

Le rôle des mares pour une meilleure résilience des territoires face aux changements climatiques

Synthèse bibliographique 2019



Morgane PRONOST

Remerciements

Je remercie vivement les personnes ayant contribué à l'élaboration de cette synthèse :

Loïc Chéreau pour sa relecture attentive, son engagement et les riches temps d'échange ;

Coraline Domingues pour ses relectures, sa confiance, et pour avoir initié ce sujet ;

Frédéric Gresselin pour avoir pris le temps de relire ce document et d'y apporter son expertise ;

Lionel Picard pour sa motivation à apporter des données sur les coléoptères aquatiques.

Table des matières

| | |
|---|----|
| Introduction..... | 1 |
| I.Changement climatique : caractérisation du phénomène mondial en cours..... | 2 |
| A.Effets actuels et futurs du changement climatique | 2 |
| B.Impacts du changement climatique sur les populations et l'environnement | 4 |
| II.Le changement climatique en Normandie | 7 |
| A.Normandie : climat actuel et scénarii régionaux | 7 |
| B.Quels impacts pour les normands ? | 8 |
| 1.Diminution quantitative et qualitative de la ressource en eau..... | 8 |
| 2.Augmentation du risque inondation | 10 |
| 3.Dégradation des milieux naturels | 10 |
| 4.Erosion de la biodiversité | 11 |
| 5.Autres impacts..... | 11 |
| III.Les mares et le climat : quelles interactions | 13 |
| A.Impacts du climat sur les mares..... | 13 |
| 1.Impacts sur le milieu | 13 |
| 2.Impacts sur la biodiversité | 13 |
| B.Rôle des mares face au changement climatique | 17 |
| 1.Disponibilité en eau douce de surface | 17 |
| 2.Récupération des surplus de précipitations..... | 17 |
| 3.Séquestration du carbone atmosphérique | 18 |
| 4.Biodiversité : métapopulations, connectivité et migration des espèces | 19 |
| C.Agir en faveur des mares : une solution fondée sur la nature..... | 20 |
| IV.L'atténuation des effets et impacts du changement climatique en Normandie grâce aux mares... | 23 |
| A.Les mares normandes et leur potentiel | 23 |
| 1.Quelques caractéristiques des mares normandes | 23 |
| 2.Quelles mares et gestions pour quelles atténuations ? | 24 |
| B.Préserver, restaurer, créer des mares | 27 |
| C.Mieux connaître les capacités d'atténuation des mares : propositions de protocoles | 29 |
| 1.Quantification de la séquestration du carbone atmosphérique dans les mares | 30 |
| 2.Analyse des variations de niveau d'eau des mares..... | 30 |
| 3.Analyse de la dispersion et potentielle migration des espèces aquatiques | 31 |
| Conclusion | 33 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Evolution de la température moyenne à la surface de la planète entre les périodes 1986-2005 et 2081-2100, selon deux scenarii (GIEC, 2014)..... | 2 |
| Figure 2 : Evolution des précipitations moyennes entre les périodes 1986-2005 et 2081-2100, selon deux scenarii. Cette figure n'illustre pas les variations saisonnières ; les hachures signalent les régions dans lesquelles le changement projeté est inférieur à un écart type de la variabilité naturelle interne (GIEC, 2014)..... | 3 |
| Figure 3 : Potentiels impacts de la hausse globale des températures sur la reproduction des amphibiens. Les intervalles de temps ne sont pas représentés à l'échelle..... | 16 |
| Figure 4 : Définition schématique des Solutions fondées sur la Nature (UICN, 2018)..... | 20 |
| Figure 5 : Les quatre stades du processus d'atterrissement d'une mare (ABE-GOULIER <i>et al.</i> , 2019)..... | 27 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Enjeux situés dans les zones basses (c'est-à-dire sous les niveaux marins de référence +1 m) selon la base de données Topo Pays de l'IGN (CETMEF - CETE MEDITERRANEE - CETE DE L'OUEST, 2009)..... | 10 |
| Tableau 2 : Effets/impacts du changement climatique et leur atténuation par les mares..... | 20 |

Introduction

La Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques donne la définition suivante : « *On entend par ‘changements climatiques’ des changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l’atmosphère mondiale et qui viennent s’ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables* » (NATIONS UNIES, 1992). Il est admis scientifiquement que le dérèglement climatique en cours est lié aux activités humaines, décuplées par une croissance économique et démographique très forte. Les émissions de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone CO₂, méthane CH₄ et oxyde nitreux NO₂) n’ont pas été aussi élevées depuis au moins 800 000 ans et sont certainement à la source du réchauffement global observé. En 2010, elles s’élevaient à 49 Gt_{éq}CO₂¹ (GIEC, 2014).

La Convention-cadre des Nations unies établit également que les Etats doivent faire leur possible pour prévoir, prévenir ou **atténuer les causes et effets des changements climatiques** (NATIONS UNIES, 1992), ce qui nécessite de définir des solutions viables pour améliorer la résilience des territoires.

Parmi les différents outils pouvant être sollicités afin de lutter contre les changements climatiques, les écosystèmes sont de plus en plus populaires. Cet engouement pour les services écosystémiques a donné naissance au concept de ‘**Solutions fondées sur la Nature**’, définies par l’UICN comme « *les actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés pour relever directement les défis de société de manière efficace et adaptative, tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité* » (UICN, 2018).

Dans le cadre du **Programme régional d’action en faveur des mares (PRAM)** développé par les Conservatoires d’Espaces Naturels de Normandie, **nous émettons l’hypothèse que les actions en faveur des mares peuvent améliorer la résilience des territoires aux changements climatiques, à l’échelle de la Normandie et à ce titre constituer une solution fondée sur la nature.**

La grande diversité des mares les rend complexes à définir. La définition communément admise est celle établie par le Programme national de recherches sur les zones humides, selon laquelle une mare est « *une étendue d’eau à renouvellement généralement limité, de taille variable pouvant atteindre un maximum de 5 000 m². Sa faible profondeur, qui peut atteindre environ deux mètres, permet à toutes les couches d’eau d’être sous l’action du rayonnement solaire et aux plantes de s’enraciner sur tout le fond. De formation naturelle ou anthropique, elle se trouve dans des dépressions imperméables, en contextes rural, périurbain voire urbain. Alimentée par les eaux pluviales et parfois phréatiques, elle peut être associée à un système de fossés qui y pénètrent et en ressortent ; elle exerce alors un rôle tampon au ruissellement. Elle peut être sensible aux variations météorologiques et climatiques, et ainsi être temporaire. La mare constitue un écosystème au fonctionnement complexe, ouvert sur les écosystèmes voisins, qui présente à la fois une forte variabilité biologique et hydrologique interannuelle. Elle possède un fort potentiel biologique et une forte productivité potentielle* » (SAJALOLI & DUTILLEUL, 2001).

Ce rapport de synthèse a pour vocation de rassembler et analyser la bibliographie existante au sujet des mares et du changement climatique pour tenter de répondre à la question suivante :

Comment les services écosystémiques fournis par les mares peuvent-ils atténuer les effets et impacts du changement climatique en Normandie ?

1. Gt_{éq}CO₂ : Giga tonne équivalent CO₂. Pour tout gaz à effet de serre, quantité de CO₂ qui aurait la même capacité à retenir le rayonnement solaire.

I. Changement climatique : caractérisation du phénomène mondial en cours

Le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2014) fournit une analyse fiable et détaillée des changements climatiques déjà observés et des tendances prédites par modélisation, aussi cette partie s'appuiera largement sur ce document.

Dans la suite de ce rapport, **on nommera « effets » les changements des paramètres climatiques et « impacts » les conséquences de ces changements pour l'Homme et son environnement.**

A. Effets actuels et futurs du changement climatique

- Hausse des températures

On constate d'ores et déjà un **réchauffement global du climat**, aussi bien dans l'atmosphère que dans les océans. Entre 1880 et 2012, la température a augmenté de 0.85°C (± 0.2) et les trois dernières décennies sont les plus chaudes de cette période, chacune surpassant la précédente (GIEC, 2014). Le mois de juillet 2019 a été le plus chaud jamais enregistré dans le monde (ANONYME, 2019).

Cette hausse des températures s'applique toute l'année, entraînant des **hivers plus doux**, avec un avancement des dates de dégel, mais aussi des **étés plus chauds** (MACRAE *et al.*, 2014 ; MILLER & HUTCHINS, 2017). **La fréquence et la durée des vagues de chaleur estivales augmenteront très probablement** au cours des prochaines décennies (GIEC, 2014).

D'ici la fin du XXIème siècle, la température moyenne à la surface de la planète aura vraisemblablement augmenté d'environ 2°C par rapport au XIXème siècle (période pré-industrielle), mais, comme l'illustre la figure 1, ce chiffre dépend du scénario considéré ; il est possible que cette augmentation dépasse 4°C (GIEC, 2014).

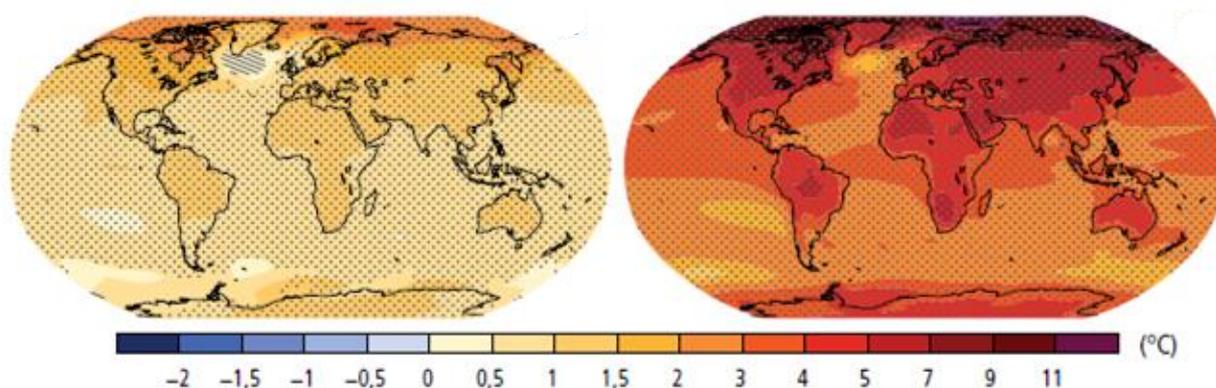


Figure 1 : Evolution de la température moyenne à la surface de la planète entre les périodes 1986-2005 et 2081-2100, selon deux scénarii (GIEC, 2014)

- Elévation du niveau des mers et acidification des océans

Le niveau moyen des océans a augmenté de 0.19m entre 1901 et 2010, suite à la fonte des calottes glaciaires et glaciers provoquée par le réchauffement. Cette montée des eaux se poursuivra sur plusieurs siècles même si le réchauffement global est enrayé (GIEC, 2014).

La hausse de la concentration en CO₂ atmosphérique entraîne par ailleurs une forte absorption de CO₂ par les océans et conduit à leur acidification. (GIEC, 2014).

- Hausse de la fréquence et de l'intensité des sécheresses

Sous les latitudes moyennes les précipitations estivales diminueront probablement, entraînant des **étés plus secs** et une **augmentation du risque de sécheresse**, y compris en France (INRA, 2006 ; GIEC, 2014 ; O'REAGAN *et al.*, 2014 ; MILLER & HUTCHINS, 2017). Selon le scénario considéré, les précipitations estivales pourraient diminuer de 5 à 35% entre la fin du XXe siècle et la fin du XXIe siècle (INRA, 2006) (Figure 2).

Deux types de sécheresse sont à prévoir. La sécheresse édaphique ou hydrique est une insuffisance en eau dans les sols, due à un manque de précipitations au printemps-été et impactant majoritairement le milieu agricole. La sécheresse hydrologique est un manque d'eau dans les réserves hydrographiques causé par un manque de précipitations en automne-hiver (INRA, 2006).

- Hausse des précipitations hivernales ?

Dans l'hémisphère Nord, les précipitations moyennes ont augmenté depuis 1951 (GIEC, 2014). Il est cependant plus difficile de prédire les variations de précipitations que celles des températures (MACRAE *et al.*, 2014) et selon les modèles, les précipitations hivernales pourraient augmenter (MILLER & HUTCHINS, 2017) ou diminuer (BRISSEON & LEVRAULT, 2010), avec une hétérogénéité géographique (GIEC, 2014). Une **modification des précipitations** est en tout cas attendue (O'REAGAN *et al.*, 2014) (Figure 2).

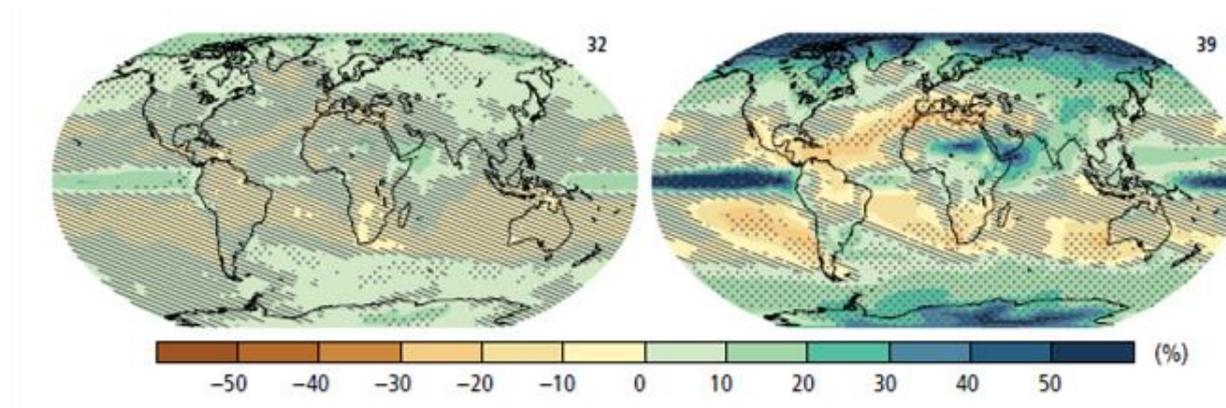


Figure 2 : Evolution des précipitations moyennes entre les périodes 1986-2005 et 2081-2100, selon deux scénarii. Cette figure n'illustre pas les variations saisonnières ; les hachures signalent les régions dans lesquelles le changement projeté est inférieur à un écart type de la variabilité naturelle interne (GIEC, 2014)

- Hausse de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques extrêmes

Selon le dernier rapport du GIEC (2014), on constate déjà des changements dans l'occurrence d'événement extrêmes : des vagues de chaleur plus importantes, une augmentation des niveaux marins extrêmes et plus de fortes précipitations. Il n'y a cependant pas de constat sur les cyclones et les incendies.

Ces changements se poursuivront notamment par une hausse de la fréquence et de l'intensité des **épisodes de précipitations et de chaleurs extrêmes**, y compris en France (GIEC, 2014 ; ELSHORBAGY *et al.*, 2018 ; UICN, 2018). Seuls les froids extrêmes devraient, très probablement, se faire plus rares (GIEC, 2014).

B. Impacts du changement climatique sur les populations et l'environnement

- Augmentation du risque d'inondation

Il est **possible que le risque d'inondations augmente** à l'échelle régionale (GIEC, 2014). Au Royaume-Uni, où une étude a été menée, on constate déjà l'occurrence nouvelle d'inondations extrêmes (MILLER & HUTCHINS, 2017).

Les villes sont particulièrement vulnérables aux inondations, notamment à cause de l'imperméabilisation des sols (MILLER & HUTCHINS, 2017). En France, c'est le risque naturel qui touche le plus de communes (UICN, 2018).

- Baisse de la disponibilité en eau

La disponibilité en eau va vraisemblablement diminuer au cours du siècle (GIEC, 2014). Si les précipitations hivernales diminuent, les aquifères risquent de ne pas être rechargées ; or, dans le même temps, la baisse de précipitations estivales sera associée à une hausse de l'évapotranspiration par les végétaux (BRISSEON & LEVRAULT, 2010). Cela pose la question de l'irrigation des cultures, qui représente déjà jusqu'à 80% de la consommation d'eau en été en France (INRA, 2006). Le milieu agricole devrait donc être fortement impacté par le manque d'eau (GIEC, 2014).

- Augmentation des rendements des cultures ?

La concentration accrue en CO₂ dans l'atmosphère favorisant l'activité photosynthétique, une augmentation des rendements des cultures et prairies est envisageable à plus ou moins long terme selon certaines sources (INRA, 2006 ; BRISSEON & LEVRAULT, 2010). Toutefois, les interactions potentielles de ce phénomène avec le manque d'eau sont encore inconnues et on constate aujourd'hui plus d'impacts négatifs que positifs sur les cultures (GIEC, 2014).

- Baisse de la qualité de l'eau

Les événements extrêmes tels que les inondations ou les tempêtes peuvent être à l'origine de débordements d'eaux usées ou polluées dégradant la qualité de l'eau (notamment en milieu urbain) ; or, de tels événements risquent de se multiplier. De plus, les concentrations en polluants dans les cours d'eau, les eaux stagnantes et les nappes risquent d'être accentuées par l'intensification des sécheresses, car peu d'eau sera disponible pour les diluer (MILLER & HUTCHINS, 2017).

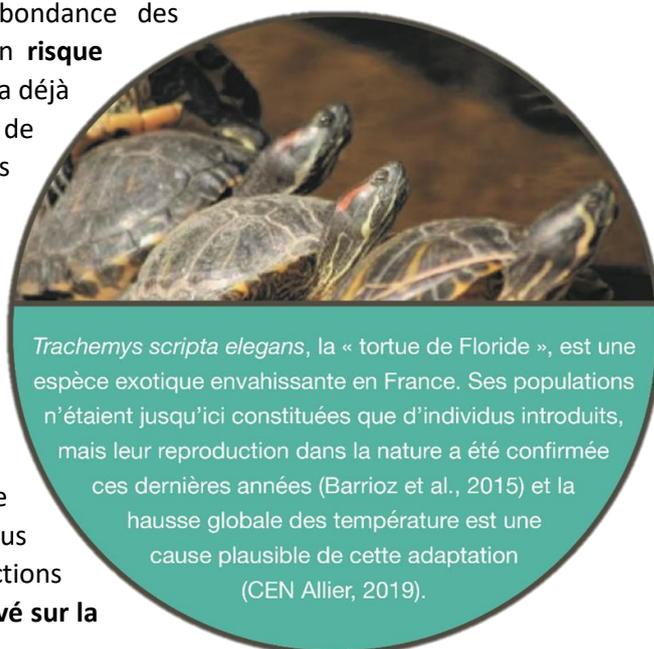
- Perturbation de la biodiversité

Une des principales conséquences du dérèglement climatique sur les espèces est le **changement d'aire de répartition**, la migration se faisant généralement vers les pôles et les zones de haute altitude (PARMESAN & YOHE, 2003 ; PARMESAN, 2006 ; DATAR, 2013 ; GIEC, 2014). Pour ces milieux la migration peut s'avérer négative si les espèces arrivantes sont exotiques envahissantes, ou positive si l'écosystème accueille plus d'espèces (non exotiques envahissantes) qu'il n'en perd, comme c'est le cas pour les lichens aux Pays-Bas (PARMESAN, 2006 ; DATAR, 2013).

Les perturbations peuvent également être temporelles, comme les **décalages des périodes de reproduction, des périodes de migration, ou encore des blooms de phytoplancton**, ce qui risque de perturber la synchronie nécessaire aux interactions interspécifiques (proie-prédateur, plante-pollinisateur, etc.) (PARMESAN, 2006 ; GIEC, 2014).

En outre, on constate des modifications de l'abondance des populations. Le changement climatique entraîne un **risque accru de disparition** pour de nombreuses espèces et a déjà causé plusieurs extinctions, notamment d'espèces de zones polaires ou montagneuses ne pouvant pas migrer vers des milieux plus favorables (PARMESAN, 2006 ; GIEC, 2014).

Pour survivre, les espèces devront migrer ou s'adapter. On ne peut pas prédire si la migration sera suffisante mais la consommation de nouvelles ressources et des évolutions génétiques ont déjà été constatées (PARMESAN, 2006 ; WOODWARD *et al.*, 2010 ; GIEC, 2014). Cependant, dans l'histoire de notre planète, des changements climatiques globaux plus lents que celui en cours ont déjà entraîné des extinctions de masse. Cela laisse présager un **impact négatif élevé sur la biodiversité** (GIEC, 2014).

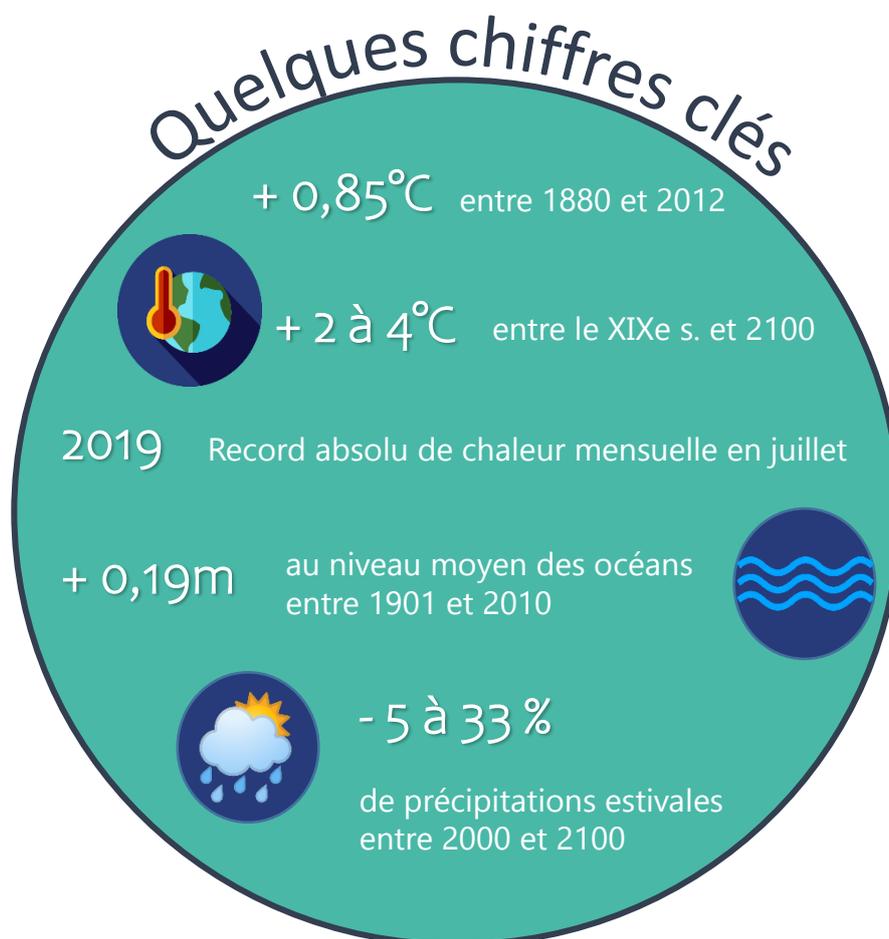


- Impacts sur la santé humaine, le bien-être, le mode de vie

Dans les prochaines décennies, les changements en cours aggraveront certainement des problèmes de santé déjà existants. L'**expansion des vecteurs de certaines maladies** est déjà en cours, par exemple la tique *Ixodes ricinus* remonte vers le Nord de l'Europe grâce aux hivers moins rigoureux (PARMESAN, 2006 ; GIEC, 2014), ou les moustiques *Aedes albopictus* et *Culex pipiens* qui commencent à apparaître en France métropolitaine.

Les **vagues de chaleur** auront certainement un impact négatif important ; le nombre de **décès** qui leur est attribué augmente chaque année. Les populations urbaines seront probablement les plus concernées par ce risque. En outre, certaines activités, notamment en extérieur, deviendront impossibles pendant les canicules (GIEC, 2014).

L'impact du dérèglement climatique sur les activités humaines s'annonce global : il engendrera d'importantes pertes économiques, aggravera la pauvreté et l'insécurité alimentaire, etc. (GIEC, 2014).



(GIEC, 2014 ; ORGANISATION METEOROLOGIQUE MONDIALE, 2019)

Résumé partie I.

L'émission de gaz à effet de serre par les activités humaines induit un changement du climat global de la planète dont les principaux effets sont une élévation globale des températures, une élévation du niveau marin, une baisse des précipitations estivales, une perturbation des précipitations hivernales et une probable hausse de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques extrêmes.

Ces perturbations ont déjà ou auront probablement les impacts suivants : l'augmentation du risque d'inondation, la baisse de la disponibilité en eau et de sa qualité, des migrations, évolutions ou extinctions d'espèces, des risques sanitaires pour l'Homme et un impact indéterminé sur les cultures.

II. Le changement climatique en Normandie

A. Normandie : climat actuel et scénarii régionaux

- Températures

La région bénéficie d'un climat océanique favorisant des hivers doux et des étés assez frais. Mais ce confort climatique semble compromis : **la température moyenne annuelle a déjà augmenté de 0.6°C** depuis 1950. Le record de chaleur absolu pour l'ex-Basse-Normandie, 40°C, a été établi en 1990 puis atteint à nouveau en 2003 et quasiment atteint en 2019 (DREAL BASSE-NORMANDIE, 2015 ; DREAL HAUTE-NORMANDIE, 2015).

Quel que soit le scénario, la température moyenne annuelle doit continuer à augmenter en Normandie, allant jusqu'à **4°C d'ici 2080** d'après les données du portail DRIAS (scénario RCP 8.5). Le nombre de jours de chaleur l'été augmentera également, ainsi que **la fréquence et l'intensité des canicules**. Le nombre de jours de gel, en revanche, devrait diminuer (DATAR, 2013 ; DREAL BASSE-NORMANDIE, 2015 ; DREAL HAUTE-NORMANDIE, 2015).

- Précipitations

La région se caractérise par des précipitations régulières mais très inégales entre territoires : dans le Sud de la Manche, les précipitations moyennes peuvent atteindre 1300 mm par an, contre 650 mm dans le Sud-Est de l'Eure. La variabilité interannuelle est également importante puisque les précipitations moyennes en Normandie occidentale varient de 700 à 1400 mm/an. Les cumuls mensuels de précipitations les plus abondants sont d'octobre à décembre (voire de septembre à janvier). La Normandie a déjà connu plusieurs années de sécheresse mais reste relativement protégée par l'influence océanique et **les précipitations ont légèrement augmenté ces soixante dernières années** (DATAR, 2013 ; DREAL BASSE-NORMANDIE, 2015 ; ABE-GOULIER *et al.*, 2019).

Il est difficile de prévoir quelle tendance vont suivre les précipitations à l'échelle de la région. **Le plus probable est qu'elles seront plus intenses sur de plus courts laps de temps, augmenteront globalement l'hiver mais diminueront globalement l'été**. La Normandie pourrait recevoir jusqu'à 30 jours de précipitations en moins par an (sur environ 120 jours de précipitations), avec **un allongement conséquent du temps passé en sécheresse et une diminution de la ressource en eau** (DATAR, 2013 ; DREAL BASSE-NORMANDIE, 2015). Les modèles Météo-France prévoient une baisse de précipitations moyennes annuelles de 50 mm (dans l'Orne) à 140 mm (dans la Manche) (RCP 8.5, données DRIAS).

- Evènements météorologiques extrêmes

Les phénomènes extrêmes comme les canicules, inondations, submersions ou ouragans risquent de survenir plus fréquemment et plus fortement en Normandie (DATAR, 2013 ; DREAL BASSE-NORMANDIE, 2015). Deux ouragans ayant une trajectoire particulière dans le nord-est de l'océan Atlantique se sont produits en 2019 : Ophelia et Lorenzo (F. Gresselin, communication personnelle, 13 novembre 2019).

- Vents

Les vents normands ne présentent pas de tendance affirmée et ne font l'objet d'aucun scénario d'évolution plausible (DREAL BASSE-NORMANDIE, 2015).

- Elévation du niveau marin

Le niveau marin augmentera de 0.43m (scenario RCP2.6) à 0.84 m (scenario RCP8.5) d'ici la fin du siècle (IPCC, 2019).

B. Quels impacts pour les normands ?

1. Diminution quantitative et qualitative de la ressource en eau

- Du fait de la hausse des températures

La ressource en eau normande sera impactée par **la hausse des températures**. En effet, celle-ci **augmente simultanément l'évaporation et la demande en eau**. Actuellement la consommation domestique moyenne en eau potable en Normandie est en baisse (F. Gresselin, communication personnelle, 13 novembre 2019) ; elle est de 30 à 50 m³/an/personne, mais ce chiffre pourrait augmenter en réponse à des besoins accrus par les fortes chaleurs : remplissage des piscines, douches plus fréquentes, nouveaux systèmes de refroidissement, etc. L'augmentation moyenne annuelle serait comprise entre 2% (chiffre pour l'Angleterre) et 10% (chiffre pour le sud de la France), mais aura dans tous les cas un impact fort car la consommation sera condensée sur une courte période estivale (DREAL BASSE-NORMANDIE, 2015 ; RINAUDO & NEVERRE, 2019).

- Du fait de sécheresses accrues

Les sécheresses auront pour effet d'**accroître les besoins en irrigation**, qui s'élèvent déjà de 2 à 4 millions de m³ d'eau par an dans l'Eure. En effet, l'évapotranspiration réelle est de 550 mm/an en Normandie et devrait fortement augmenter. Les grandes cultures céréalières seront potentiellement moins touchées que les vergers et le lin, car pour ces derniers les variétés végétales ne sont pas adaptées au stress hydrique. Les prairies devraient produire plus de matière sèche mais avec un risque de forte variabilité interannuelle. Dans une moindre mesure, l'arrosage des jardins participera également au pic de consommation estival (DATAR, 2013 ; DREAL HAUTE-NORMANDIE, 2015 ; RINAUDO & NEVERRE, 2019 ; F. Gresselin, communication personnelle, 13 novembre 2019).

- Du fait de la salinisation des nappes souterraines et des cours d'eau

L'élévation du niveau des mers provoque l'**avancée du biseau salé des nappes** vers l'intérieur des terres et la **remontée des eaux salines dans les cours d'eau**. Certaines ressources hydriques actuelles deviendront donc impropres à la consommation. Selon les scénarii et les secteurs, le biseau salé pourrait avancer de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres, les zones les plus vulnérables étant les basses vallées de l'Aure, de la Dives et de l'Orne (DATAR, 2013 ; DREAL BASSE-NORMANDIE, 2015 ; DREAL HAUTE-NORMANDIE, 2015 ; CROISSET *et al.*, 2016).

- Du fait de la dégradation de la qualité de l'eau

Dans le même temps, la baisse de débit des cours d'eau (jusqu'à 30 à 40 % en étiage) entraîne une **moindre dilution des polluants** (urbains, agricoles, stations d'épuration, dégradant ainsi la qualité de l'eau alors que celle-ci est déjà moyenne en Normandie, voire médiocre à mauvaise sur certains cours d'eau comme la Seine. Les nappes phréatiques pourraient également subir ce phénomène. Par ailleurs, la baisse du niveau des nappes diminue les surfaces de zones humides, réduisant l'épuration de l'eau réalisée par ces milieux (DATAR, 2013 ; DREAL HAUTE-NORMANDIE, 2015 ; F. Gresselin, communication personnelle, 13 novembre 2019).

- Dans le cas de faibles précipitations hivernales

Certaines nappes ne reçoivent déjà pas assez de précipitations l'hiver et leur niveau est bas avant même l'arrivée des sécheresses (DREAL HAUTE-NORMANDIE, 2015). Si les précipitations hivernales devaient se raréfier, la ressource en eau serait dangereusement limitée.

De forts enjeux sont associés à la ressource en eau en Normandie, notamment agricoles. Or, l'agriculture est une activité essentielle de la région et la principale ressource de l'ex-Basse-Normandie. La baisse de disponibilité en eau, qui survient au moment où le stress hydrique des cultures et le stress thermique des animaux sont les plus élevés, est donc particulièrement problématique. Elle risque d'engendrer des **conflits d'usages** avec d'autres secteurs et il sera probablement nécessaire d'imposer des **restrictions d'usage** de l'eau (DATAR, 2013 ; DREAL BASSE-NORMANDIE, 2015).

L'autre problématique soulevée par une moindre disponibilité en eau associée à de plus importantes sécheresses est celle du **risque d'incendie**. Si ce risque était autrefois modéré en Normandie, il est désormais avéré et risque de s'aggraver, les essences régionales (chênes et hêtres majoritairement) étant peu adaptées au stress hydrique et les forêts si situant sur des sols aux réserves hydriques déjà faibles. L'aggravation d'un risque jusqu'alors mineur est par ailleurs associée à un manque de préparation chez les populations, ce qui amplifie le problème (DATAR, 2013 ; F. Gresselin, communication personnelle, 13 novembre 2019).

Enfin, il est nécessaire de prendre en considération les **impacts indirects du changement climatique sur la ressource en eau**, comme la hausse de l'attractivité touristique de la région. Dans les décennies à venir, les impacts indirects devraient excéder les impacts directs, qui eux resteront relativement modérés (RINAUDO & NEVERRE, 2019).

2. Augmentation du risque inondation

La Normandie ne sera pas épargnée par les inondations que provoquera le changement climatique. Les **inondations par ruissellement et coulées de boues**, notamment, pourraient devenir plus fréquentes, tout comme les **submersions marines**. Or, le risque d'inondation est déjà élevé : c'est le plus répandu dans la région avec 57% des communes concernées (DATAR, 2013).

Les choix d'aménagement détermineront le risque auquel les Normands devront faire face, notamment le degré d'**artificialisation des sols**, déjà très important en ex-Haute-Normandie (1800 ha/an) (DREAL HAUTE-NORMANDIE, 2015).

Les départements les plus concernés par le risque inondation sont la Seine-Maritime, la Manche et le Calvados (DATAR, 2013). En ex-Haute-Normandie, les plus grandes villes, aux sols très artificialisés, seront les plus touchées : Rouen, Le Havre, Evreux et Dieppe (DREAL HAUTE-NORMANDIE, 2015). Dans le Massif Armoricain où les nappes souterraines sont peu nombreuses ou peu exploitables, les cours d'eau réagissent plus fortement aux précipitations, ce qui accroît le risque (DREAL BASSE-NORMANDIE, 2015).

A l'heure actuelle, nous ne disposons pas de cartographie satisfaisante des enjeux liés aux inondations sur le territoire normand ; ces enjeux sont donc synthétisés dans le tableau 1.

Tableau 1: Enjeux situés dans les zones basses (c'est-à-dire sous les niveaux marins de référence +1 m) selon la base de données Topo Pays de l'IGN (CETMEF - CETE MEDITERRANEE - CETE DE L'OUEST, 2009)

| Territoire | Enjeux situés en zone basse | | |
|--|-----------------------------|--|--|
| | Nb de bâtiments | Linéaire d'infrastructures de transport (km) | Surface de sites d'intérêt écologique (ha) |
| Basse-Normandie | 28474 | 1435 | 33338 |
| Haute-Normandie | 13131 | 1327 | 12718 |
| NORMANDIE | 41605 | 2762 | 46056 |
| France Métropolitaine | 383406 | 22280 | 455425 |
| Part NORMANDIE / France métropolitaine | 11% | 12% | 10% |

Des estimations plus récentes indiquent des enjeux encore plus forts : 100 000 bâtiments et 450 km² de prairies seraient situés sous le niveau marin actuel en Normandie (F. Gresselin, communication personnelle, 13 novembre 2019).

3. Dégradation des milieux naturels

Les écosystèmes normands subiront les effets du changement climatique à des degrés divers et **les plus touchés seront les zones humides**.

Ces milieux sont déjà en régression en Normandie ; jusqu'à 90% des zones humides (notamment des mares) ont été détruites ou drainées pour augmenter les surfaces agricoles. Ils seront fortement fragilisés par la sécheresse, à travers l'affaiblissement du débit des cours d'eau et le déficit de recharge des nappes (DATAR, 2013 ; DREAL HAUTE-NORMANDIE, 2015).

4. Erosion de la biodiversité

Les changements du climat normand impactent la biodiversité, notamment sa **répartition géographique** (DATAR, 2013 ; DREAL BASSE-NORMANDIE, 2015 ; DREAL HAUTE-NORMANDIE, 2015 ; GILBERT *et al.*, 2017).

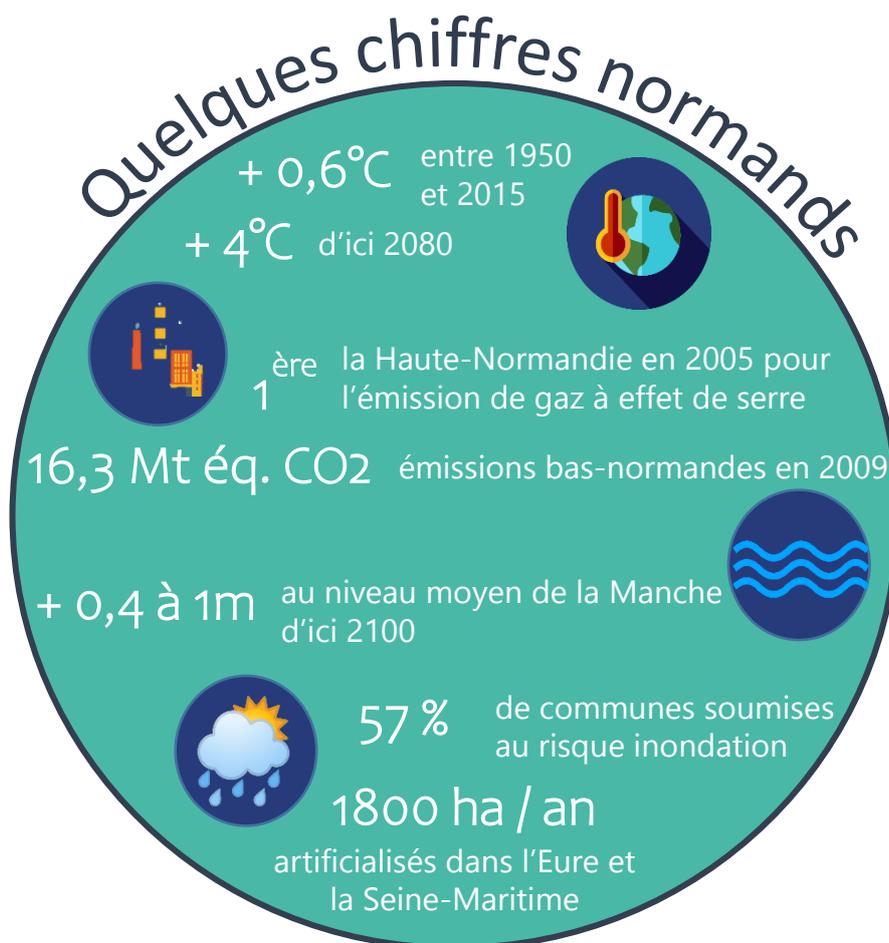
Les milieux humides sont les plus concernés par ces changements ; la biodiversité qui leur est associée, soit 36% des espèces normandes, est donc particulièrement menacée. Les espèces devront notamment faire face à la baisse du niveau d'étiage des cours d'eau et à l'allongement de cette période (DATAR, 2013). Les populations d'amphibiens, déjà globalement en régression, pourraient subir un turnover de 48% à 78% d'ici 2080 (BARRIOZ *et al.*, 2015 ; DREAL HAUTE-NORMANDIE, 2015). Par exemple, le triton crêté et, dans une moindre mesure, les autres espèces de tritons, voient déjà leurs populations réduites par la raréfaction des mares (DREAL HAUTE-NORMANDIE, 2015) et probablement par la salinisation de certains de leurs habitats littoraux (F. Gresselin, communication personnelle, 13 novembre 2019).

5. Autres impacts

D'autres impacts du changement climatique toucheront certainement la Normandie ; ils ne sont pas tous énumérés dans ce rapport qui se focalise sur les impacts principaux et ceux qui peuvent être liés aux mares.

Il est indispensable de citer le **problème de confort thermique** engendré par les vagues de chaleur et les canicules, malheureusement associé à une **surmortalité de la population**. L'**effet « îlot de chaleur urbain »**, c'est-à-dire l'accumulation de chaleur dans les bâtiments, les revêtements de route, etc., aggrave la situation en ville (DATAR, 2013). A titre d'exemple, à Caen, le 23 juillet 2019, il faisait encore 30°C à 2h du matin (BAILLET, 2019).

La **propagation des vecteurs de maladies** comme le moustique tigre est un autre impact risquant d'affecter directement la population normande dans les années à venir (DATAR, 2013). En 2019, les cinq départements normands sont passés en vigilance sanitaire vis-à-vis du moustique tigre (F. Gresselin, communication personnelle, 13 novembre 2019).



(DATAR, 2013 ; DREAL BASSE-NORMANDIE, 2015 ; DREAL HAUTE-NORMANDIE, 2015)

Résumé partie II.

La Normandie, malgré son climat océanique particulièrement tempéré, subit globalement les mêmes effets et impacts climatiques que ceux annoncés à l'échelle mondiale. La température déjà en hausse continuera d'augmenter et la montée des eaux se poursuivra sur les côtes. Il est très difficile de prévoir les variations des précipitations mais il est possible que la Normandie subisse une raréfaction des précipitations estivales et une hausse des précipitations hivernales. Les événements climatiques extrêmes dont la fréquence et l'intensité risque d'augmenter dans la région sont les canicules, les inondations, les submersions et les ouragans.

La Normandie doit se préparer aux impacts que ces changements engendreront. La ressource en eau sera certainement compromise quantitativement et qualitativement sous l'action combinée de la hausse des températures et des épisodes de sécheresse, de l'élévation du niveau marin, de la pollution accrue des cours d'eau et nappes et, si elle a lieu, de la baisse des précipitations hivernales. Le manque d'eau pourra induire un risque d'incendies et causer des difficultés agricoles. En parallèle, le risque d'inondation sera de plus en plus important, notamment dans les zones très artificialisées. Les milieux naturels et la biodiversité de Normandie seront directement menacés par les changements climatiques, notamment dans les milieux aquatiques. Enfin, les normands eux-mêmes subiront l'inconfort et la dangerosité des canicules et verront apparaître de nouvelles maladies *via* leurs vecteurs.

III. Les mares et le climat : quelles interactions ?

A. Impacts des changements climatiques sur les mares

1. Impacts sur le milieu

Les mares, en tant qu'écosystèmes aquatiques fragilisés par les activités humaines, font partie des **écosystèmes les plus menacés par le changement climatique** (WILLIAMSON *et al.*, 2009 ; WOODWARD *et al.*, 2010). Les variations climatiques, déjà importantes chez ces petits écosystèmes dynamiques, seront amplifiées, ce qui modifiera les processus géochimiques (MACRAE *et al.*, 2014 ; GILBERT *et al.*, 2017).

L'élévation des températures atmosphériques induira un **réchauffement de l'eau** des mares alors que, parallèlement, elles **recevront moins d'eau** du fait de précipitations très perturbées (WOODWARD *et al.*, 2010 ; O'REAGAN *et al.*, 2014). **Elles risquent donc de s'assécher plus tôt, plus rapidement, voire de disparaître, accentuant la fragmentation de ce réseau de milieux. Des mares jusqu'ici permanentes pourraient devenir temporaires** (WOODWARD *et al.*, 2010 ; MACRAE *et al.*, 2014 ; O'REAGAN *et al.*, 2014). Pour une mare, cela peut signifier un changement de taille important ; parfois des variations de la salinité (LABAUGH *et al.*, 2018).

Au Canada, la hausse des températures et l'avancement des dates de dégel n'a pas encore impacté la durée pendant laquelle les mares sont en eau ou le taux d'évaporation, qui ont une forte variation interannuelle. Mais dans cette région du globe les précipitations ont augmenté, notamment l'été, il est donc possible que de telles variations aient déjà eu lieu ailleurs (MACRAE *et al.*, 2014).

Le réchauffement estival de l'eau augmentera potentiellement les **concentrations en nutriments** dans l'eau en stimulant les processus microbiens (OERTLI & FROSSARD, 2013), mais aura pour conséquence la **concentration des toxines et des polluants** via l'évaporation (WOODWARD *et al.*, 2010 ; GILBERT *et al.*, 2017).

Les **mares littorales**, quant à elles, sont **menacées par l'élévation du niveau des mers** (ABE-GOULIER *et al.*, 2019). Elles risquent de subir une transformation radicale par l'arrivée d'eau salée, voire de disparaître sous l'eau. Ces perturbations pourraient cependant contribuer à l'apparition de nouvelles mares d'eau saumâtre pouvant abriter une riche biodiversité.

2. Impacts sur la biodiversité

Les **eaux douces** représentent 0.8% de la surface de la planète mais hébergent 6% de la biodiversité spécifique (WOODWARD *et al.*, 2010) ; elles constituent des **hots spots de biodiversité**. Les mares ne font pas exception, **en particulier les mares temporaires** qui abritent des espèces adaptées à leur fonctionnement (GILBERT *et al.*, 2017).

Le changement climatique agit sur la distribution des espèces dans les mares, augmentant le **risque d'invasions, mais aussi d'extinctions**. En effet, **la dispersion ou la migration qui sera nécessaire à la survie de certaines espèces est limitée par la fragmentation de ces milieux**. Les espèces sténothermes froides, qui représentent presque 20% de la biodiversité des mares européennes, sont donc fortement menacées à long terme (WOODWARD *et al.*, 2010 ; OERTLI & FROSSARD, 2013 ; GILBERT *et al.*, 2017).

Par ailleurs, le changement climatique, en élevant la température des mares, favorise les organismes eutrophes plutôt qu'oligotrophes, qui représentent moins de richesse spécifique (donnée à vérifier

pour le territoire normand) (OERTLI & FROSSARD, 2013). Pourtant selon une étude réalisée en Suisse, **la hausse des températures pourrait augmenter la richesse spécifique** des mares situées en zone tempérée, particulièrement en altitude. La richesse moyenne passerait de 34 à 70 espèces en Suisse (ROSSET *et al.*, 2010).

Le dérèglement climatique affecte différemment chacun des taxons présents dans les mares ; les impacts spécifiques aux principaux taxons sont présentés ci-après.

- La végétation aquatique

Les conséquences des changements climatiques sur les plantes ont surtout été étudiées dans les systèmes agricoles et forestiers (CORNELISSEN, 2011), aussi peu de données sont disponibles sur la végétation des mares face au contexte climatique. On peut supposer que la végétation profitera du **boost de photosynthèse** engendré par l'augmentation des teneurs en CO₂ atmosphérique (OERTLI & FROSSARD, 2013), mais il est plus probable qu'elle soit **négativement impactée par la sécheresse**. Le boost de photosynthèse risque par ailleurs de provoquer des dysfonctionnements biologiques (F. Gresselin, communication personnelle, 13 novembre 2019).

D'après le GIEC, la plupart des espèces végétales ont une **capacité de dispersion trop faible** compte tenu des perturbations annoncées (GIEC, 2014), mais dans le cas des espèces inféodées aux mares, la dispersion d'une espèce dépend principalement de la connectivité du réseau de mares (OERTLI & FROSSARD, 2013). Des **adaptations phénologiques** sont également possibles (HASSALL, 2015).

Les **espèces végétales exotiques envahissantes**, en revanche, seront **potentiellement favorisées** par la douceur hivernale (OERTLI & FROSSARD, 2013).

- Les insectes

Les insectes représentent une **grande partie de la biodiversité des mares** (OERTLI & FROSSARD, 2013). Ces espèces sont mobiles, ont une forte capacité reproductrice et des cycles de vie courts, ce qui devrait conduire à d'**importantes adaptations aux changements climatiques** (STRANGE & AYRES, 2010 ; WOODWARD *et al.*, 2010). Des changements **phénologiques, de distribution** et même **génétiques** ont déjà été constatés (MENEDEZ, 2007).

Dans les régions tempérées, **la hausse globale des températures pourrait même leur être favorable** en accélérant leur développement et en augmentant leur fitness (KINGSOLVER *et al.*, 2011). Cependant, ce ne pourra être le cas de certaines espèces particulièrement adaptées à un climat frais (sténothermes froids). Par ailleurs, **une forte vague de chaleur pourrait empêcher les insectes de terminer leur développement** et nuire à la survie des espèces par assèchement prématuré de la mare. Pour les insectes semi-aquatiques, l'eau devrait contribuer à protéger les œufs et les larves de fortes variations climatiques telles que les vagues de chaleur (KINGSOLVER *et al.*, 2011), en plus de paramètres exogènes comme la végétation rivulaire et son ombre portée (F. Gresselin, communication personnelle, 13 novembre 2019).

Chez les coléoptères aquatiques inféodés aux eaux stagnantes, 40% des espèces déterminantes de ZNIEFF présentent une répartition septentrionale ou à tendance septentrionale (L. Picard, communication personnelle, 30 octobre 2019).

Chez les trichoptères, la plupart des espèces d'Europe du Nord ont une grande aire de répartition et sont généralistes, ce qui les rend résilients au changement climatique. En revanche, de nombreuses espèces du Sud de l'Europe pourront être menacées (HERING *et al.*, 2009).

Les **odonates** font partie des taxons pour lesquels **une migration vers le Nord a été constatée**, y compris en Europe (MENENDEZ, 2007 ; OTT, 2010). Aux Etats-Unis les espèces adaptées aux climats tempérés ont migré vers le Nord de 88km en moyenne entre 1960 et 1995 (PARMESAN, 2006). Les odonates sont **susceptibles de réagir fortement aux changements climatiques**, aussi bien dans leur **phénologie** (reproduction plus précoce) que dans leur **distribution** (HASSALL, 2015). Toutefois, la physiologie de ces espèces étant dépendante des températures, on observera des **impacts positifs du changement climatique** (comme l'accélération du développement) **mais aussi négatifs** comme la perturbation de la diapause. L'assèchement des mares peut en outre causer une **importante mortalité des œufs**, exerçant ainsi une pression de sélection en faveur des espèces de milieux aquatiques temporaires (DIJKSTRA & LEWINGTON, 2015 ; GIRARD, 2019).

- Les amphibiens

S'il n'est pas prouvé que le changement climatique soit une cause directe du déclin actuel des amphibiens, il est admis que **ces espèces sont impactées** par les changements qui vont s'intensifier, notamment à cause de leur **faible mobilité** (CAREY & ALEXANDER, 2003 ; O'REAGAN *et al.*, 2014 ; ABE-GOULIER *et al.*, 2019).

Le paramètre du changement climatique qui devrait le plus affecter les amphibiens est la disponibilité en eau. **Les variations de précipitations influencent fortement le succès reproductif** (mortalité des larves) et donc peuvent impacter les espèces à faible longévité. D'autre part, la baisse du niveau d'eau **diminue quantitativement les ressources végétales (supports de ponte et base du réseau trophique), concentre les polluants** et accentue l'exposition aux UV-B, ce qui favorise les **infections par des champignons**. Les adultes peuvent également mourir de **déshydratation** en cas de sécheresse excessive (CAREY & ALEXANDER, 2003).

Il est rare que les amphibiens meurent d'un excès de chaleur car ils ne vivent normalement pas dans des zones où la température peut atteindre leur limite, mais ils souffrent d'effets indirects du réchauffement. L'élévation des températures favorise certainement la **propagation du champignon *Batrachochytrium dendrobatidis***, qui a provoqué l'extinction de nombreuses espèces d'amphibiens partout dans le monde et qui est déjà présent en Europe (CAREY & ALEXANDER, 2003 ; POUNDS *et al.*, 2006 ; BAKER *et al.*, 2011).

Par ailleurs, les impacts d'une hausse des températures sur leur reproduction ont été largement étudiés et sont schématisés dans la Figure 3. Globalement, le réchauffement **avance la période de reproduction** de quelques semaines, avec des variations spécifiques. (CAREY & ALEXANDER, 2003 ; PARMESAN, 2006 ; O'REAGAN *et al.*, 2014). En effet, la température conditionne la sortie d'hibernation, la gamétogénèse, le comportement reproducteur et le taux de croissance des larves et juvéniles (CAREY & ALEXANDER, 2003 ; BARRIOZ *et al.*, 2015). Les avantages d'une reproduction plus précoce sont que les individus accumulent **davantage de réserves avant l'hibernation** et ont **plus de chance d'atteindre la métamorphose avant l'assèchement de la mare**. L'inconvénient est une **mortalité due au froid** et une **perturbation des interactions interspécifiques**. En Angleterre par exemple, la reproduction précoce des tritons a entraîné une plus forte prédation sur les œufs et larves d'anoures (CAREY & ALEXANDER, 2003 ; O'REAGAN *et al.*, 2014).

Une faible disponibilité en eau et une plus forte chaleur peuvent donc avoir des effets antagonistes sur la survie des amphibiens, la deuxième compensant la première dans une certaine mesure (O'REAGAN *et al.*, 2014). Cet équilibre est très complexe et dépend également d'un autre phénomène physiologique : **l'accélération du métabolisme par la température**, qui amènera les larves soit à se développer plus vite et à **se métamorphoser avant l'assèchement de la mare**, soit à entrer fortement en **compétition face à un besoin en ressources accru**. Ce deuxième cas de figure conduirait à une métamorphose à faible taille et diminuerait les chances de survie des juvéniles (O'REAGAN *et al.*, 2014).

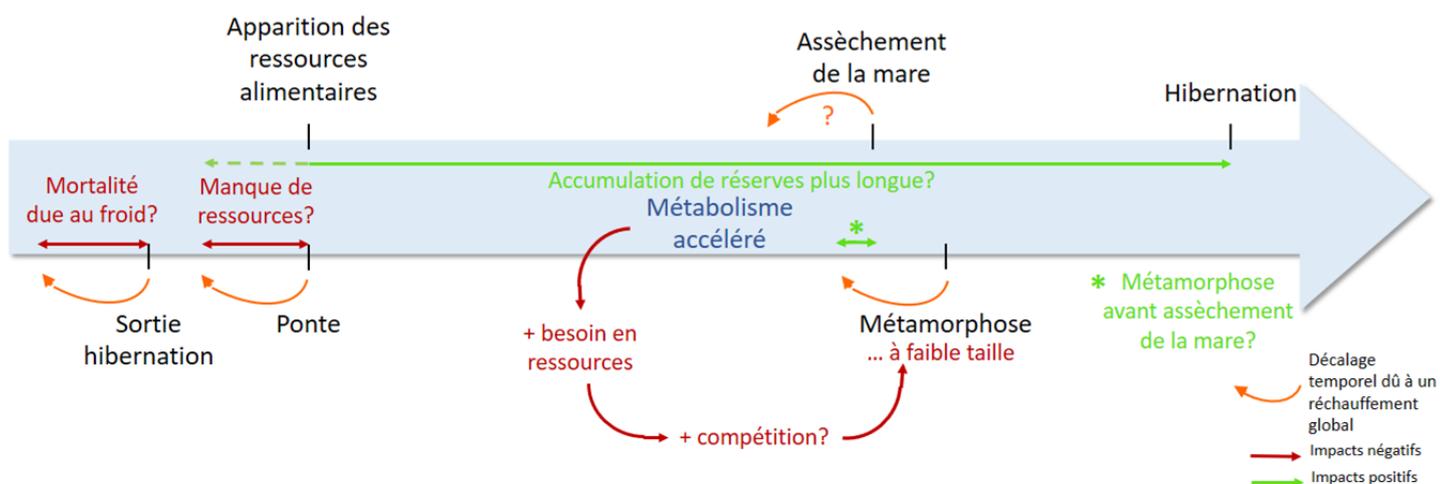


Figure 3 : Potentiels impacts de la hausse globale des températures sur la reproduction des amphibiens. Les intervalles de temps ne sont pas représentés à l'échelle.

- Autres taxons

De nombreuses espèces des mares se dispersent trop lentement pour échapper aux perturbations, telles que les petits mammifères (campagnol amphibie, musaraigne aquatique), les mollusques ou encore les poissons dont la migration est très limitée (WOODWARD *et al.*, 2010 ; OERTLI & FROSSARD, 2013 ; GIEC, 2014).

D'autres espèces présentes dans ou autour des mares sont plus adaptables car plus mobiles, comme les oiseaux, ou plus résistantes, comme les célèbres tardigrades (OERTLI & FROSSARD, 2013).

B. Rôle des mares face au changement climatique

On estime qu'il y aurait sur Terre **3 milliards de mares** de 100 à 1000 m², soit une surface de 0.8 milliards de km² ou 20 mares par km² (LEHNER & DÖLL, 2004 ; OERTLI & FROSSARD, 2013). Les mares agricoles, à elles seules, représenteraient 77000 km² à l'échelle mondiale (DOWNING & DUARTE, 2009). Avec les étangs et petits lacs, les mares constituent un tiers de la surface des eaux continentales (DOWNING, 2010).

Le rôle écologique des petites collections d'eau a souvent été négligé ; pourtant elles sont extrêmement nombreuses et **les processus écologiques y sont particulièrement intenses** (DOWNING, 2010 ; EPCN, 2010). **Par conséquent, le fonctionnement écologique des mares doit avoir un impact environnemental suffisamment important pour interagir avec les changements climatiques** (EPCN, 2010).

Cette partie traite de l'atténuation de différents impacts du changement climatique grâce aux mares ; ces capacités d'atténuation sont synthétisées dans le Tableau 2.

1. Disponibilité en eau douce de surface

Les mares, comme toutes les zones humides, **régulent la ressource en eau** (UICN, 2018). En effet, elles sont alimentées par les eaux de pluie (alimentation directe et ruissellement), par des sources ou résurgences, ou par une nappe phréatique et peuvent ensuite **retenir cette eau et recharger les aquifères** (EPCN, 2010 ; CEREGHINO *et al.*, 2013 ; ABE-GOULIER *et al.*, 2019). Dans certains pays comme le Népal, la réhabilitation des mares est déjà utilisée, avec succès, pour pallier au manque d'eau disponible (BASTAKOTI *et al.*, 2016).

Cette disponibilité en eau est d'autant plus essentielle que le risque d'incendies est en augmentation. Dans ce contexte, les mares peuvent constituer une réserve d'eau pour la lutte contre les incendies (ABE-GOULIER *et al.*, 2019).

En outre, les mares présentent une forte capacité épuratoire leur permettant, par dénitrification, sédimentation et assimilation par les plantes, **d'améliorer la qualité de l'eau**. A l'échelle d'un bassin versant, il est donc possible d'atténuer les pollutions amplifiées par le changement climatique (EPCN, 2010 ; RANCE & DOMINGUES, 2018a).

Les mares améliorent donc la disponibilité en eau en atténuant conjointement plusieurs impacts du dérèglement climatique.

Cette capacité est à nuancer pour les mares sur nappes, car les nappes alors mises en affleurement peuvent être davantage polluées et leur température peut augmenter via le réchauffement de la mare (F. Gresselin, communication personnelle, 13 novembre 2019).

2. Récupération des surplus de précipitations

Lors de fortes précipitations, les mares **diminuent le volume des ruissellements** en conservant une partie (voire la totalité) des écoulements, ce qui retarde l'afflux d'eau dans les rivières. L'eau est alors lentement absorbée par le sol et la végétation (EPCN, 2010 ; CEREGHINO *et al.*, 2013 ; ABE-GOULIER *et al.*, 2019). Lorsque les précipitations surpassent la capacité maximale de la mare, celle-ci déborde vers l'aval mais des aménagements permettent de gérer ce débordement (ABE-GOULIER *et al.*, 2019). Les SUDS, Sustainable Urban Drainage System ou « techniques alternatives pour la gestion des eaux de

ruissellement urbain » en français, incluent déjà les mares dans leur panel de techniques (BAKER *et al.*, 2011).

A large échelle, aucun effet notable n'est observé (F. Gresselin, communication personnelle, 13 novembre 2019) mais à une échelle locale, les mares peuvent contribuer à **atténuer les inondations** en cas de tempête ou de pics de précipitations (EPCN, 2010 ; ELSHORBAGY *et al.*, 2018 ; UICN, 2018). Cette capacité peut être exploitée pour diminuer localement le risque climatique.

3. Séquestration du carbone atmosphérique

L'**absorption des émissions de carbone par les écosystèmes** est reconnue (UICN, 2018). Environ 60% des gaz à effet de serre émis par les activités humaines depuis 1750 ont été stockés dans la végétation, les sols et les océans, soit la moitié du CO₂ émis chaque année dans le monde (GIEC, 2014 ; UICN, 2018). Il est déjà établi que les lacs régulent le changement climatique en séquestrant le carbone (WILLIAMSON *et al.*, 2009) mais ce processus a été **très peu étudié pour les mares** (DOWNING, 2010). Pourtant, **les mares absorbent effectivement le carbone atmosphérique**, et des études commencent à mettre en lumière l'intensité de l'assimilation qui y a lieu (DOWNING & DUARTE, 2009 ; CEREGHINO *et al.*, 2013 ; GILBERT *et al.*, 2017).

Dans une mare, en plus d'être absorbé directement par la végétation émergée, le CO₂ est dissous dans l'eau sous la forme de carbonate CO₃²⁻ ou bicarbonate HCO₃²⁻ (forme majoritaire). Il est ensuite transformé en carbone organique par le phytoplancton et les végétaux aquatiques *via* la photosynthèse (OERTLI & FROSSARD, 2013). Ces organismes sont eux-mêmes consommés, puis **la décomposition de la matière organique transfère le carbone dans les sols et les sédiments, où il restera à moyen ou long terme** (UICN, 2018 ; EFESE, 2019).

Ce stockage n'est pas permanent : **le carbone peut être relargué sous forme de CO₂ dans l'atmosphère** (EFESE, 2019). En effet, **l'assèchement d'une mare provoque la minéralisation du carbone** organique par des bactéries aérobies et en quelques jours le transfert de CO₂ peut être inversé. L'émission est particulièrement importante durant les premiers jours d'assèchement et au moment de la réhumidification, il est donc problématique qu'une mare s'assèche et se remette en eau plusieurs fois dans l'été. De même, une longue période à sec n'est pas favorable au climat puisque la production de CO₂ augmente tout au long de la période d'assèchement. Cela peut être dû à une faible activité photosynthétique puisque les végétaux aquatiques subissent un fort stress hydrique. De ce point de vue une végétation plus fournie, qui garde un peu d'humidité, est préférable : cela conserve une activité photosynthétique et atténue l'assèchement des sédiments. En revanche le type de végétation ne semble pas avoir d'influence sur le flux de CO₂ (GILBERT *et al.*, 2017).

D'autres gaz à effet de serre peuvent être émis par les mares dans des conditions climatiques défavorables : le méthane CH₄ et le dioxyde d'azote NO₂. Cependant, ces émissions sont minimes par rapport aux quantités de carbone séquestrées (DOWNING, 2010).

D'après l'Évaluation Française des Écosystèmes et des Services Écosystémiques (EFESE, 2019), les milieux humides stockent efficacement le carbone mais représentent une faible surface et ne stockent donc que 1% des émissions françaises actuelles. Or, ces écosystèmes couvrent en réalité de très grandes surfaces (DOWNING, 2010). De fait, les tourbières stockent deux fois plus de carbone que les forêts et les zones humides en général stockent plus de carbone par an que les sédiments océaniques (WILLIAMSON *et al.*, 2009 ; UICN, 2018). L'EFESE estime que **les zones humides pourraient stocker 1,8 milliard teqCO₂/an à l'échelle mondiale, ce chiffre étant calculé pour des surfaces en eau**

probablement sous-estimées (EFESE, 2019). A ce jour il n'existe aucune estimation de la séquestration de carbone par les zones humides en Normandie.

Parmi les milieux aquatiques, les petites collections d'eau stockent plus de carbone par unité de surface que les grandes. Le taux séquestration du carbone dans les retenues d'eau est 10 fois plus important que celui de zones humides moyennes et 10 000 fois plus important que celui des océans (DOWNING, 2010). Ainsi, **l'assimilation du carbone par les mares est une des plus élevées tous écosystèmes confondus, avec une estimation moyenne de 1000 kg de carbone/an pour une mare de 500 m²** (CERECHINO *et al.*, 2013 ; GILBERT *et al.*, 2017) ! A l'échelle mondiale, les mares de ferme à elles seules **séquestrent probablement plus de carbone que les océans** (DOWNING, 2010 ; CERECHINO *et al.*, 2013).

Malgré un possible relargage, du fait de leur surface cumulée et de l'intensité des processus de stockage du carbone qui y sont associés, les mares pourraient être les écosystèmes les plus importants pour la séquestration du carbone (DOWNING, 2010). Or, la gestion des émissions de CO₂ déterminera fortement le réchauffement global à venir (donc l'amplitude des dérèglements climatiques associés) (GIEC, 2014) ; il est donc crucial de tenir compte du rôle d'atténuation des mares.

4. Biodiversité : métapopulations, connectivité et migration des espèces

Les petits écosystèmes aquatiques sont plus complexes et plus riches que les grands. Le recouvrement en macrophytes et la richesse spécifique en amphibiens, invertébrés et oiseaux aquatiques y sont plus importants. Ils sont également plus résistants aux invasions par des espèces exotiques envahissantes (DOWNING, 2010). En Grande-Bretagne, il est admis que les mares et étangs contribuent plus à la biodiversité régionale en végétaux et en macroinvertébrés que les lacs, les rivières, les ruisseaux et les fossés (EPCN, 2010 ; BAKER *et al.*, 2011). Les mares sont d'autant plus importantes que leur biodiversité diffère de celle d'autres milieux aquatiques comme les cours d'eau ou les lacs (OERTLI & FROSSARD, 2013). De ce point de vue elles n'ont donc aucun équivalent. Il est de plus à noter que les mares abritent de nombreuses espèces prédatrices des larves de moustiques (C. Domingues, communication personnelle, 25 novembre 2019), qui peuvent être vecteurs de maladies.

Une caractéristique forte des mares est qu'elles fonctionnent en **réseaux** et abritent des **métapopulations** d'amphibiens, d'invertébrés, de végétaux, etc. (EPCN, 2010 ; BAKER *et al.*, 2011 ; HASSALL, 2014). Cela favorise globalement la biodiversité spécifique et génétique et limite les risques d'extinctions (OERTLI & FROSSARD, 2013). Or, **la bonne connectivité de ces réseaux est indispensable pour permettre la migration des espèces en réponse au changement climatique**, en particulier pour les amphibiens (CERECHINO *et al.*, 2013 ; OERTLI & FROSSARD, 2013).

On considère que les mares sont bien connectées entre elles lorsque le réseau est dense (mares nombreuses et proches) et que les connexions entre les mares sont de bonne qualité (corridors écologiques) (OERTLI & FROSSARD, 2013). Ainsi, lorsqu'une mare s'assèche, les espèces migrent facilement vers une mare encore en eau (OERTLI & FROSSARD, 2013). Ce comportement migratoire est essentiel pour la survie des espèces aux changements climatiques. Il a en effet été démontré que la connectivité des écosystèmes diminuait les impacts d'une hausse des températures, les espèces ayant la possibilité de migrer vers le nord et les hautes altitudes (THOMPSON & SHURIN, 2012). La même étude montre que la connectivité des mares ne protège pas seulement les espèces, mais aussi l'écosystème en lui-même, car une espèce disparue ou partie peut alors être remplacée par une espèce arrivante assurant les mêmes fonctionnalités au sein du milieu. Développer les trames vertes et bleues peut donc permettre aux milieux aquatiques et à leurs espèces de faire face aux changements climatiques (DATAR, 2013).

Puisque la connectivité des mares facilite les déplacements des espèces aquatiques, elle augmente aussi le risque de contamination par des pathogènes ou d'invasion par des espèces exotiques. Il est donc **important de conserver quelques mares plus isolées** (EPCN, 2010 ; OERTLI & FROSSARD, 2013).

Tableau 2 : Effets/impacts du changement climatique et leur atténuation par les mares

| Effet ou impact du changement climatique | Capacité d'atténuation des mares |
|--|--|
| ↘ ressource en eau | Rétention et épuration de l'eau |
| ↗ risque inondation | Absorption des ruissellements, notamment sur événement météo ponctuels |
| Erosion de la biodiversité | Milieu très favorable à la biodiversité |
| Fragmentation des milieux | Corridors "en pas japonais", trame bleue |
| ↗ CO ₂ atmosphérique | Séquestration du carbone |
| Changements globaux | Milliards de mares sur la planète |

C. Agir en faveur des mares : une solution fondée sur la nature

Rappelons que les **Solutions fondées sur la Nature** sont définies comme « les actions visant à **protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes** naturels ou modifiés pour relever directement les défis de société de manière efficace et adaptative, tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité » (Figure 4) (UICN, 2018).

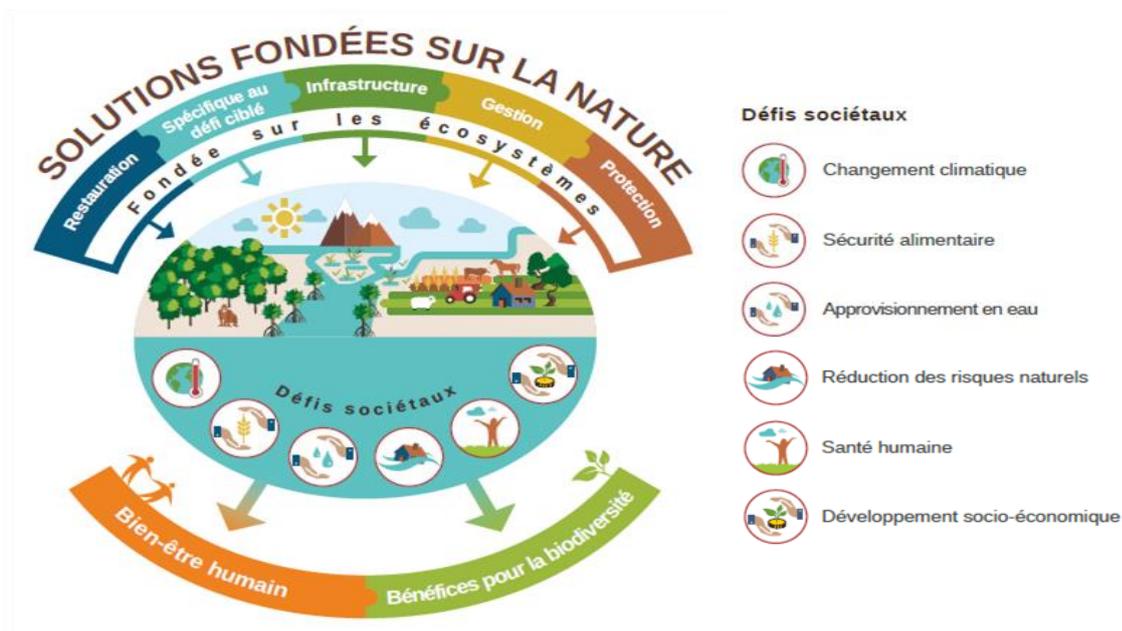


Figure 4 : Définition schématique des Solutions fondées sur la Nature (UICN, 2018)

Les Solutions fondées sur la Nature doivent **répondre au mieux aux grands enjeux du XXI^{ème} siècle**, regroupés en six défis : le changement climatique, la sécurité alimentaire, l’approvisionnement en eau, la réduction des risques naturels, la santé humaine et le développement socio-économique (Figure 4). Cela ne peut se faire sans des écosystèmes sains, résilients, fonctionnels et diversifiés, aussi les Solutions fondées sur la Nature contribuent directement à la préservation des écosystèmes (UICN, 2018).

Les Solutions fondées sur la Nature se déclinent en (UICN, 2018) :

- Restauration écologique : consiste à restaurer l’état initial d’un écosystème
- Ingénierie écologique : consiste à entretenir, restaurer, réhabiliter ou réaffecter un écosystème
- Infrastructure verte : favorise les réseaux d’écosystèmes comme les trames vertes et bleues
- Gestion fondée sur les écosystèmes : approche globale de la résilience des écosystèmes et les services qu’ils offrent à la société
- Restauration des paysages forestiers : vise à atteindre un équilibre entre les bénéfices écologiques, économiques et sociaux des forêts
- Adaptation fondée sur les écosystèmes : adaptation aux effets du changement climatique grâce aux fonctionnalités des écosystèmes
- Atténuation fondée sur les écosystèmes : consiste à limiter le changement climatique via la séquestration des gaz à effet de serre par les écosystèmes
- Réduction des risques naturels fondée sur les écosystèmes : consiste à amortir les effets d’évènements climatiques extrêmes

Pour être une Solution fondée sur la Nature, une action doit s’appuyer sur les écosystèmes pour contribuer à répondre aux défis sociétaux du XXI^{ème} siècle (selon l’une des modalités ci-dessus) **et présenter des bénéfices pour la biodiversité** (UICN, 2018).

Les actions centrées sur les mares répondent tout à fait à ces critères, aussi bien sur le volet biodiversité (voir partie III.B.4.) que sur les autres défis. Les mares entrent même dans la plupart des catégories de Solutions fondées sur la Nature listées ci-dessus.

En effet, la séquestration du carbone par les mares est extrêmement efficace (voir partie III.B.3.), en particulier sur le long terme (GILBERT *et al.*, 2017). Disposer de mares fonctionnelles sur un territoire constitue donc une « atténuation fondée sur les écosystèmes ». Le Plan gouvernemental sur le climat (MINISTERE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE ET SOLIDAIRE, 2017) prévoit d’ailleurs de mobiliser le potentiel des écosystèmes pour renforcer la séquestration du carbone dans les sols, afin que la France atteigne la **neutralité carbone à l’horizon 2050**. Pour cette raison et parce que **la séquestration du carbone permet d’atténuer le changement climatique dans sa globalité**, l’atténuation fondée sur les écosystèmes sera peut-être prioritaire dans les années à venir, ce qui devrait faire des mares les écosystèmes phares des Solutions fondées sur la Nature.

Les mares, en diminuant les risques d’inondations, en servant de réserve d’eau contre les incendies et en conservant la ressource en eau, sont également une Solution fondée sur la Nature de type « réduction des risques naturels ».

Il a été établi que les mares fonctionnaient en réseau et que ces derniers étaient primordiaux pour la survie des espèces qui y sont inféodées, maintenir un réseau de mares est donc une Solution fondée sur la Nature de type « infrastructure verte ».

La « restauration écologique » ou l'« ingénierie écologique » peuvent être appliquées aux mares pour améliorer leurs capacités d'atténuation ; l'intérêt de ces actions est davantage détaillé dans la partie IV.B.

Enfin, puisque les effets et impacts du changement climatique sont interconnectés et que les mares régulent plusieurs d'entre eux, elles répondent également aux catégories « gestion fondée sur les écosystèmes » et « adaptation fondée sur les écosystèmes ».

Agir en faveur des mares, c'est-à-dire les créer, les entretenir, les restaurer, les préserver, les connecter, semble donc une solution au changement climatique fondée sur la nature efficace, polyvalente, et simple à mettre en œuvre (les mares étant de petits écosystèmes) (GILBERT *et al.*, 2017).

L'atténuation des effets du changement climatique peut augmenter les chances d'éviter des conséquences graves et irréversibles. Mais pour s'assurer de son efficacité à long terme, il faut mettre en place un suivi (UICN, 2018) et travailler à différentes échelles (mondiale, nationale, régionale, etc.) (GIEC, 2014). Ce rapport s'intéresse dans la partie suivante à l'échelle régionale de la Normandie.

Résumé partie III.

Les mares sont des écosystèmes menacés par le changement climatique, qui entraîne notamment un risque d'assèchement. La biodiversité associée aux mares devra faire face aux perturbations voire à la raréfaction de leurs milieux, avec des chances de réussite plus ou moins élevées selon les taxons : les insectes ont un potentiel de migration, de changements phénologiques et d'adaptations génétiques important ; la flore aquatique et les amphibiens ont une faible capacité de dispersion qu'ils devront compenser par d'autres mécanismes. Au vu de la complexité des impacts des changements climatiques sur les différents taxons et de leurs interactions, il est délicat de prédire à quel point ceux-ci seront négatifs et quel sera le succès adaptatif des espèces.

Tout en subissant le changement climatique, les mares ont la capacité d'atténuer certains de ses effets ou impacts. Elles peuvent améliorer la ressource en eau : en conservant en surface les ruissellements et les apports par les sources ou par les nappes, en rechargeant les nappes, et en améliorant la qualité de l'eau grâce à leur capacité épuratoire. En absorbant les ruissellements, elles diminuent le risque d'inondation. Les mares sont des hot spots de biodiversité et constituent un réseau pour des métapopulations d'espèces aquatiques ; la densité et la bonne connectivité de ce réseau conditionnera la migration des espèces en réponse aux changements climatiques. Enfin, et surtout, les mares semblent être des puits de carbone extrêmement importants car ce sont des écosystèmes où la séquestration du carbone est très intense et qu'ils représentent une très grande surface du globe.

Les actions en faveur des mares correspondent à la définition des Solutions fondées sur la Nature et semblent être particulièrement pertinentes en tant que telles, car elles sont polyvalentes, simples à mettre en œuvre et probablement très efficaces.

IV. L'atténuation des effets et impacts du changement climatique en Normandie grâce aux mares

A. Les mares normandes et leur potentiel

1. Quelques caractéristiques des mares normandes

On estime qu'il existe **un million de mares en France** (EPCN, 2010). **En Normandie, le Programme Régional d'Action en Faveur des Mares mène un recensement des mares** à long terme ouvert à la participation du public ; le nombre de mares connues est donc en perpétuelle augmentation. Au 3 octobre 2019, **24 603 mares ont été recensées** (24 364 au 5 septembre 2019). Ce chiffre est probablement largement inférieur au nombre réel de mares, mais l'estimation de ce dernier nécessiterait un travail spécifique.

Selon son usage d'origine et le paysage dans lequel elle s'inscrit, la mare normande appartient à l'un des types suivants (ABE-GOULIER *et al.*, 2019) :

- **Mares de village** : destinées à la collecte eaux pluviales, leur valorisation est en augmentation.
- **Mares de cour de ferme** : à l'origine créées pour l'approvisionnement en eau, elles sont aujourd'hui très riches en biodiversité ou très polluées selon leur environnement.
- **Mares de champs** : elles collectent les ruissellements de cultures (et reçoivent donc des intrants). On les trouve surtout dans le bassin parisien, la plaine de Caen, etc.
- **Mares de prairie** : souvent utilisées pour l'abreuvement du bétail, leur potentiel écologique est important. On les trouve logiquement dans le bocage.
- **Mares de marais** : elles sont des écosystèmes remarquables, présentes dans les marais, les baies et les estuaires.
- **Mares forestières** : elles sont rapidement comblées mais, dans une clairière, peuvent abriter une grande biodiversité
- **Mares littorales** : très diversifiées, elles ont un fort potentiel écologique. On les trouve sur tout le littoral.
- **Mares de jardin** : généralement ornementales, leur potentiel écologique est néanmoins intéressant
- **Mares tampons** : créées pour la gestion des eaux pluviales, elles se situent près des zones bâties, des axes routiers ou des zones agricoles.

De manière générale, **les mares normandes abritent une riche biodiversité**, en particulier pour les amphibiens : 18 espèces sur les 42 françaises (ABE-GOULIER *et al.*, 2019). Elles sont également riches en plantes aquatiques et odonates et sont visitées par certains oiseaux d'eau, chiroptères et mammifères (ABE-GOULIER *et al.*, 2019). En 2012, l'ex-Basse-Normandie dénombrait 55 espèces d'odonates et l'ex-Haute-Normandie 49 espèces, sur 91 espèces françaises. Ce chiffre fait d'ailleurs de la France le pays européen le plus riche en odonates (IORIO & MOUQUET, 2018 ; GIRARD, 2019).

2. Quelles mares et gestions pour quelles atténuations ?

- Des mares diversifiées pour protéger la biodiversité

Les mares normandes sont des **réservoirs de biodiversité** mais leur efficacité en tant que tels varie selon certains paramètres (ABE-GOULIER *et al.*, 2019). Bien sûr, la **qualité de l'eau** conditionne la présence de certaines espèces (BAKER *et al.*, 2011). Des **berges en pentes douces** favorisent une plus grande diversité biologique (OERTLI & FROSSARD, 2013 ; ABE-GOULIER *et al.*, 2019). L'ombrage de la végétation limite généralement le développement de la vie dans une mare, mais dans un contexte de réchauffement global, l'ombrage des arbres peut maintenir une fraîcheur relative dans l'eau (OERTLI & FROSSARD, 2013). Il est possible de jouer sur ces paramètres pour maximiser la biodiversité des mares.

Certains types de mares sont également plus adaptés à la préservation de la biodiversité ; les **mares de jardin**, par exemple, peuvent constituer des **refuges pour la faune et la flore aquatique** (BAKER *et al.*, 2011 ; ABE-GOULIER *et al.*, 2019). Les particuliers devraient donc être encouragés à entretenir ces écosystèmes.

Néanmoins, les besoins diffèrent entre les espèces et certaines colonisent des mares qui n'apparaissent pas comme idéales pour l'accueil de la biodiversité. L'essentiel pour préserver les espèces aquatiques est donc de **maintenir un réseau de mares diversifiées**, présentant **divers stades d'atterrissement** et **divers types de mares** pour maximiser la diversité des espèces présentes (BAKER *et al.*, 2011 ; OERTLI & FROSSARD, 2013 ; ABE-GOULIER *et al.*, 2019).

- Un réseau de mares de qualité pour la migration des espèces

La DATAR (Délégation interministérielle à l'Aménagement du Territoire et à l'Attractivité Régionale) insiste sur l'importance de la **continuité écologique** et de la bonne santé des écosystèmes pour permettre la migration des espèces (DATAR, 2013). Les populations et métapopulations présentes sur les mares doivent avoir la possibilité de migrer pour survivre aux perturbations annoncées, principalement vers des régions plus froides (voir partie I.B.). Pour les amphibiens par exemple, on attend une migration vers le Nord d'environ 250 km chez certaines espèces (Grenouille rousse, Sonneur à ventre jaune, Pélobate brun...) (BARRIOZ *et al.*, 2015). **Il faut donc s'assurer qu'il existe en Normandie des corridors permettant une éventuelle migration des espèces et que ces corridors ne sont pas interrompus**. Certains taxons comme les odonates sont capables de traverser la mer de la Manche mais la plupart des individus migrent vers la Belgique (GRAND, 2009).

Le nord de la **Manche** pourrait également faire office de refuge climatique avec ses températures plus clémentes (DREAL BASSE-NORMANDIE, 2015), mais uniquement à moyen terme puisque ce territoire constitue une impasse. Cette partie de la région est de plus soumise à un **fort risque de submersion marine** (DATAR, 2013) ; ainsi sur le site de la mare de Vauville, l'élévation du niveau des mers transformera l'écosystème, qui ne sera plus adapté aux populations d'amphibiens. La présence de mares hors de la zone à risque pourrait permettre le repli des amphibiens (ABE-GOULIER *et al.*, 2019).

Par ailleurs, la **Normandie accueille déjà des espèces méridionales** qui ont potentiellement migré en réponse aux changements climatiques telles que *Anax parthenope* et *Sympetrum fonscolombii*, deux espèces d'odonates (GIRARD, 2019). La connectivité des mares doit aussi permettre la migration des espèces vers la Normandie depuis le Sud de la France. Certains axes migratoires sont déjà bien connus comme le littoral de la Manche, le Perche ou encore les vallées de la Seine et de l'Eure.

Les mares constituent l'un des éléments des corridors biologiques (avec les fossés, les haies, les prairies et autres éléments bocagers) permettant la dispersion des espèces. A elles seules, elles forment des **corridors « en pas-japonais »** (ABE-GOULIER *et al.*, 2019). Il est donc important de conserver une densité de mares suffisante pour qu'elles forment un réseau capable d'assurer les déplacements et la dispersion (donc la migration) des espèces. Les tritons, par exemple, sont réputés avoir une faible capacité annuelle de déplacement, de l'ordre de quelques centaines de mètres ; aussi **une distance maximale de 300 à 500m entre les mares est souvent considérée comme idéale** (BAKER *et al.*, 2011 ; OERTLI & FROSSARD, 2013 ; ABE-GOULIER *et al.*, 2019).

- Des mares rafraichissantes

Pour améliorer le confort de la population normande face aux fortes canicules à venir, les mares de jardin et les mares communales ou urbaines peuvent se révéler très utiles.

En effet, **les mares de jardin permettent la mise en place d'un microclimat qui pourrait être une source de rafraichissement** durant les chaleurs estivales, car l'évaporation de l'eau et l'évapotranspiration des végétaux diminue la température ambiante (ABE-GOULIER *et al.*, 2019). Il est même possible **d'utiliser l'énergie solaire absorbée par la mare** pour se fournir en eau chaude ou, l'hiver, de chauffer en partie une habitation grâce à la réverbération du rayonnement solaire à la surface de l'eau (ABE-GOULIER *et al.*, 2019). Atout supplémentaire des mares de jardin : elles constituent une **réserve d'eau pour l'arrosage**, qui contribuerait autrement à fragiliser la ressource en eau potable en période de sécheresse, s'il n'est pas tout simplement prohibé (voir partie II.B.1.).

En ville, les trames vertes et bleues, incluant les mares, peuvent **limiter l'effet îlot de chaleur urbain** qui accentue les vagues de chaleur (DATAR, 2013). S'il existe déjà de nombreuses mares communales en Normandie, on n'en trouve pas ou peu dans les plus grandes villes et il serait intéressant d'en créer. Les mares urbaines abritent par ailleurs une biodiversité adaptée aux milieux perturbés et sont d'intéressants **supports de sensibilisation** des citoyens (HASSALL, 2014). Le plan d'eau du CITIS d'Hérouville-Saint-Clair (14), par exemple, est intéressant de ce point de vue (F. Gresselin, communication personnelle, 13 novembre 2019).

- Des mares manchoises pour sécuriser la ressource en eau

Pour **garantir l'approvisionnement en eau douce dans la presqu'île du Cotentin**, la Délégation interministérielle à l'aménagement du territoire et à l'attractivité régionale (DATAR, 2013) préconise la construction d'ouvrages permettant de **stocker les précipitations hivernales pour un usage estival**. Le rapport cite comme exemple d'ouvrages les retenues collinaires ou les réserves de substitution, sans mentionner les mares, qui peuvent pourtant remplir cette fonction. De plus, il est précisé que les ouvrages en question doivent respecter la connectivité des écosystèmes aquatiques, ce qui est bien le cas des mares. Ces aménagements concerneraient plutôt le Sud du territoire, les reliefs du Nord y étant moins adaptés (L. Chéreau, communication personnelle, 8 novembre 2019). Notons que jusqu'à présent, la presqu'île du Cotentin dispose d'aquifères suffisamment puissants pour qu'aucun souci majeur ne s'y soit présenté (F. Gresselin, communication personnelle, 13 novembre 2019). Ces préconisations de la DATAR sont également valables pour le bocage normand en général.

- De grandes mares haut-normandes pour prévenir les inondations

Face à une potentielle hausse des précipitations hivernales et à l'occurrence plus importante d'événement pluvieux extrêmes, il est crucial de **prévoir une gestion des eaux pluviales adaptée, en particulier en milieu urbain** (ELSHORBAGY *et al.*, 2018). En Normandie, les départements de l'Eure et de la Seine-Maritime, très urbanisés, devraient être fortement touchés par ces phénomènes et doivent faire l'objet d'une gestion adaptée (DREAL HAUTE-NORMANDIE, 2015).

Les **mares tampons** sont probablement un aménagement pertinent pour réduire le risque d'inondations. En effet, elles sont conçues de manière à accueillir un grand volume de précipitations et à se vidanger lentement (ABE-GOULIER *et al.*, 2019). Ce type de mares est particulièrement utile dans les zones construites, associé à des fossés, des noues et des bandes enherbées (MILLER & HUTCHINS, 2017 ; ABE-GOULIER *et al.*, 2019).

- De grandes mares accessibles pour la lutte contre les incendies

Certaines mares communales constituent des réserves d'eau pour la lutte contre les incendies. Il faut pour cela qu'elles remplissent certains critères comme l'accessibilité aux véhicules des pompiers et une capacité d'au moins 120m³ (ABE-GOULIER *et al.*, 2019).

- Des mares nombreuses, permanentes et végétalisées pour séquestrer le CO₂

La capacité des mares à séquestrer le CO₂ est probablement très importante (voir partie III.B.3.).

En Basse-Normandie, entre 1 et 4Mt CO₂ /an seraient fixées par les puits de carbones, contre 16.3 Mt émises (DREAL BASSE-NORMANDIE, 2015). Le rapport de la DREAL, qui se base sur la méthode « Climagri » pour ces chiffres, mentionne comme puits les bois et forêts, haies, prairies, cultures et conchyliculture mais pas les mares. Il est donc probable que ces dernières n'aient pas été prises en compte dans le calcul et que le potentiel de stockage des écosystèmes normands soit très important.

Les mares dont la séquestration du carbone est la plus efficace sont les mares petites et/ou permanentes très végétalisées, celles-ci sont donc à privilégier (voir partie III.B.3.). Le territoire normand qui semble devoir être prioritairement pourvu de telles mares est **le long de la Seine**. En effet, la Haute-Normandie était en 2005 la première région émettrice de gaz à effet de serre en France ; les abords de la Seine étant la zone la plus concernée par ces émissions (DREAL HAUTE-NORMANDIE, 2015). Mettre en place une zone tampon riche en mares autour de ce fleuve peut donc constituer une stratégie valable dans l'objectif gouvernemental de séquestration du CO₂, à condition de rester vigilants sur un éventuel relargage de gaz à effet de serre depuis ces mares.

Il est à noter que les **mares permanentes et profondes** sont efficaces dans plusieurs rôles : ressource en eau estivale, prévention des inondations, lutte contre les incendies et très faible relargage du CO₂. Les **mares très végétalisées** sont généralement favorables à la biodiversité et efficaces dans la séquestration du carbone. Cependant, **il ne faut pas négliger les autres types, morphologies et fonctionnements de mares car leur diversité est essentielle à la préservation des espèces aquatiques.**

De plus, ces gestions ou aménagements ciblés ne doivent pas remplacer une **vision globale régionale des atténuations du changement climatique**. Au vu de leurs propriétés, chaque mare est intéressante, quelle que soit sa situation et **tous les territoires normands ont intérêt à disposer de nombreuses**

mares. La DATAR rappelle ainsi dans son rapport technique que la ressource en eau doit être gérée à l'échelle de la Normandie dans une logique de bassins versants (DATAR, 2013).

B. Préserver, restaurer, créer des mares

Selon de nombreuses sources discutées plus haut, **la présence de mares en Normandie pourrait atténuer les effets et les impacts du changement climatique.** Pour cela l'idéal est de privilégier certaines mares pour répondre aux principaux enjeux mais **l'essentiel est que les mares soient saines, fonctionnelles et, surtout, très nombreuses.**

Or, **ces écosystèmes sont en grave régression,** en Normandie comme dans toute l'Europe. A toutes les échelles, ce sont jusqu'à 90% des mares anciennes répertoriées qui ont disparu (EPCN, 2010 ; ABE-GOULIER *et al.*, 2019). En Angleterre, 80% des mares encore existantes sont considérées comme dégradées ou très dégradées (BAKER *et al.*, 2011).

La disparition d'une mare peut être naturelle ou non. Les mares sont naturellement comblées par les sédiments transportés par ruissellement et la matière organique issue de la végétation : on parle d'**atterrissement** (Figure 5) (CAPITAINE *et al.*, 1999 ; ABE-GOULIER *et al.*, 2019). Ce processus peut être accentué par une eutrophisation, due à une pollution en nitrates ou en phosphates, qui asphyxie la mare. Il est donc indispensable d'entretenir plus ou moins régulièrement les mares afin d'éviter leur disparition. Or, avec l'arrivée de l'eau courante, les mares ont été **progressivement abandonnées ou comblées,** notamment les mares privées (ABE-GOULIER *et al.*, 2019). Leur disparition n'étant pas compensée par la formation naturelle de nouvelles mares (CAPITAINE *et al.*, 1999), **l'ensemble de ces écosystèmes est voué à disparaître faute d'effort pour les sauvegarder.**



Figure 5 : Les quatre stades du processus d'atterrissement d'une mare (ABE-GOULIER *et al.*, 2019)

Les mares sont globalement menacées par les activités humaines, comme tout écosystème aquatique, mais restent encore **peu protégées.** Elles ne bénéficient pas des protections européennes comme la Directive cadre sur l'eau du fait de leur taille trop réduite. Certaines mares peuvent être sauvegardées grâce à la protection de quelques espèces par l'annexe II de la Directive Habitat mais cela reste insuffisant (EPCN, 2010).

Les conséquences de la disparition des mares sont multiples. Elle **met en péril la survie d'espèces rares et menacées** (EPCN, 2010) et **fragilise le réseau de corridors écologiques** (ABE-GOULIER *et al.*, 2019). En Normandie, les populations d'amphibiens ont régressé de 21% entre 2007 et 2018 (BARRIOZ *et al.*, 2015). En outre, les ruissellements qui étaient recueillis par les mares disparues sont reportés vers d'autres mares dont la capacité peut alors **ne plus suffire à contenir les fortes précipitations.** Moins de mares signifie également **moins de réserves d'eau de surface** et une **moindre séquestration du carbone atmosphérique,** voire un **relargage de gaz à effet de serre** (ABE-GOULIER *et al.*, 2019). En effet, au cours du processus d'atterrissement des mares abandonnées, celles-ci deviennent temporaires puis

finissent par s'assécher définitivement (ABE-GOULIER *et al.*, 2019), ce qui favorise l'émission de CO₂, de CH₄ et de NO₂ (voir partie III.B.3.).

Pour éviter la disparition des mares, il est possible de les entretenir, de les restaurer ou d'en créer de nouvelles.

- L'entretien d'une mare

Un bon entretien **impacte le moins possible le milieu** : il est réalisé préférentiellement à l'automne, sur une partie de la mare uniquement et pas plus fréquemment que nécessaire. Il est recommandé de faucher les abords de la mare, d'élaguer et de débroussailler les ligneux, de curer une partie des sédiments, de couper, arracher ou retirer une partie des plantes de berges (faucardage), des plantes de pleine eau (étirage) et des lentilles d'eau (écrémage) et de contrôler les espèces exotiques envahissantes (CAPITAINE *et al.*, 1999 ; OERTLI & FROSSARD, 2013 ; ABE-GOULIER *et al.*, 2019). **Le but de l'entretien n'est surtout pas d'éliminer toute la végétation** qui fait partie de l'écosystème et qui, rappelons-le, contribue fortement à la séquestration du carbone et au non relargage de celui-ci (voir III.B.3.).

- La restauration d'une mare

Si un entretien régulier n'a pas eu lieu et que la mare est à un stade d'atterrissement avancé (stade 4), il est **nécessaire de la restaurer pour empêcher sa disparition**. La restauration est une **intervention beaucoup plus lourde** qu'un simple entretien, puisqu'elle consiste à un arrachage et un dessouchage des arbres, un curage total ou aux deux tiers et un reprofilage des berges. Pour limiter l'impact de ces perturbations sur la faune aquatique, les travaux de restauration doivent avoir lieu **à l'automne**, lorsque la mare n'est pas en eau ou à son niveau le plus faible. La restauration peut être l'occasion d'optimiser les capacités d'atténuation de la mare face au changement climatique ; par exemple le reprofilage des berges en pente douce est favorable à la biodiversité et la pose d'un débit de fuite¹ permet de contrôler un éventuel débordement de la mare. Enfin, les espèces exotiques envahissantes doivent être éliminées dans la mesure du possible (OERTLI & FROSSARD, 2013 ; ABE-GOULIER *et al.*, 2019). **La restauration d'une mare augmentera généralement ses capacités d'atténuation des effets et impacts du changement climatique** puisqu'elle augmentera son volume d'eau, ce qui répond aux enjeux de la ressource en eau estivale, de l'absorption des précipitations et de la séquestration du carbone (l'assèchement de la mare sera moins fréquent) (GILBERT *et al.*, 2017). La restauration augmente également la richesse spécifique de la mare en végétaux aquatiques et en amphibiens (RANCE & DOMINGUES, 2018b). Néanmoins, curer une mare relargue du CO₂, il sera donc important de déterminer dans quelle mesure curer une mare est bénéfique pour le bilan carbone.

- La création d'une mare

S'il n'y a pas de mare déjà existante, en créer une est une bonne solution à condition de respecter certains critères. La mare doit être de préférence creusée **sur un terrain argileux** (donc étanche), à un emplacement **ensoleillé** et où elle sera **naturellement alimentée en eau**. **Les berges seront idéalement sinueuses et en pentes douces** pour favoriser une végétation fournie et diversifiée et donc une grande biodiversité animale. La colonisation végétale et animale doit se faire naturellement, sans introduction d'espèces (BAKER *et al.*, 2011 ; ABE-GOULIER *et al.*, 2019). Suivant le ou les usage(s) que l'on veut attribuer à la mare, on la créera **plus ou moins grande** : une petite mare peut être très riche sur le plan biologique et stocker de grandes quantités de carbone, tandis qu'une grande mare aura une plus grande capacité de rétention des ruissellements. Si l'objectif de création est la préservation de la biodiversité, on prendra soin de creuser la mare dans un secteur à l'abri de futures submersions marines (BAKER *et al.*, 2011). Il sera également pertinent de situer la mare **à faible distance d'autres mares**, afin qu'elle puisse contribuer à la trame bleue (BAKER *et al.*, 2011).

1. Débit de fuite : ouvrage permettant d'acheminer l'eau hors de la mare à partir d'un certain niveau d'eau

Les mares ont un **très fort potentiel d'atténuation des changements climatiques** comparées à d'autres écosystèmes. Par chance, ce sont des milieux **très simples et peu coûteux à créer ou à restaurer** (EPCN, 2010 ; BAKER *et al.*, 2011) ; ce type d'action est donc doublement positif. La restauration est à privilégier car elle est moins contraignante juridiquement et garantit que la mare sera alimentée en eau (ABE-GOULIER *et al.*, 2019). Cependant, si la restauration risque de nuire à des espèces sensibles, mieux vaut s'en abstenir ou adapter les travaux (BAKER *et al.*, 2011).

Les **mares de jardin** sont particulièrement faciles d'entretien (OERTLI & FROSSARD, 2013) et présentent d'intéressantes capacités d'atténuation du changement climatique (voir IV.A.1. et IV.A.2.), elles méritent donc certainement **un effort de création plus important et des recommandations de gestion** devraient être faites aux particuliers.

L'entretien, la restauration et la création de mares sont indispensables pour maintenir un réseau de mares satisfaisant à l'échelle de la Normandie. Ces actions peuvent en outre être associées à des actions de sensibilisation, essentielles à la préservation des mares sur le long terme (ABE-GOULIER *et al.*, 2019). Rappelons encore une fois que **l'objectif à atteindre est un nombre mais aussi une diversité de mares élevés** et que les mares atterries abritent leur propre biodiversité. Il n'est pas souhaitable de restaurer toutes les mares d'un territoire simultanément (CAPITAINE *et al.*, 1999).

C. Mieux connaître les capacités d'atténuation des mares : propositions de protocoles

Bien que de nombreux éléments discutés dans ce rapport suggèrent que les mares participent efficacement à la résilience des territoires normands (et autres) face aux changements climatiques, cette thématique demeure peu étudiée et **les capacités d'atténuation des mares demandent à être confirmées par d'autres études**, notamment à l'échelle normande. En effet, les interactions entre les mares et le climat ont jusqu'ici surtout été étudiées au Canada (THOMPSON & SHURIN, 2012 ; MACRAE *et al.*, 2014 ; O'REAGAN *et al.*, 2014).

Par ailleurs, plusieurs sources s'accordent à dire que les conséquences du changement climatique sont observables précocement dans les écosystèmes aquatiques ; en particuliers dans les petits écosystèmes que sont les mares (WILLIAMSON *et al.*, 2009 ; ROSSET *et al.*, 2010 ; WOODWARD *et al.*, 2010). Cela fait des mares des **écosystèmes sentinelles des effets et impacts du changement climatique**. Ces effets et impacts sont, en outre, plus simples à étudier sur les mares, encore une fois grâce à leur taille réduite (ROSSET *et al.*, 2010).

Plusieurs taxons inféodés aux mares sont également de bons indicateurs des changements climatiques : par exemple les insectes (MENENDEZ, 2007 ; OTT, 2010) comme les odonates, qui sont des espèces relativement faciles à étudier (HASSALL, 2015).

Pour toutes ces raisons, il serait bon de mener diverses études spécifiques aux mares normandes. Les principaux besoins en termes de connaissances sont détaillés ci-dessous.

1. Quantification de la séquestration du carbone atmosphérique dans les mares

Plusieurs sources signalent **un important manque de données sur la séquestration du carbone par les mares** (DOWNING, 2010 ; GILBERT *et al.*, 2017 ; EFESE, 2019). Ce manque de connaissances conduit souvent à une sous-estimation de ce processus et à la négligence des mares (DOWNING, 2010 ; EFESE, 2019). En Normandie, les variations du stock de carbone dans les sols sont mal connues, tout comme dans les mares ou d'autres écosystèmes (DREAL BASSE-NORMANDIE, 2015).

Outre le peu d'attention dont les mares ont bénéficié par rapport à d'autres écosystèmes (DOWNING, 2010), la rareté des données sur le sujet s'explique par certaines difficultés inhérentes à l'expérimentation, exposées par GILBERT *et al.* (2017) : la **grande hétérogénéité des flux de carbone selon les mares et les variations annuelles voire interannuelles de ces flux**. Pour obtenir des données fiables, il faudrait donc étudier un très grand nombre de mares à différentes périodes de l'année et sur plusieurs années. Une analyse saisonnière est essentielle pour déterminer si, sur une année, une mare se comporte plutôt comme une source ou comme un puits de carbone, et à quelles périodes. L'échantillon de mares étudiées étant forcément limité, il se pose également la question du choix de mares représentatives du processus de séquestration du carbone : quelles sont-elles ? Enfin, il sera important de mesurer si le bénéfice pour le bilan carbone de la restauration d'une mare compense le relargage qui a lieu lors du curage ou non.

Il existe plusieurs méthodes pour mesurer la séquestration du carbone dans une mare. GILBERT *et al.* (2017) ont mis en place un dôme pour mesurer directement le flux de CO₂. Il est également possible de connaître l'état des équilibres carbonatés de l'eau de la mare grâce à un dosage de son alcalinité ou à une mesure de la conductivité (corrélée à l'alcalinité) (OERTLI & FROSSARD, 2013). Le dosage du carbone organique total présent dans l'eau est une autre analyse possible (OERTLI & FROSSARD, 2013). Cependant, c'est dans les sédiments que le carbone est stocké sur le long terme (voir partie III.B.3), **le dosage du carbone organique total des sédiments est donc probablement plus pertinent** car il permettrait d'estimer le stock à long terme de carbone de la mare à un instant t, en plus de mesurer un flux en répétant ce dosage à plusieurs périodes de l'année et/ou sur plusieurs années. Le flux mesuré serait certes moins précis qu'avec la méthode du dôme de GILBERT *et al.* (2017), mais cette dernière présente plusieurs inconvénients : elle nécessite un matériel conséquent, ne permet pas d'évaluer les flux sur le long terme, ne permet pas d'évaluer le stock de carbone de la mare, et peut avoir un fort impact sur le milieu.

2. Analyse des variations de niveau d'eau des mares

La dynamique d'assèchement des mares est encore mal connue : pour beaucoup d'entre elles on ignore si elles sont permanentes, « naturellement » temporaires, rendues temporaires par les changements climatiques ou encore en cours de disparition (DOWNING, 2010). Dans le contexte climatique actuel, la période de sécheresse des mares, la vitesse d'assèchement et les paramètres qui influencent celles-ci (température, taille de la mare, recouvrement végétal, ombrage ?) sont importants à connaître. Or, ces données demeurent manquantes pour la Normandie.

Des mesures régulières du volume d'eau des mares en période d'assèchement pourraient permettre de répondre à ces questions, malgré la difficulté de calculer le volume d'une forme aussi irrégulière que celle des mares. Des échelles indiquant le niveau d'eau constitueraient une alternative intéressante.

3. Analyse de la dispersion et potentielle migration des espèces aquatiques

Le changement d'aire de répartition des espèces en réponse au changement climatique est un phénomène mal connu (DATAR, 2013). Le comprendre permettrait d'anticiper les besoins en termes de réseau des espèces cibles et d'adapter la gestion actuelle des écosystèmes (par exemple, favoriser la migration d'une espèce protégée vers un milieu viable au lieu de la maintenir à tout prix dans son milieu actuel). Cette thématique d'étude est néanmoins complexe, car il faut évaluer de nombreux éléments : quelles espèces arrivent, transitent par la Normandie ou en partent, quelles sont leurs exigences vis-à-vis du réseau de mares (distance maximale entre les mares, qualité des corridors terrestres, capacité de déplacement aérien), quelles espèces sont susceptibles de migrer d'ici 2050 ou 2100, ou encore quelle est la pertinence de préserver des isolats populationnels. Ce travail nécessite donc de nombreux suivis naturalistes ainsi que la production de cartographies complètes présentant le réseau de mares et autres écosystèmes aquatiques et les trajectoires de migrations. Une fois ces données acquises, la modélisation de futures migrations sera envisageable et permettrait d'anticiper les mesures de gestion à adopter.

Il y a une dizaine d'années, la DREAL Normandie a travaillé sur un essai de cartographie de la fragmentation des corridors « batraciens » (GRESSELIN & JOUIN, 2009). En outre, un protocole d'analyse cartographique de la qualité du réseau de mares est en cours de validation en Normandie (ABE-GOULIER *et al.*, 2019). Ce travail n'est pas réalisé en lien avec le changement climatique mais pourra sans doute servir de point de départ pour atteindre les objectifs cités ci-dessus.

En parallèle il sera nécessaire de modéliser les trajectoires de certaines espèces ou taxons, aussi les amphibiens (aux déplacements limités) et les odonates (bénéficiant d'un bon niveau de connaissances régional) pourraient faire l'objet d'une première étude, par exemple l'analyse de la dispersion/migration d'une espèce d'amphibien et une espèce d'odonate.

L'étude la plus urgente à mener dans les années à venir semble être, d'après la littérature, l'analyse de la séquestration du carbone dans les mares. C'est de plus la thématique la plus pertinente si l'on souhaite étudier le rôle des mares sur la résilience des territoires face au changement climatique, au vu de la potentielle efficacité des mares dans ce rôle. La mesure de paramètres susceptibles d'expliquer les résultats mériterait aussi d'être réalisée : par exemple un suivi continu de la température de l'eau de la mare.

Résumé partie IV.

La Normandie abrite de nombreux types de mares dont la plupart sont riches en biodiversité. Elles font l'objet d'un Programme Régional d'Action en faveur des Mares, le PRAM, qui a recensé plus de 24 000 mares à ce jour.

Pour atténuer les effets et impacts du changement climatique sur le territoire normand, il peut être pertinent de cibler certains enjeux en favorisant un type de mare qui présente des capacités d'atténuation particulièrement efficaces pour cet enjeu. Ainsi, pour préserver la biodiversité on favorisera la diversité des mares ; pour permettre la migration des espèces on optimisera le réseau de mares ; pour sécuriser la ressource en eau, prévenir les inondations et lutter contre les incendies on favorisera de grandes mares ; pour augmenter le confort thermique des populations en été on aménagera des mares près des habitations ; enfin, on maximisera le nombre total de mares pour optimiser la séquestration du carbone, en privilégiant les mares permanentes, très végétalisées et de petite taille.

Les mares sont des écosystèmes en très forte régression du fait de leur comblement naturel ou par l'homme. Pour empêcher leur disparition, il est nécessaire de les entretenir ou, s'il est trop tard et que la mare est à un stade d'atterrissement avancé, de les restaurer. Créer des mares est également intéressant, même s'il vaut mieux privilégier l'entretien et la restauration. Ces trois interventions sont susceptibles d'accroître la capacité de la mare à atténuer divers effets et impacts du changement climatique.

Nombre d'incertitudes demeurent quant au fonctionnement écologique des mares et le manque de données concernant les processus évoqués dans ce rapport conduit souvent à sous-estimer leur importance dans l'atténuation des changements climatiques. Aussi de plus amples études devront être menées à ce sujet, qui pourraient permettre dans le même temps de suivre et de détecter les changements climatiques normands, puisque les mares sont des écosystèmes « sentinelles » vis-à-vis du climat. La littérature fait ressortir un besoin important de connaissances sur le processus de séquestration et de relargage du carbone par les mares. D'autres études pourraient concerner le processus d'assèchement des mares et la migration des espèces aquatiques.

Conclusion

Le changement climatique a des conséquences néfastes en Normandie tout comme dans le reste du monde. Il est possible d'atténuer certaines de ces conséquences grâce aux mares, qui sécurisent la ressource en eau, réduisent les risques naturels d'inondation, préservent la biodiversité et entretiennent un microclimat tempéré. La séquestration du carbone par les mares est probablement si importante qu'elle surpasse celle des océans et atténue le phénomène de dérèglement climatique à sa source. Les mares sont donc d'une grande importance pour la résilience des territoires face au changement climatique.

Or, ces écosystèmes sont menacés tant par la négligence humaine que par le changement climatique et tendent à disparaître de nos paysages. C'est pourquoi des actions de restauration ou de création de mares doivent être encouragées et réfléchies à l'échelle de la Normandie, afin de maintenir un réseau de mares viable. Ces travaux sont en outre l'occasion de favoriser certains caractères des mares qui atténuent les effets et impacts du changement climatique. Au sein de la région Normandie, chaque territoire a la possibilité d'identifier des enjeux prioritaires et d'adapter la gestion du réseau de mares en favorisant certains processus.

Le principal message que cette synthèse doit transmettre est que face au contexte climatique actuel il est urgent d'enrayer et même d'inverser la tendance de régression des mares et que l'objectif phare de la gestion doit être de maximiser le nombre et la diversité des mares.

En agissant en faveur des mares pour le climat, la Normandie peut se positionner en tant que précurseur dans ce domaine. La région est qualifiée pour ce rôle puisqu'elle abrite encore des mares nombreuses et diversifiées et que celles-ci font déjà l'objet d'efforts de préservation et de restauration de la part des institutions environnementales normandes.

Dans les années à venir, la connaissance des processus liés aux mares devrait être améliorée afin de définir des objectifs de gestion à long terme les plus pertinents et adaptés possibles, ainsi que pour faire valoir le rôle des mares comme solution fondée sur la nature pour une meilleure résilience des territoires.

Bibliographie

ABE-GOULIER J.-C., MAURY-DELEU V., BRIEN V., BERNET E., CHAÏB J., COUBE J.-M., DOMINGUES C. & MARCHALOT A., 2019. – *Mares de Normandie*. Editions des Falaises., Rouen : C.A.U.E. Seine Maritime, 143 p.

ANONYME., 2019. – Canicule européenne de fin juillet 2019. *Wikipedia*, https://fr.wikipedia.org/wiki/Canicule_europ%C3%A9enne_de_fin_juillet_2019#France Consulté le 8/9/2019.

BAILLET Z., 2019. – Canicule. À Caen, le record de chaleur pour un mois de juillet a été battu.

BAKER J., BEEBEE T., GENT T. & ORCHARD D., 2011. – *Amphibian Habitat Management Handbook*. Amphibian and Reptile Conservation., Bornemouth, 69 p.

BARRIOZ M., COCHARD P.-O., VOELTZEL V. & LECOQ C., 2015. – *Amphibiens et reptiles de Normandie*.

BASTAKOTI R. C., PRATHAPAR S. A. & OKWANY R. O., 2016. – Community pond rehabilitation to deal with climate variability: A case study in Nepal Terai. **7** : 20-35.

BRISSON N. & LEVRAULT F., 2010. – *Synthèse du projet Climator.*, 23 p.

CAPITAINE M., DEWITTE T., DECOCQ O., MELBECK D. & LENORMAND F., 1999. – Gérer une mare. Ce qu'il faut savoir pour entretenir et gérer une mare. Dossier de la Gazette des Terriers, le Journal des clubs CPN.

CAREY C. & ALEXANDER M. A., 2003. – Climate change and amphibian declines: is there a link? **9** : 111-121.

CÉRÉGHINO R., BOIX D., CAUCHIE H.-M., MARTENS K. & OERTLI B., 2013. – The ecological role of ponds in a changing world. **723** : 1-6 doi : 10.1007/s10750-013-1719-y.

CETMEF - CETE MEDITERRANEE - CETE DE L'OUEST., 2009. – *Vulnérabilité du territoire national aux risques littoraux. France métropolitaine.*, 163 p.

CORNELISSEN T., 2011. – Climate Change and Its Effects on Terrestrial Insects and Herbivory Patterns. **40** (2) : 155-163.

CROISSET N., LE COZANNET G. & LAURENT A., 2016. – *Vulnérabilité des aquifères côtiers face aux intrusions salines en Normandie occidentale - Utilisation du modèle hydrodynamique de la plaine de Caen et du bassin de la Dives. Rapport final.*, 57 p.

DATAR., 2013. – *L'adaptation aux effets du changement climatique en Haute et Basse-Normandie*. DATAR, 225 p.

DIJKSTRA K.-D. B. & LEWINGTON R., 2015. – *Guide des libellules de France et d'Europe*. Delachaux et Niestlé., Paris, 320 p.

DOWNING J. A., 2010. – Emerging global role of small lakes and ponds: little things mean a lot. **29** : 9-24 doi : 10.23818/limn.29.02.

DOWNING J. & DUARTE C. M., 2009. – Abundance and Size Distribution of Lakes, Ponds and Impoundments. 469-478 doi : 10.1016/B978-012370626-3.00025-9.

- DREAL BASSE-NORMANDIE., 2015. – Profil environnemental de Basse-Normandie.
- DREAL HAUTE-NORMANDIE., 2015. – Profil environnemental de Haute-Normandie.
- EFESE., 2019. – *La séquestration de carbone par les écosystèmes en France*. EFESE, 65 p.
- ELSHORBAGY A., LINDENAS K. & AZINFAR H., 2018. – Risk-based quantification of the impact of climate change on stormwater infrastructure. **32** : 102-114.
- EPCN., 2010. – *Manifeste pour les mares et les étangs*. EPCN, 19 p.
- GIEC., 2014. – *CHANGEMENTS CLIMATIQUES 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K.Pachauri et L.A. Meyer]. Genève, Suisse : GIEC, 161 p.
- GILBERT P. J., COOKE D. A., DEARY M., TAYLOR S. & JEFFRIES M. J., 2017. – Quantifying rapid spatial and temporal variations of CO₂ fluxes from small, lowland freshwater ponds. **793** : 83-93 doi : 10.1007/s10750-016-2855-y.
- GIRARD É., 2019. – *Impact du changement climatique sur la dynamique de l'entomofaune en Normandie. Cas des odonates*. Rouen : Université de Rouen, 35 p.
- GRAND D., 2009. – Les Libellules et le réchauffement climatique. **9** (10) : 124-133.
- GRESSELIN F. & JOUIN C., 2009. – *Éléments de diagnostic de la présence de zones humides d'intérêt environnemental particulier dans le bassin versant de la Vire (Basse Normandie)*., 43 p.
- HASSALL C., 2014. – The ecology and biodiversity of urban ponds. **1** (2) : 187-206.
- HASSALL C., 2015. – Odonata as candidate macroecological barometers for global climate change. **34** (3) : 1040-1049.
- HERING D., SCHMIDT-KLOIBER A., MURPHY J., LÜCKE S., ZAMORA-MUÑOZ C., LÓPEZ-RODRÍGUEZ M. J. & HUBER T., 2009. – Potential impact of climate change on aquatic insects: A sensitivity analysis for European caddisflies (Trichoptera) based on distribution patterns and ecological preferences. **71** (1) : 3-14.
- INRA., 2006. – *Sécheresse et agriculture Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau*. INRA, 68 p.
- IORIO E. & MOUQUET C., 2018. – *Rapport annuel d'activités de la déclinaison régionale du Plan National d'Actions en faveur des Odonates en Basse-Normandie. 2017 - Sixième année.*, 80 p.
- IPCC., 2019. – *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate : summary for policy makers.*, 42 p.
- KINGSOLVER J. G., WOODS H. A., BUCKLEY L. B., POTTER K. A. & MACLEAN H. J., 2011. – Complex Life Cycles and the Responses of Insects to Climate Change. **51** (5) : 719-732 doi : 10.1093/icb/icr015.
- LABAUGH J. W., ROSENBERRY D. O., MUSHETC D. M., NEFFB B. P., NELSON D. R. D. & JR. N. H. E., 2018. – Long-term changes in pond permanence, size, and salinity in Prairie Pothole Region wetlands: The role of groundwater-pond interaction. **17** : 1-23.
- LEHNER B. & DÖLL P., 2004. – Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. **296** : 1-22.

MACRAE M. L., BROWN L. C., DUGUAY C. R., PARROTT J. A. & PETRONE R. M., 2014. – Observed and Projected Climate Change in the Churchill Region of the Hudson Bay Lowlands and Implications for Pond Sustainability. **46** : 272-285 doi : 10.1657/1938-4246-46.1.272.

MENÉNDEZ R., 2007. – How are insects responding to global warming? **150** : 355–365.

MILLER J. D. & HUTCHINS M., 2017. – The impacts of urbanisation and climate change on urban flooding and urban water quality: A review of the evidence concerning the United Kingdom. **12** : 345-362.

MINISTERE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE ET SOLIDAIRE., 2017. – Plan Climat.

NATIONS UNIES., 1992. – Convention-cadre des nations unies sur les changements climatiques.

OERTLI B. & FROSSARD P.-A., 2013. – *Mares et étangs – écologie, gestion, aménagement et valorisation.*, 441 p.

O'REAGAN S. M., PALEN W. J. & ANDERSON S. C., 2014. – Climate warming mediates negative impacts of rapid pond drying for three amphibian species. **95** : 845-855.

ORGANISATION METEOROLOGIQUE MONDIALE., 2019. – Un mois de juillet aussi chaud, voire davantage, que le mois le plus chaud jamais observé.

OTT J., 2010. – Dragonflies and climatic change - recent trends in Germany and Europe. **5** : 253–286.

PARMESAN C., 2006. – Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. **37** : 637–669.

PARMESAN C. & YOHE G., 2003. – A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. **421** : 37-42.

POUNDS A., BUSTAMANTE M. R., COLOMA L. A., CONSUEGRA J. A., FOGDEN M. P. L., FOSTER P. N., MARCA E. L., MASTERS K. L., MERINO-VITERI A., PUSCHENDORF R., RON S. R., SANCHEZ-AZOFEIFA G. A., STILL C. J. & YOUNG B. E., 2006. – Widespread amphibian declines from epidemic disease driven by global warming. **439** (12) : 161-167.

RANCE J. & DOMINGUES C., 2018a. – *Etude sur la capacité épuratoire des mares et sur le bénéfice d'un réseau de mares pour la qualité de l'eau.* Conservatoire d'espaces naturels Normandie Ouest, 21 p.

RANCE J. & DOMINGUES C., 2018b. – *Etude du bénéfice des travaux de restauration de mares pour la biodiversité.* Conservatoire d'espaces naturels Normandie Ouest, 13 p.

RINAUDO J.-D. & NEVERRE N., 2019. – *La prévision à moyen et long terme de la demande en eau potable : bilan des méthodes et pratiques actuelles.*, 84 p.

ROSSET V., LEHMANN A. & OERTLI B., 2010. – Temperate ponds will have more species as the climate warms.

SAJALOLI B. & DUTILLEUL C., 2001. – *Les mares, des potentialités environnementales à revaloriser - PNRZH.* Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. Agences de l'eau. BRGM, 142 p.

STRANGE E. E. & AYRES M. P., 2010. – Climate Change Impacts: Insects.

THOMPSON P. L. & SHURIN J. B., 2012. – Regional zooplankton biodiversity provides limited buffering of pond ecosystems against climate change. **81** : 251-259 doi : 10.1111/j.1365-2656.2011.01908.x 2011.

UICN., 2018. – *Les Solutions fondées sur la Nature pour lutter contre les changements climatiques et réduire les risques naturels en France*. UICN, 46 p.

WILLIAMSON C. E., SAROS J. E., VINCENT W. F. & SMOLD J. P., 2009. – Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change. **54** : 2273-2282.

WOODWARD G., PERKINS D. M. & BROWN L. E., 2010. – Climate change and freshwater ecosystems: impacts across multiple levels of organization. **365** : 2093-2106 doi : 10.1098/rstb.2010.0055.