiques et microbiologie provenant de l'amont (Martin et al., 1976). Les aménagements successifs au cours de l'histoire du fleuve ont modifié la pénétration de la marée et de la salinité, entraînant une évolution des conditions de la sédimentation dans l'estuaire et son embouchure (Foussard et al., 2010). Cette constatation permet de supposer qu'en cas de diminution du débit de la Seine ou d'une élévation du niveau de la mer, la dynamique des MES connaîtra des changements profonds. Cela se traduirait par une modification des zones de sédimentation et d'érosion, ainsi que du transport et du stockage des contaminants présents dans les sédiments.

L'évolution de la salinité dans un cadre de changement climatique a également été simulée dans le Projet MESSCENE du GIP Seine-Aval. Intégrant les perspectives d'évolution des débits à Poses et une élévation du niveau marin de 0,60 m et 1 m, la simulation propose une remontée de salinité de l'ordre de 10 km surtout en étiage et atteignant la commune du Trait (selon la morphologie actuelle de l'estuaire).

PERSPECTIVES À L'ÉCHELLE DE LA MÉTROPOLE

Le territoire de la Métropole pourrait devenir plus vulnérable aux phénomènes de pollution, influençant par exemple la gestion des rejets de stations d'épuration. Les projections des débits de la Seine, les épisodes de fortes précipitations, et les risques d'inondation devront alors être pris en compte (performance des traitements, débit des rejets) afin de prévenir tout risque de pollution de la Seine (Hédut et al., 2007 ; Ducharne, 2008 ; Ducharne et Perrin, 2013).

La nappe phréatique serait également plus vulnérable avec une augmentation des concentrations en nitrates. À l'échelle de l'estuaire de la Seine, cette augmentation

serait de + 20 mg/L à l'horizon 2100. Les cours d'eau seraient, quant à eux, moins sensibles au changement climatique sur ce paramètre (+ 10 mg/L) (Laignel et al., 2010). En revanche, des pratiques agricoles plus respectueuses de l'environnement auraient un impact opposé du même ordre. (Billen et al., 1994 ; Garnier et al., 1995 ; Billen et Garnier, 1999 ; Ducharne et al., 2007, Ducharne, 2008 ; Laignel et al., 2010).

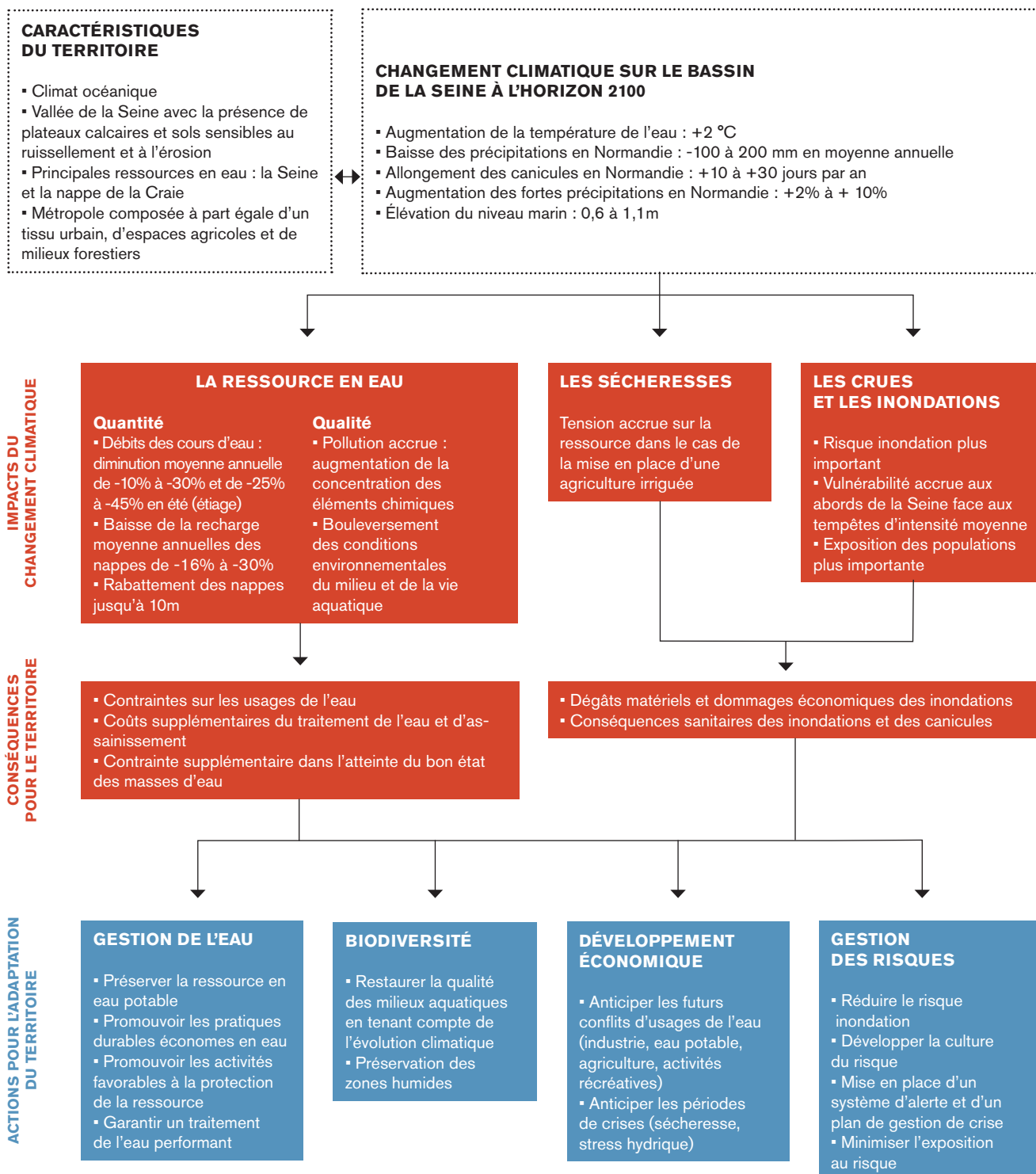
Concernant l'alimentation en eau potable, la qualité des eaux distribuées sur le territoire est actuellement conforme aux normes en vigueur, mais plusieurs polluants (nitrates, pesticides, solvants chlorés, chlorates) ont déjà

été détectés dans les eaux brutes de certains captages. Le changement climatique aurait ainsi une incidence sur la ressource en eau potable tant en quantité qu'en qualité. Enfin, la vie aquatique pourrait être bouleversée par ces changements. Le réchauffement de l'eau pourrait profiter à certaines espèces piscicoles appréciant les eaux plus chaudes, mais au détriment d'autres (comme le chabot par exemple) qui verraient leur effectif régresser du fait de l'absence de refuge en amont. (Ducharne et Perrin, 2013). La pollution accrue suite à la baisse des débits pourrait aussi affecter la faune et la flore. Cet impact sur la biodiversité fera l'objet d'une synthèse spécifique par le GIEC local.



Conclusion

IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA RESSOURCE EN EAU ET INTERACTIONS AVEC LES POLITIQUES PUBLIQUES À L'ÉCHELLE DE LA MÉTROPOLE ROUEN NORMANDIE



Recommandations pour l'amélioration des connaissances

- 1** Les projets menés pour connaître l'impact du changement climatique à l'échelle du bassin de la Seine et de son estuaire (GICC Seine, ReXHySS, Explore 2070, Expertise collective sur l'estuaire de Seine des effets du changement climatique dans le contexte des changements globaux coordonnée par B. Laignel pour le GIP Seine Aval : Laignel, 2010) ont permis l'élaboration des premières projections, qui pour la plupart, ont été utilisées dans cette synthèse. Cependant, elles reposent principalement sur les anciens scénarios du GIEC. C'est la raison pour laquelle, les réactualiser avec les nouveaux scénarios (RCP) permettraient d'affiner les tendances qu'elles prévoyaient, mais en se focalisant cette fois sur une échelle plus « locale » (région Normandie, estuaire de la Seine).
- 2** La définition d'un scénario précis de l'élévation du niveau de la mer pour l'estuaire reste difficile du fait des incertitudes et les prévisions évoluent rapidement. C'est la raison pour laquelle, les travaux doivent prendre en considération différents scénarios, du plus optimiste au plus pessimiste, et les probables impacts qu'ils engendreraient sur le territoire de la Métropole Rouen Normandie. De ce fait, il apparaît important de pousser les investigations sur les données marégraphiques, mais également satellitaires, afin de les préciser pour les prochaines modélisations.
- 3** Le fonctionnement hydrologique de l'estuaire de Seine doit être étudié de manière intégrée et nécessite donc de mieux comprendre les interactions entre l'évolution du niveau de la mer, du débit de la Seine et de ses affluents, et de l'aquifère de la craie. Ce type d'étude devrait être mené à la fois à partir des enregistrements historiques et de la modélisation.
- 4** Par ailleurs, autant les évolutions du débit moyen sont relativement robustes, autant les connaissances sur la fréquence, l'amplitude et les conditions d'apparition des événements extrêmes restent encore à approfondir. Les débits extrêmes de la Seine à Poses ont été étudiés dans le projet RExHySS, qui suggère une intensification des étiages sévères mais des résultats moins concluants pour les crues sévères. Les études futures devront aussi s'attarder sur les tempêtes (intensité, direction des vents), à l'origine notamment de phénomènes de surcote pouvant entraîner des débordements ponctuels, ou encore des dégradations liées à la force du vent sur les ouvrages surélevés (portuaires par exemple).
- 5** Enfin, il pourrait être intéressant de mettre en perspective le changement climatique dans le cadre des variations climatiques sur des échelles de temps plus grandes que celle du siècle dernier. Sur la Seine, les archives sédimentaires pourraient permettre d'atteindre non seulement cet objectif, mais aussi de faire des zooms sur des périodes de changements climatiques brusques significatifs ayant eu des conséquences importantes sur la sédimentation et la morphologie de l'estuaire, telles que l'optimum médiéval ou le petit âge glaciaire.

Bibliographie

- ARTELIA & GIP Seine-Aval, 2013a. *Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine* - Rapport de l'objectif A : Définition des périodes de retours des événements jouant un rôle dans les inondations. 131p. et annexes.
- ARTELIA & GIP Seine-Aval, 2013b. *Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine* - Rapport de l'objectif B : Elaboration de scénarios pouvant déclencher les inondations, en combinant différents événements selon leur occurrence. 22p. et annexes.
- ARTELIA & GIP Seine-Aval, 2014. *Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine* - Rapport de l'objectif D : Modélisation de la ligne d'eau pour différents scénarios. 35p. et annexes.
- Alfieri L., Dottori F., Betts R., Salamon P., Feyen L., 2018. *Multimodel projections of river flood risk in Europe under global warming*, Climate, Vol. 6 (1), 19 p.
- Boé, J., Radojevic, M., Bonnet, R., Dayon, G., de France, I., & Habets, F. 2018. Scénarios sécheresse sur le bassin Seine-Normandie. 36 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 RIVER-STRAHLER Model. *Hydrobiologia*, 410 : 139-150.
- Caisse Centrale de Réassurance (CCR), 2016. Inondations de mai-juin 2016 en France. Modélisations de l'aléa et des dommages.
- Caisse Centrale de Réassurance (CCR), 2018. Retour sur les inondations de janvier-février 2018 en France. Modélisation des dommages et évaluation des actions de prévention.
- Cugier, P., Billen, G., Guillaud, J.-F., Garnier, J. and Menesguen, A., 2005. Modelling the eutrophication of the Seine Bight (France) under historical, present and future riverine nutrient loading. *Journal of Hydrology*, 304 (1-4) : 381-396.
- Dayon, G. 2015. Évolution du cycle hydrologique continental en France au cours des prochaines décennies (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III).
- Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement de Normandie, Territoire à Risque Important d'inondation Rouen – Louviers – Ausreberthe, Cartographie des surfaces inondables et des risques inondations à forte probabilité, 11 p, 2014.
- Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement de Haute-Normandie, 2011. Étude sur la sensibilité et sur l'adaptation de la Haute-Normandie aux effets du changement climatique, Rapport réalisé par Explicite et SAFEGE, octobre 2011, 96 p.
- Ducharme, A., Théry, S., Billen, G., Benoit, M., Brisson, N., Garnier, J., et al., 2004. Influence du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique du bassin de la Seine. *Rapport intermédiaire du contrat PIREN-Seine*.
- Ducharme A., Baubion C., Beaudoin N., Benoît 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), 292-311.
- Ducharme, A., 2008. La Seine en 2100? Impacts croisés du changement climatique et des pressions anthropiques directes. *Techniques Sciences Méthodes-Genie Urbain Genie Rural*, (3), 76-89.
- Ducharme, 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., Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme. Rapport final du projet REXHySS, 2009.
- Ducharme A., Perrin C., 2013. Le changement climatique sur le bassin Seine-Normandie. – Avis du Conseil Scientifique au Comité de Bassin Seine-Normandie, 6 p.
- Fisson C., Lemoine J.-P., Gandilhon F., 2014. *Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine* - Synthèse. Etude réalisée par ARTELIA pour le compte du GIP Seine-Aval, 31p.
- Fisson C. & Lemoine J.-P., 2016. Les niveaux d'eau en estuaire de Seine : risque inondation et changement climatique. Fascicule Seine-Aval 3.5, 46p
- Foussard V. (coord.), Cuvilliez A., Fajon P., Fisson C., Lesueur P., Macur O., 2010. Evolution morphologique d'un estuaire anthropisé de 1800 à nos jours. Fascicule Seine-Aval n° 2.3, 43p.
- Garnier J., G. Billen, M. Coste., 1995. Seasonal succession of diatoms and chlorophyceae in the drainage network of the River Seine : Observations and modeling. *Limnology. & Oceanography*, 40 : 750-765.
- Hédut, A., Pujol, R., Tisserand, B., Delebarre, X., & Pichard, T., 2007. Conséquences des changements climatiques sur les systèmes d'assainissement. *Techniques Sciences Méthodes*, (12), 85-92.
- 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 régionale (bassin de la Seine). *Bulletin des Sciences Géographiques*, Alger, 27, 2-22.
- Laignel B., Nouaceur Z., 2018. L'évolution du climat à l'échelle de la Métropole Rouen Normandie. Rapport du GIEC local pour la Métropole Rouen Normandie. 13 p.
- 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.
- Martin J.-M., Meybeck, M., Salvadori, F., Thomas A., 1976. Pollution chimique des estuaires : état actuel des connaissances.
- Mesquita, J., 2009. *Facteurs de contrôle des modalités de la réponse hydrologique des bassins versant en substrat carbonaté : comparaisons entre la Haute Normandie et la région d'Austin au Texas*. Hydrologie. Thèse Doctorat, Univ. Caen, 179 p.
- Pirazzoli P.A., 2008. Évolution et projections du niveau moyen des mers et des phénomènes de surcotes : les hypothèses pour analyser les effets sur l'estuaire de la Seine et le littoral. Séminaire de lancement de l'expertise collective sur le changement climatique, GIP Seine Aval, juin 2008, Maison de l'Université de Rouen, <http://seine-aval.crihan.fr>.
- Slimani S., 2009. *Les fonctionnements hydrologiques de l'aquifère karstifié de la Craie de Haute-Normandie : conséquences des contextes morphologiques et structuraux*. Thèse Doctorant, 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.
- Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, L.V. Alexander, S.K. Allen, N.L. Bindoff, F.-M. Bréon, J.A. Church, U. Cubasch, S. Emori, P. Forster, P. Friedlingstein, N. Gillett, J.-M. Gregory, D.L. Hartmann, E. Jansen, B. Kirtman, R. Knutti, K. Krishna Kumar, P. Lemke, J. Marotzke, V. Masson-Delmotte, G.A. Meehl, I.I. Mokhov, S. Piao, V. Ramaswamy, D. Randall, M. Rhein, M. Rojas, C. Sabine, D. Shindell, L.D. Talley, D.G. Vaughan et S.-P. Xie, 2013 : Résumé technique. In : *Changements climatiques 2013 : Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (dir. pub.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York (NY), États-Unis d'Amérique.
- Stollsteiner P., 2012. Changement climatique EXPLORE 2070. BRGM/RP – 61483 – FR – Vol 1.

[illegible]

En cas d'utilisation de données ou d'éléments de ce rapport, il doit être cité selon la forme suivante :

Kazmierczak L., Laignel B., Nouaceur Z., 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.

Le GIEC local ne serait en aucune façon responsable des interprétations, productions intellectuelles, et publications diverses résultant des résultats de leurs travaux et pour lesquelles il n'aurait pas donné d'accord préalable.

Le GIEC local est un groupe d'experts créé dans le cadre de la COP21 Rouen Normandie et financé par la Métropole Rouen Normandie. Les experts proviennent des structures suivantes :



CONTACTS

Léo KAZMIERCZAK - Chargé de projet climat

leo.kazmierczak@metropole-rouen-normandie.fr

Charlotte CÉLESTIN - Responsable de projets PCAET

charlotte.celestin@metropole-rouen-normandie.fr