

GIEC Normand

Thème : Biodiversité Continentale et Marine

Estelle Langlois (Université de Rouen Normandie), Loïc Chéreau (GRETIA), Nathalie Niquil (CNRS Université de Caen Normandie), Mr J.C. Dauvin (Université de Caen Normandie)

Contributeurs (encarts) : Pascal Claquin (Université de Caen Normandie), Juliette Fauchot (Université de Caen Normandie), Tania Hernandez (Ifremer Port en Bessin), Francis Orvain (Université de Caen Normandie)

Contributeurs (biodiversité invertébrés) : Michel AMELINE (GRETIA), Samuel ROETZINGER (GRETIA), Adrien SIMON (ASEHN-GRETIA-CEN-Norm), Sébastien ETIENNE (GRETIA-ONF)

Introduction

En France (métropole et outre-mer), la richesse biologique est estimée à 182854 espèces (INPN 2019) répartis en différents règnes animal, végétal, fongique et microbien (Annexe 1).

En Normandie, le contraste géologique qui divise en deux grandes parties très contrastées le domaine terrestre de la région (partie Ouest située essentiellement sur le massif Armoricaire et partie Est située elle sur le bassin Parisien) est à l'origine d'une remarquable richesse de milieux plus ou moins anthropisés, se déclinant en forêts, bocages, plaines, falaises et cordons de galets, cordons de dunes, estuaires, prés salés et milieux saumâtres, prairies et bas-marais tourbeux, vallées et prairies alluviales, landes sèches, pelouses et forêts sur sols acides, landes humides et tourbières acides, pelouses et boisements calcicoles, ainsi que des zones bocagères, agricoles et urbaines. **L'ensemble de ces milieux est le support de l'expression d'une formidable biodiversité qu'elle soit animale, végétale, microbienne ou fongique.** Ceci se traduit par près d'un quart du territoire de la Normandie classé en ZNIEFF, soit plus de 1800 ZNIEFF sur 7200 km², dont plus de 1600 de type I et près de 200 de type II. La région a également trois sites labellisés RAMSAR (les marais du Cotentin et du Bessin, la baie du Mont-Saint-Michel, et le Marais Vernier et la Risle maritime. DREAL 2013, 2015) illustrant l'engagement du territoire dans la sauvegarde des zones humides, des fonctions écologiques et de la biodiversité qu'elles abritent.

Les changements globaux et plus précisément le changement climatique, au travers de la hausse des températures mais également des niveaux des océans, exercent une pression indéniable sur cette **biodiversité continentale et marine**, pression qui risque de s'accroître dans un futur plus ou moins proche si des mesures drastiques ne sont pas prises. Les effets de ce changement climatique (CC) sur la biodiversité sont par ailleurs accentués par les effets cumulés en lien avec d'autres facteurs comme les changements d'occupation du sol ou de pratiques, les pollutions, la fragmentation des habitats ou encore l'implantation d'espèces invasives. Les conséquences de ces menaces vont directement et indirectement affecter les espèces, les habitats (Lévêque et Witté, 2019), mais également les populations humaines comme le montre Bellard dans ces travaux (Bellard, 2013). Les conclusions de cette étude portant sur une analyse à l'échelle mondiale sont sans appel. La région Normandie n'échappe pas à ces constats et des augmentations de températures sont d'ores et déjà simulées pour les années à venir, notamment en saison estivale, associées à des diminutions de précipitations en été (DATAR 2013 a,b). Dans ce contexte, quelles seront les conséquences sur le maintien et de devenir des différents groupes taxonomiques terrestres, aquatiques et marins présents en Normandie et quelles problématiques et actions peuvent émerger de ces constats ?

Cette note thématique présente l'état des connaissances actuelles sur la biodiversité en Normandie et cherche à illustrer les premiers éléments de connaissances, lorsqu'ils existent, des conséquences du changement climatique à l'échelle de la Normandie sur cette biodiversité. Elle se veut un point de départ, d'alerte, pour rappeler l'importance de prendre en considération les organismes vivants dans les actions qui se développent en matière de compréhension, d'atténuation voire d'intégration des effets des changements climatiques à l'échelle régionale.

1. Biodiversité floristique terrestre de Normandie

1.1 La Biodiversité floristique à l'échelle de la Normandie

La région Normandie a par le passé bénéficié de botanistes de renom qui ont laissé un héritage précieux pour la connaissance de la flore normande avant la transformation profonde de nos paysages liée aux activités humaines (Louis Alphonse de Brébisson : la première Flore régionale de Normandie - 1869 et Louis Corbière : Nouvelle flore de Normandie - 1893). Ces ouvrages, sources d'informations précieuses pouvant permettre d'estimer l'évolution de la flore au cours du temps, ont été depuis complétés par de nouveaux ouvrages comme la Flore Vasculaire de Basse-Normandie de Michel Provost, l'Atlas de la flore sauvage de Haute-Normandie (CBN Bailleul, 2015), Guide des végétation des zones humides de Normandie Orientale (CBN Bailleul, 2019), Flore rare et menacée de Basse-Normandie (Zambettakis et Provost, 2009). A ces ouvrages s'ajoutent maintenant des outils de recensement et de localisation des espèces végétales présentes dans la région, pilotés par les conservatoires botaniques de Bailleul (antenne Haute-Normandie) pour Digitale 2 et de Brest (antenne Basse-Normandie) pour *Calluna*. A cela s'ajoute tous les réseaux de naturalistes botanistes (associations), les CEN, les PNR, les gestionnaires de réserves ... qui sont autant d'observateurs permettant de connaître et cerner au mieux la flore normande et sa diversité.

A l'échelle de la flore vasculaire, les CBN de Brest et de Bailleul (antennes de Haute et Basse Normandie) ont réalisé en 2019 un document de synthèse sur la flore de Normandie et sa diversité en cherchant à mettre en avant l'originalité de cette flore, sa patrimonialité et les risques qu'elle encourt avec les changements globaux (modification des usages des sols, intensification des cultures, espèces invasives) mais également la difficulté d'avoir une pression d'échantillonnage comparable sur l'ensemble du territoire, certains milieux et certains territoires étant mieux renseignés que d'autres.

A l'échelle de la Normandie (Figure 1), il est recensé 1856 espèces dont 450 sont considérées comme non indigènes (plantes naturalisées suite à leur introduction par les activités humaines) mais ayant colonisé naturellement la région en y trouvant leur place au sein des communautés. Cette notion de plantes non indigènes est à différencier des espèces exotiques envahissantes qui sont également le résultat d'une introduction d'espèces exogènes en lien avec les activités humaines mais qui prolifère dans certains milieux au détriment de la flore locale qui disparaît (exemple, *Fallopia japonica*, *Ludwigia grandiflora*). Cette richesse normande représente plus de 30 % de flore vasculaire métropolitaine. Par comparaison, les régions limitrophes répertorient 1342 espèces indigènes dans les Hauts-de-France, 1274 en Île de France et 1284 en Bretagne ce qui fait de la Normandie la région la plus riche floristiquement, pour des surfaces de territoires comparables (à l'exception de l'île de France). En revanche cette richesse est inférieure aux régions plus au sud, comme le territoire alpin et ses piémonts qui abritent une richesse estimée à 5700 taxons (web CBN Alpin).

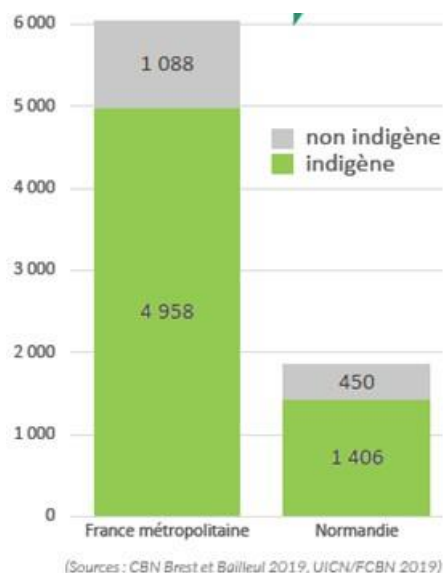


Figure 1. Nombre d'espèces de plantes vasculaires sauvages en France et en Normandie. (Douville et Zambettakis, 2019)

La richesse floristique de la Normandie s'explique d'une part par les faciès géologiques et pédologiques contrastés mais également en raison d'un climat très contrasté à l'échelle du territoire notamment en termes

de précipitations (Savouret et Cantat, 2008). Si dans certains secteurs, les cumuls de précipitations peuvent atteindre plus de 1100 mm/an (Manche notamment), certains secteurs de l'Eure ne reçoivent que 500 mm/an. Ces contrastes de précipitations associés à des variations de températures qui peuvent dans certains cas être importantes (coteaux calcaires par exemple), font que la flore de Normandie abrite une végétation variée qui peut être thermophile (avec des taxons à affinité subméditerranéenne comme *Helianthemum apeninum*) ou dépendante de fortes précipitations comme *Eriophorum angustifolium* qui ne se trouve que dans les tourbières acides. La nature du sol, plus acide sur le socle armoricain (ou encore sur les loess des plateaux HN) et plus riche en carbonates de calcium sur les affleurements crayeux, offre également des niches écologiques très variées permettant à une flore spécifique de se développer (*Viola hispida* sur des éboulis calcaires, *Ulex galii* sur landes acides).

Plus finement, les bilans floristiques disponibles à l'échelle de la Haute Normandie estiment la richesse floristique à 1820 espèces (CBNBI – antenne de Rouen). Parmi ces espèces, 240 taxons n'ont pas été revus depuis 1990 (Buchet et al., 2015) ce qui porte l'estimation de la flore actuelle à 1580 espèces. Le conservatoire botanique de Bailleul (Antenne de Rouen) estime qu'il existe à ce jour 1202 espèces indigènes, c'est à dire correspondant au cortège originel de la flore du territoire et dans la période bioclimatique actuelle (Figure 2).

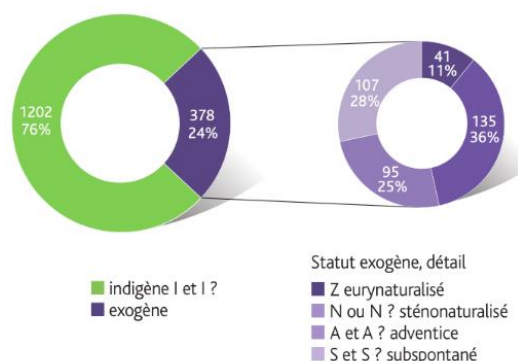


Figure 2. Répartition des espèces en fonction de leur statut d'indigénat (en nombre d'espèces et en pourcentage) d'après Buchet et al. (2015).

Cette flore locale représente à elle seule 20,4 % de la flore indigène de France estimée à 7746 espèces (plantes vasculaires) d'après l'INPN (2019). En termes de menace, 348 taxons sont considérés comme menacés en Haute Normandie, dont 24 sont inscrites sur les listes de protection (Buchet et al., 2015).

En Basse Normandie, un potentiel de 483 associations végétales est estimé sur la base des données du CBNB (antenne de Caen). En termes de richesse floristique, 1620 espèces de plantes vasculaires et autochtones sont dénombrées.

La comparaison de la richesse spécifique des départements de Normandie entre eux (Figure 3), réalisée par les CBN de Brest et Bailleul, fait apparaître 855 espèces communes aux cinq départements sur les 1406 espèces indigènes répertoriées. Le département le plus riche correspond au Calvados, s'expliquant par le fait que c'est également le département offrant la plus grande diversité de milieux. Malgré une pression d'échantillonnage moindre, la Manche est le département présentant le plus d'espèces lui étant spécifiques (47 espèces), s'expliquant là aussi par une richesse de milieux mais surtout par la présence d'un grand nombre d'espaces naturels de surface importante et donc beaucoup moins anthropisés que les quatre autres départements. Les zones actuellement le plus riches identifiées (appelées aussi hot spot de diversité) sont localisées en vallée de Seine, de l'Epte, de l'Iton et de la Laize. Ces vallées offrent des conditions écologiques (géologiques, topographiques, climatiques et pédologiques) et historiques contrastées permettant à des espèces à niche écologique variable de coexister (des espèces subméditerranéennes aux espèces arctico-alpines). A contrario, les milieux présentant les richesses floristiques les moins importantes sont les milieux les plus homogènes où les pratiques agricoles s'exercent régulièrement (plateaux cultivés essentiellement) ou encore les milieux à fortes contraintes exerçant une pression de sélection sur les espèces (bas marais salés).

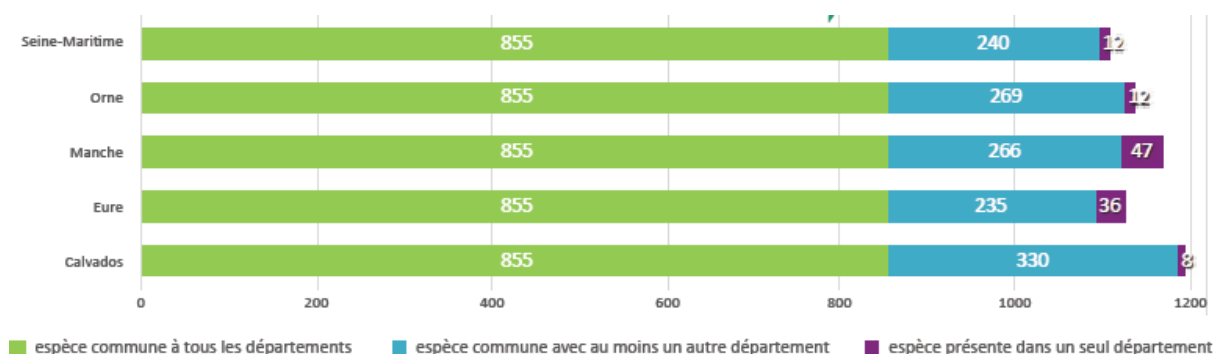


Figure 3. Nombre d'espèces communes entre les cinq départements de la Normandie. (Douville et Zambettakis 2019).

Le département de la Seine-Maritime, qui apparaît comme le moins riche des cinq départements, est cependant celui qui abrite le plus d'espèces exceptionnelles (12) dont le Polypode du chêne (*Gymnocarpium dryopteris*), l'Élatine fausse alsine (*Elatine alsinastrum*), et le Sénéçon de Fuchs (*Senecio ovatus*).

1.2 Flore protégée/menacée

L'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN) définit une Liste Rouge Régionale des espèces menacées comme un indicateur et un outil de référence ayant pour but de dresser un bilan objectif du degré de menace des espèces présentes sur un territoire donné. Cette méthode mesure le risque de disparition de la biodiversité et permet de guider les politiques régionales de conservation (<https://biodiversite.normandie.fr/>).

En Normandie, il existe deux listes rouges des espèces menacées, basées sur les deux ex-régions (Figure 4).

Catégories de menace (UICN)		Nombre
RE	Espèces disparues au niveau régional	77
	<i>Sous-espèces et/ou variétés disparues au niveau régional</i>	13
CR	Espèces en danger critique et non présumées disparues	51
	<i>Sous-espèces et/ou variétés en danger critique (non présumées disparues)</i>	2
CR*	Espèces en danger critique et peut-être disparues	5
	<i>Sous-espèces et/ou variétés en danger critique et peut-être disparues</i>	0
EN	Espèces en danger	50
	<i>Sous-espèces et/ou variétés en danger</i>	3
VU	Espèces vulnérables	184
	<i>Sous-espèces et/ou variétés vulnérables</i>	9
NT	Espèces quasi menacées	79
	<i>Sous-espèces et/ou variétés quasi menacées</i>	1
LC	Espèces de préoccupation mineure	833
	<i>Sous-espèces et/ou variétés de préoccupation mineure</i>	59
DD	Espèces pour lesquelles les données sont déficientes	61
	<i>Sous-espèces et/ou variétés pour lesquelles les données sont déficientes</i>	60

NB : Les espèces représentées par un seul taxon de rang infra-spécifique évaluable dans la région n'ont pas été reportées dans la ligne « Sous-espèces », pour éviter les doubles comptes (ex : *Asparagus officinalis subsp. prostratus*, seule sous espèce indigène présente en Basse-Normandie).

Figure 4. Bilan des menaces s'exerçant sur la flore de l'ex Basse Normandie : répartition des espèces selon la codification UICN. Sources : Bousquet et al 2015.

Sur les 421 taxons menacés à l'échelle nationale, 49 espèces indigènes sont présentes en Normandie (Douville et Zambettakis, 2019). En complément de cette classification mettant en avant les risques portés par les espèces selon les régions, certains taxons bénéficient d'un statut de protection national. En Normandie, 30 espèces portent ce statut sur les 429 recensées sur le territoire national, soit 7% des espèces protégées nationalement. La répartition de ces espèces protégées nationales (CBN Brest et Bailleul, 2019)) est plus généralement inféodée aux zones humides de type tourbières oligotrophes mais également les zones humides de vallée et littorales. Ce travail de cartographie des espèces protégées a également été réalisé sur les espèces menacées. Les cartographies élaborées par les CBN sont des données essentielles pouvant être mobilisées dans un travail plus conséquent sur l'identification des menaces s'appliquant aux espèces. En ex Basse Normandie ce travail est complété par un ouvrage sur la flore rare et menacée (Zambettakis et Provost, 2009). Les différents mécanismes qui jouent, ou ont joué, un rôle dans la régression voire la disparition de certains milieux et donc d'une partie des espèces sauvages de Basse-Normandie y sont identifiés.

1.3 Modification des écosystèmes terrestres : les risques pour la flore

Il est maintenant reconnu que les actions liées aux activités humaines modifient le fonctionnement des écosystèmes avec parfois comme conséquence la disparition des certaines espèces entraînant donc une diminution de la biodiversité de ces milieux. Les principales causes identifiées et à l'origine de l'érosion de la biodiversité ont été listées (Millennium Assesment) :

- la destruction et la fragmentation des milieux naturels liées, en particulier, à l'urbanisation croissante, à l'expansion des terres agricoles et au développement des infrastructures de transport ;
- la surexploitation d'espèces sauvages (surpêche, déforestation...), renforcée notamment par le commerce illégal ;
- les pollutions de l'eau, des sols et de l'air, d'origine domestique, industrielle et agricole ;
- l'introduction d'espèces exotiques envahissantes ;
- le CC qui peut s'ajouter aux autres causes ou les aggraver. Il contribue à modifier les conditions de vie des espèces, les forçant à migrer ou à adapter leur mode de vie, ce que toutes ne sont pas capables de faire.

La région Normandie ne fait pas exception et de nombreux territoires sont mis à mal par des activités humaines trop intenses. Dans le contexte des changements climatiques, malheureusement peu de recherches sont menées pour comprendre comment la flore normande risque d'évoluer face à des modifications climatiques de plus en plus prégnantes : sécheresses estivales, température de plus en plus chaudes en été, hiver doux, baisse des nappes,... Or ces modifications qui s'enregistrent de l'échelle mondiale à l'échelle régionale (voir locale) vont entraîner dans les prochaines années des modifications de répartition géographique des espèces avec dans le meilleur des cas une remontée vers le nord des espèces capables de coloniser de nouveaux territoires et dans le pire des cas une extinction de celles qui ne pourront trouver refuge dans des niches écologiques leur permettant de se maintenir. Des modifications physiologiques et phénologiques sont également à craindre pouvant en retour modifier les interactions entre certains organismes. Des modifications jusqu'à l'échelle génétique de certaines populations peuvent à plus long terme s'envisager comme évoqué dans la synthèse de Massu et Landmann (2011).

Plusieurs types de milieux normands sont susceptibles de subir des modifications de fonctionnement écologique en raison du changement climatique et de ses conséquences :

- Coteaux calcaires : élévation de la T° : risque d'un déficit hydrique plus important et la disparition de certaines espèces ou bien une acclimatation voire une adaptation progressive. (Dujardin, 2012).
- Milieux estuariens : augmentation du niveau de la mer entraînant une remontée du front salin dans l'estuaire et donc un impact sur la flore des milieux associés (roselières, prairies sub-halophiles, prairies méso-hygrophiles) dont la flore pourrait ne pas supporter l'augmentation des teneurs en sels et se voir contrainte à la colonisation de nouveaux milieux dans le meilleur des cas ou bien à leur disparition.
- Milieux estuariens : augmentation du niveau de la mer entraînant une remontée du front salin dans l'estuaire et donc un impact sur la flore des milieux associés (roselières, prairies sub-halophiles, prairies méso-hygrophiles) dont la flore pourrait ne pas supporter l'augmentation des teneurs en sels et se voir contrainte à la colonisation de nouveaux milieux dans le meilleur des cas ou bien à leur disparition.
- Milieux alluviaux : la diminution des précipitations entraînant un déficit hydrique sur le bassin versant et donc une perte d'alimentation en eau douce de la vallée et de la nappe alluviale. Ce déficit hydrique entraînerait de fait une modification des végétations méso-hygrophiles vers des végétations plus mésophile.
- Milieux dunaires : élévation du niveau de la mer et érosion des cordons dunaires si la végétation n'est plus présente pour jouer son rôle de fixatrice.
- Les falaises : élévation du niveau de la mer et recul des falaises
- Milieux humides et tourbeux : déficit hydrique, minéralisation de la MO, assèchement des sols et affaissement des sols

1.4 Les changements observés dans la flore normande en lien avec le changement climatique : quelles conclusions à l'échelle de la Normandie?

Dans le cadre de la mise en place du GIEC Normand par la région Normandie, plusieurs thèmes relatifs aux CC ont été listés dont le thème « Biodiversité continentale et marine ». Parmi la Biodiversité continentale, la flore est une composante clé puisque responsable de la production primaire. Face aux enjeux et conséquences des changements climatiques sur la diversité floristique, plusieurs structures et personnes ont été contactées afin de recueillir 1) la bibliographie traitant des conséquences du CC sur la flore, 2) connaître

les études en cours et 3) recueillir le sentiment des personnes impliquées au quotidien dans la préservation des milieux et de leur biodiversité. La question posée était la suivante : l'un des objectifs du groupe de travail du GIEC Normand est de faire le point sur les connaissances des effets du CC sur la diversité floristique terrestre Normande. Auriez-vous connaissance d'études sur les effets du CC sur la modification de la répartition des espèces végétales, et donc de leurs aires de répartition, ou encore de modification de développement en région Normandie?

L'information qui ressort de cette courte enquête **est qu'à l'heure actuelle aucune étude sur le lien CC et biodiversité floristique continentale n'est réalisée à l'échelle régionale mais que les acteurs locaux engagés dans la protection de notre patrimoine naturel estiment ce type d'action prioritaire**. Des initiatives sont toutefois menées, notamment à l'échelle des gestionnaires (Parcs Naturels Régionaux, CENN), pour discuter et mettre en place des suivis homogénéisés sur des sites « sentinelles » basés sur des protocoles communs. Ces démarches doivent être portées par des projets ambitieux, alliant différents acteurs du territoire (gestionnaires, scientifiques, décideurs locaux) et offrant la possibilité d'avancer sur la compréhension des conséquences du CC sur le développement et le maintien des espèces dans notre région.

2. Biodiversité des Invertébrés continentaux terrestres et aquatiques de Normandie

2.1 Organisation régionale de la connaissance sur les invertébrés continentaux

- Esquisse du réseau d'entomologistes normands

Si historiquement, les sociétés savantes, notamment les sociétés linnéennes, ont joué un rôle majeur dans la connaissance des invertébrés de Normandie, le niveau actuel de connaissances participe de l'implication, à des niveaux variés, d'une large diversité de structures : associations, bureaux d'études, chambres consulaires, collectivités territoriales, entreprises, groupements d'intérêt public, services de l'Etat, établissements de formation, d'enseignement et de recherche, établissements publics (Anonyme, 2020).

En Haute-Normandie, le rapprochement entre ces structures a été marqué en 2011 par la mise en place de la plate-forme régionale SINP (ODIN). Après une période de restructuration de l'OBN au sein de la jeune Agence normande de la biodiversité et du développement durable, une mission d'observatoire thématique régionale est à présent identifiée en articulation avec les structures tête de réseau régionale «connaissances naturalistes», tel le GRETIA, pour les invertébrés continentaux, objet statutaire de ses travaux scientifiques depuis 1996. Le tissu associatif regroupe aujourd'hui de l'ordre de 200 entomologistes normands, très majoritairement bénévoles mais aussi salariés et dotés pour partie d'une expertise naturaliste reconnue.

Loin de l'image passéiste que l'on peut à tort lui donner, le naturaliste est au cœur des préoccupations environnementales en Normandie (Chaussi et Hugo, 2013). Il semble exister plusieurs pratiques de l'entomologie, dans des « univers » dont les collaborations sont à développer.

- Niveau de connaissance régionale des invertébrés

Alors que l'avènement des bases de données naturalistes est relativement récente, l'architecture partenariale et technique des flux de données s'organise et prend force rapidement, notamment sous l'impulsion conjointe des politiques publiques et des associations. La question de la validation des données naturaliste a elle-même connue récemment des avancées significatives, tandis que le moissonnage des données de diffusion public s'amplifie autour de l'OBN, en lien avec le SINP de l'INPN.

La faune invertébrée normande comporte de l'ordre de 15000 à 20000 espèces (Mouquet, communication personnelle). L'assemblage régional des compétences dans le domaine des invertébrés mérite sans doute d'être renforcé encore, pour permettre, par exemple, le développement d'indicateurs régionaux propres aux effets des CC. Pour donner un ordre de grandeur en matière de niveau de connaissance, à ce jour, 1,4 M de données d'invertébrés sont bancarisées dans la seule base de données du GRETIA, pour les trois régions armoricaines, avec le développement progressif de conventions d'échanges de données favorisant le partage des savoirs.

2.2 Mouvements des faunes invertébrées en Normandie

Le phénomène d'expansion vers le nord de l'aire de répartition d'espèces d'invertébrés continentaux n'est donc pas nouveau en Normandie. Il semble cependant qu'il s'accélère particulièrement depuis le début du XXIème siècle et prend de l'ampleur (Simon, 2016). A défaut de programmes de suivi scientifique spécifique des effets du CC sur les faunes normandes et leurs rôles fonctionnels, de nombreuses observations sont réalisées ponctuellement. La compilation et l'analyse des connaissances acquises peuvent aujourd'hui servir de références régionales, notamment sous forme d'atlas de répartition, pour certains déjà publiés (orthoptères, bourdons, rhopalocères, noctuidae, pyralidae et crambidae, cerambycidae, scarabaeoidea) et

bien d'autres en cours (araignées, mollusques, sangsues, odonates, bombycoidea, pompilidae, formiciade, coccinellidae, carabidae, coléoptères et hétéroptères aquatiques, etc.). L'importance chorologique et biogéographique des cartes de répartitions d'espèces a d'ailleurs été mise en évidence de longue date (Cartan et Godron, 1978), notamment pour l'analyse des aires de répartition et de leurs causes.

Selon les groupes biologiques considérés, depuis les précédentes publications de synthèses au plan régional, lorsqu'elles existent, il s'est généralement écoulé plusieurs décennies, parfois plus d'un siècle. Hors le renouvellement de la publication d'atlas tous les dix à vingt ans est généralement considéré comme adapté à la mise en évidence des évolutions des phénologies, des limites d'aires de répartition et des superficies occupées par les populations (Thomas, 2005). Cet effort de cartographie sous forme d'observatoire doit donc être poursuivi pour les groupes ayant bénéficiés de récentes publications régionales de synthèse voire développés, pour de nombreux groupes biologiques encore méconnus.

Il faut noter que la plus-value d'une forte pression d'observation, comme facteur de détection des colonisations d'espèce, a déjà été mise en évidence en Normandie (Lorthiois et Moulin, 2013).

Aujourd'hui, le déplacement d'espèces en voie d'expansion via certains corridors géographiques se précise, notamment en empruntant les corridors thermophiles, sculptés par les grands fleuves du sud / sud-est vers le nord / nord-ouest de la région, ainsi que le long des littoraux et sur les coteaux calcicoles des terrains sédimentaires de la Normandie. Si des flux d'espèces de l'est vers l'ouest sont aussi détectés, leurs couloirs de déplacement demeurent encore méconnus.

En parallèle, soulignons la crainte de voir les effets des CC, cumulés aux autres causes d'érosion de la biodiversité, conduire à la réduction du domaine vital d'espèces aujourd'hui communes en Normandie et à la régression progressive des effectifs de leurs populations, voire à des phénomènes de dérive génétique associés.

- Groupes biologiques

Pour différents ordres d'insectes, quelques faits marquants de cette dernière décennie en Normandie sont évoqués ci-dessous. En plus des « classiques » orthoptères, papillons de jours et odonates, d'autres groupes se révèlent très informatifs ou avec de fortes potentialités de suivi des effets des changements climatiques. Ces effets, en plus du mouvement des faunes pourraient entraîner des décalages phénologiques, le multivoltinismes, des chutes globales de l'abondance, de la biomasse et de la richesse spécifique.

Orthoptéroïdes

Grâce à l'atlas régional publié récemment (Stallegger, 2019) et aux nombreux témoignages naturalistes des entomologistes normands, il a été constaté qu'au moins 18 % des espèces d'orthoptères enregistrent au cours de la dernière décennie, voire au cours de ces deux dernières années, des expansions marquées de leurs aires de répartition normande. Toutes sont thermo-xérophiles. Certaines espèces de ce groupe sont particulièrement propices aux sciences participatives. Ainsi des citoyens témoignent de plus en plus d'observations inhabituelles d'espèces méridionales emblématiques, telle la Mante Religieuse. Cette année, pour la première fois, elle a été observée au cœur du frais bocage ornaïs, en marge du département de la Manche, en situation urbaine.

Odonates

Certains odonates sont de bons voiliers. Aussi, lors d'années dites favorables, des comportements de colonisation conduisent à l'observation d'espèces exceptionnelles en Normandie, sans pour autant que leurs populations s'y installent de façon pérenne. Toutefois, progressivement de nouvelles espèce gagnent du terrain et semblent s'installer. En 2020, la forte colonisation d'une espèce plus méridionale, *Orthetrum albistylum*, a été observée par plusieurs odonatologues. Les témoignages proviennent de nombreuses localités. Le Perche est un lieu privilégié d'observation, véritable porte d'entrée pour ce type d'espèce vers l'Orne et le Calvados. Quelle autre explication à cette spectaculaire évolution d'aire de répartition que les CC, considérant notamment le nombre d'observateurs normands ? La régression progressive de *Sympetrum danae*, spécialiste des gouilles tourbeuses acides, ou encore celle de *Coenagrion pulchellum* qui se rencontre en tourbière aussi bien que dans les grands ensembles marécageux de la région, ne devrait-elle pas aussi être mis en relation avec les CC, alors que des problématiques de gestion étaient suspectés ?

Lépidoptères

Ce groupe riche de plusieurs centaines d'espèces fait l'objet de nombreux travaux de cartographie et d'inventaires conservatoires. En Europe, sur un échantillon de 35 espèces non migratrices, 63% ont récemment montrées une expansion vers le nord de leur aire de répartition de 33 à 240 km, directement corrélée au réchauffement climatique (Parmesan et al., 1999). Aux Royaumes unis, 70% des espèces de

rhopalocères montrent une réduction de leur aire de répartition et sont à ce titre considérés comme des indicateurs réactifs aux modifications de leur environnement (Thomas, 2005). En Normandie, le cas spécifique des papillons de jours peut servir d'exemple, tel les cortèges associés aux coteaux calcicoles. Ce groupe d'espèces fait l'objet d'une importante actualisation des connaissances, qui sera rendue fin 2020 à la Région de Normandie et l'Europe.

D'ores et déjà les constats sont accablants. Selon les départements, de 18% à 50% des espèces caractéristiques des coteaux calcicoles et évaluées comme prioritaires à la conservation régionalement, semblent avoir disparues dans notre région. Les naturalistes peinent à proposer des hypothèses pour expliquer ces fortes régressions. Si la dégradation de leurs habitats et l'isolement des populations sont identifiés comme des causes majeures, les CC font bien sûr parties autres causes envisagées. Mais pas de façon isolée : en synergie avec les nombreuses causes de fragilisation des populations d'invertébrés telles la destruction des milieux, leur enrichissement par déprise, leur enrichissement en azote via les retombées atmosphériques issues de nos pratiques intensives, etc.

Par ailleurs, en 2020, près d'une dizaine d'autres espèces de papillons de jour ont vu leur aire de répartition s'agrandir ou leur fréquence d'occurrence s'accroître sensiblement en Normandie. Il s'agit presque systématiquement d'espèces thermo-xérophiles. Mais une différence importante est à noter : ces espèces sont peu sensibles à la qualité écologique des milieux. De façon schématique, on peut formuler l'hypothèse que chez les papillons de jours, si le nombre d'espèces thermo-xérophiles reste globalement stable, voire augmente légèrement en Normandie, la région perd les espèces indicatrices de la qualité des milieux à la faveur d'autres euryplastiques. Gardons aussi présent à l'esprit que des analyses menées à l'échelle européenne sur les rhopalocères, mettent en évidence un risque de disparition pour de nombreuses espèces à court et moyen termes, en fonction de différents scénarios prédictifs de l'évolution de la température au cours des prochaines décennies (Settele et al., 2008). Ces craintes d'érosion de la biodiversité des papillons sont partagées par les lépidoptéristes normands, notamment pour les noctuelles inféodées à une espèce botanique particulière (Lepertel et Quinette, 2016).

Une synthèse anglaise publiée il y a près d'une décennie concernant les papillons de nuit (Fox, 2012), identifie l'intensification de l'agriculture et de la sylviculture ainsi que les changements climatiques comme les principales causes du déclin des populations. Ces déclins sont particulièrement préoccupant vu par le prisme des services écosystémiques et notamment de la pollinisation. Ce déclin des populations de rhopalocères, et globalement des insectes, reste insuffisamment quantifié.

Hyménoptères

Le groupe des bourdons, bénéficie d'un important travail d'inventaire en Europe. Il est composé très majoritairement d'espèces d'affinités septentrionales. Un atlas prédictif a pu être réalisé quant aux effets attendus des CC sur leur distribution (Rasmont et al. 2015). De nombreuses extinctions régionales seraient à prévoir d'ici à 2100 selon trois modèles prédictifs utilisés : *Bombus barbutellus*, *Bombus bohemicus*, *Bombus campestris*, *Bombus crypterum*, etc

Araignées

Plusieurs espèces ont récemment colonisé la Normandie, telle *Zoropsis spinimana* encore cantonnée au tiers sud de la France il y a une quinzaine d'années (Le Péru, 2007). Le même schéma que pour les orthoptères ou les rhopalocères se dessine. Les araignées concernées sont thermo-xérophiles et peu exigeantes quant à leurs habitats. Pour ce groupe sensible à la structure géométrique de leur habitat, notamment en raison de la diversité des exigences des différentes espèces pour tendre leurs toiles, un intérêt notable peut-être souligné : de nombreuses espèces sont anthropophiles, permettant une approche en écologie des milieux urbains.

Mollusques

La faible capacité de déplacement des gastéropodes en fait un modèle d'étude pour mettre en évidence l'incapacité de fuite vers le nord de certains taxons. D'ores et déjà, pour la mulette perlière, bivalve aquatique de forte valeur patrimoniale, les populations méridionales seraient condamnées, si les prévisions actuelles d'évolution du climat se confirmaient (Prié, communication personnelle).

- Cas de trois groupes fonctionnels de coléoptères

Coléoptères coprophages

Le groupe des coléoptères coprophages a bénéficié de nombreux travaux d'inventaire depuis un peu plus d'une décennie en région : 83 % des données d'espèces régionales ont été produites au cours des seules 20 dernières années, la première datant du 19^e siècle (De Brebisson, 1835). Le remarquable cas de l'expansion de *Coprimorphis scrutator*, espèce découverte en Normandie en 2008 et qui a progressé en 5

ans de 40 km vers le nord a été bien caractérisé (Simon, 2012). Seuls les CC sont envisagés comme cause de cette évolution d'aire de répartition. Le rôle de corridor des vallées de l'Eure et de la Seine est mis en évidence. La découverte de l'espèce en 2018 dans la Réserve naturelle nationale du coteau de Mesnil-Soleil (Simon, 2020) illustre le rôle de corridor de la plaine de Caen-Falaise-Argentan-Alençon pour les espèces d'affinités méridionales. La trame verte des coteaux calcaïques et siliceux normands, joue un rôle essentiel dans la migration de ce type d'espèces méridionale face au CC. Mais quels en seront les effets sur les autres espèces déjà présentes ? La progression de la répartition de plusieurs espèces d'affinité méridionales est observée pour ce groupe et en Normandie, essentiellement depuis 2006. Parmi les quatre causes identifiées : l'augmentation de la pression de prospection, les CC, la description d'espèces nouvelles pour la science et l'évolution de la réglementation parfois favorable à la biodiversité (Simon, 2020).

Coléoptères saproxylophages

L'étude du groupe des coléoptères saproxylophages connaît en France un formidable essor depuis quelques années. Les 2600 espèces françaises de coléoptères appartenant à ce groupe fonctionnel sont utiles à la description fonctionnelle des boisements, à la caractérisation de leur continuité temporelle. Pour la famille des cerambycidae, par exemple, il est établi que le climat conditionne largement, mais pas uniquement, la répartition de nombreuses espèces (Gouverneur et Guérard, 2011).

Le laboratoire d'entomologie de l'Office national des forêts, associé à l'OPIE et à l'université de Purpan-Toulouse, ont standardisé une méthode de bio évaluation de la valeur biologique des milieux forestiers par l'usage de pièges d'interception polytrap (Nageleisen et Bouget, 2009). Cette technique a été aussi expérimentée dans le bocage normand pour la première fois en 2020. En Normandie, le GRETIA et l'ONF mettent actuellement à jour la liste régionale des espèces de ce groupe de coléoptères. Un peu plus de 600 taxons sont concernés. Les études déjà menées en région ont déjà permis d'établir des cortèges de référence pour une quinzaine de massifs forestiers. Les peuplements sylvicoles sont concernés au premier plan par les CC, notamment en lien avec l'accroissement attendu du déficit hydrique relatif (Baudran *et al.*, 2008). Le charançon du hêtre prolifère depuis bientôt quatre ans en Forêt de Cerisy, s'attaquant de façon massive aux houppiers : une telle prolifération s'inscrivant dans la durée serait une première en France. Est-ce déjà le signe d'une moindre résistance du hêtre face aux attaques en raison d'un stress hydrique accru ? Si l'avenir du hêtre est en question dans notre région face au réchauffement climatique, qu'en est-il des communautés saproxylophages associées ? Les perspectives offertes par l'étude de ce groupe fonctionnel sont donc importantes pour caractériser et suivre les effets progressifs des CC sur les milieux forestiers et bocagers.

Coléoptères aquatiques

Les coléoptères aquatiques sont d'excellents bio-indicateurs des zones humides. Comme cela a été synthétisé récemment en Normandie (Picard, 2020), les coléoptères aquatiques constituent une part importante de la biodiversité des zones humides, soit environ 21% de la faune d'invertébrés aquatiques (Bloechl *et al.*, 2010). Les coléoptères aquatiques réunissent les critères définissant les taxons indicateurs : une taxonomie bien connue et stable, une biologie suffisamment connue, des populations qui peuvent être suivies, des groupes d'espèces et des espèces qui occupent une large gamme d'habitats et une vaste aire de distribution, une spécialisation de chaque population au sein d'habitats restreints.

Les coléoptères aquatiques reflètent la biodiversité globale des écosystèmes aquatiques (Jeffries, 1988 ; Sanchez-Fernandez *et al.*, 2011). Leur importance comme indicateurs des changements temporels et spatiaux qui ont lieu dans les systèmes aquatiques a été démontrée (Bournaud *et al.*, 1992 ; Sanchez-Fernandez *et al.*, 2006). Ils ont aussi été utilisés pour classer les sites selon leur état de conservation (Jeffries, 1988 ; Sanchez-Fernandez *et al.*, 2006) et définir des zones prioritaires à conserver (Abellán *et al.*, 2005 ; Sanchez-Fernandez *et al.*, 2011).

Les principaux enjeux de conservations normands pour le groupe des coléoptères aquatiques se concentrent dans deux grands types de contextes. D'une part, dans les milieux arrière littoraux, des rock-pool hyper-salés aux collections d'eau sub-halophiles. A la forte conductivité de ces eaux sont associés des cortèges d'espèces extrêmement localisés à une frange littorale. D'autres part, dans les systèmes paratourbeux à tourbeux situés dans les grands ensembles marécageux ou landeux ainsi que dans les têtes de bassins versants sur les hauteurs normandes. Aux eaux propres, froides, bien oxygénées et permanentes, sont associées des espèces des faunes froides, très exigeantes quant à la qualité physicochimique de leur habitat. Hors, l'évolution du trait de côte et des milieux rétro-littoraux normands est au cœur des préoccupations quant aux effets attendus du réchauffement global, tout comme les bouleversements attendus quant aux fonctionnements hydrosystémiques de l'amont des cours d'eau. Si la Normandie est dotée d'un outil de bio-indication « l'ICOCAM », d'un réseau d'acteurs très structuré au sein des enjeux littoraux et d'un programme régional d'action en faveur des tourbières naissant, la question de l'usage des coléoptères aquatiques pour étudier les impacts du changement climatique reste un champ d'investigation à

explorer. Soulignons aussi l'intérêt d'un autre groupe d'adéphaga, les coléoptères carabidae. Leur utilité pour l'étude des modifications du régime hydrologique des cours d'eau, en lien avec les faciès de dépôt sédimentaires au niveau des berges exondées est à l'étude. L'éventail d'espèces halophiles à halobiontes en fait un outil particulièrement intéressant pour étudier l'influence de la remontée du biseau salé dans les cours d'eau.

- Invasions biologiques

Les CC sont aussi identifiés comme un facteur favorable à la dissémination et à la prolifération des espèces exotiques envahissantes, tel le frelon asiatique.

2.3 Conclusion

De nombreuses premières mentions d'espèces aux échelles départementales, voire régionales, ont été réalisées ces dernières années. Sommes-nous là témoins des effets des CC ou d'un manque de connaissances ? Pour un nombre croissant d'espèces d'invertébrés continentaux, l'impact du CC se confirme progressivement. A ce titre, les invertébrés continentaux confirment leur valeur d'indicateurs écologiques des effets de ces changements en Normandie. Certaines espèces mobiles, peu exigeantes écologiquement et d'affinité méridionale colonisent actuellement la région. Pour d'autres, plus discrètes, dotées de moindres capacités migratoires, sténoèces et écologiquement exigeantes, il est aujourd'hui quasiment impossible de confirmer les dynamiques pressenties d'érosion de leurs populations, sans suivi adapté.

Les enjeux représentés par la perte d'espèces sont diversifiés : effacement des agencements complexe d'espèces témoignant de l'histoire naturelle de notre région, dégradation et fragilisation de certaines fonctionnalités mettant en péril les services écosystémiques, dysfonctionnement des écosystèmes source de nouvelles difficultés à affronter pour les générations à venir. Evoquons aussi, comme de premières observations en attestent, la pullulation d'espèces associée à la disparition des prédateurs, parasites et parasitoïdes.

Il reste encore beaucoup de travail à accomplir pour identifier les stratégies de déplacement des espèces et notamment l'existence de corridors écologiques fonctionnels. Si les réseaux de coteaux font figures de modèle d'étude pour la remontée des espèces d'affinité méridionale, quid de zones de replis écologique face à la montée du niveau de la mer et à la salinisation des terrains ? Quels axes de déplacement subsistent pour permettre les mouvements des faunes d'est vers l'ouest, en lien avec la dégradation du caractère atlantique du climat en Normandie ? Le maillage bocager (haies, mares, prairies, bosquets) n'a-t-il pas un rôle majeur à jouer pour permettre un mouvement des faunes plus progressif ?

Certes, les effets directs et indirects des CC sur les invertébrés doivent aussi être considérés à des niveaux plus complexes, tels les effets sur l'écologie chimique des relations plantes-insectes, chez les pollinisateurs par exemple (Jamieson *et al.*, 2017). Une étude allemande récente, établi que l'utilisation des terres est l'un des principaux moteurs de la diminution de la biodiversité (Seibold *et al.*, 2019). Les données d'inventaires standardisés, réalisés de 2008 à 2017 dans 150 prairies, ont révélé qu'à tous les niveaux trophiques s'observent un déclin de la biomasse (- 67%) de l'abondance (- 78%) et de la richesse spécifique (- 34 %). Un déclin marqué est également observé dans 140 milieux forestiers étudiés. Si les politiques doivent prendre en compte l'échelle du paysage pour atténuer les effets négatifs des pratiques d'utilisation des terres, les séries chronologiques multi-sites manquent pour analyser la part des différents facteurs de l'érosion de la biodiversité. Ainsi par exemple, sans protocole de suivi régional, les régressions d'aires de répartitions et les extinctions locales sont aujourd'hui difficile à caractériser et à expliquer. Depuis une vingtaine d'années, un effort important de réalisation et de diffusion d'atlas pour plusieurs familles d'invertébrés est consenti par les associations, parfois plus d'un siècle après le précédent atlas régional, parfois tous simplement les premiers pour la région Normandie. Au vu de l'accélération récente des changements climatiques, nous disposons donc de peu d'informations sur la régression présumée d'aires de répartition des espèces d'affinité septentrionale, dites de « faunes froides ».

Pour développer la prise en compte des enjeux de biodiversité face au changement climatique, la Normandie possède des atouts indéniables pour jouer une carte ambitieuse autour de la connaissance et de l'expertise naturaliste en mobilisant toutes ses compétences en la matière (Chaussi et Hugo, 2013), notamment pour le groupe des invertébrés. Les approches d'expertise scientifique (tendance d'évolution des effectifs d'une population d'espèces) et de sciences naturalistes (simples témoignages de la présence d'une espèce) ne doivent plus être opposées mais être développées en synergie, pour permettre le suivi des effets du réchauffement climatique sur la biodiversité. Dynamiques d'atlas et mise en œuvre de protocoles scientifiques adaptés sont à déployer avec ampleur. L'opportunité d'un observatoire biologique des effets du CC mériterait d'être étudiée avec l'ANBDD et son réseau d'acteurs régionaux de la biodiversité.

3. **Biodiversité marine**

3.1. Etat de l'inventaire des espèces et des habitats

A l'échelle de la Normandie, les connaissances sur la biodiversité marine sont importantes en raison de nombreux recensements qui ont été faits depuis le 18^{ème} siècle par des naturalistes, enseignants et chercheurs des universités, et ingénieurs de bureaux d'étude. Des inventaires, catalogues, atlas, base de données permettent de dresser un inventaire assez exhaustif des espèces d'invertébrés : 769 pour les îles Chausey (Olivier et al., 2010), 2226 pour le golfe normand-breton (Le Mao et al., 2019), 1485 pour l'estuaire et la partie orientale de la baie de Seine (Ruellet et Dauvin, 2008), 427 en zone intertidale et 906 en zone subtidale en baie de Seine (Baffreau et al., 2017), dont 139 Espèces Non Indigène (ENI) en Normandie (Baffreau et al., 2018). C'est donc probablement plus de 3000 espèces d'invertébrés qui ont été recensées dans les eaux marines normandes. Pour les poissons Le Mao (2009) comptabilise 179 espèces dans le golfe normand-Breton, alors que Maurin et al. (2010) recensent 74 espèces dans l'estuaire de la Seine et Vaz et al. (2016) 80 espèces pour tout le bassin oriental de la Manche. Le nombre d'oiseaux présents en Normandie s'établit à 276 espèces parmi eux 90 espèces marines dont 30 sont nicheuses sur le littoral. Deux espèces de phoques gris et veau marin ont des populations prospères ; une dizaine d'espèces de cétacés sont potentiellement observables en Normandie. Sur les sept espèces de tortues marines actuellement connues dans le monde, cinq ont été recensées en Normandie.

Du point de vue des espèces végétales, il convient de souligner l'exceptionnelle biodiversité des algues de l'archipel de Chausey qui compte 384 espèces, celle du nord Cotentin environ 200 et celles de la baie de Seine n'atteint pas la centaine (Rusig et Mussio, comm. personnelles).

Des habitats marins exceptionnels, comme les récifs d'hermelles (ver marin), les herbiers de zostères, les bancs de maërl sont présents en Normandie. De plus, la Normandie compte 13 ZNIEFF-Mer de type 2 (grandes zones) et 26 de type 1 (plus petites zones) s'ajoutant aux 150 ZNIEFF continentales ayant une partie marine pour un total de 189 ZNIEFF comportant une partie marine dont 139 ZNIEFF de type 1 et 50 ZNIEFF de type 2 soit 17 % du domaine marin normand.

Au Nord-Ouest du Golfe normand-breton, sur des fonds de 0 à 70 m dans une zone à fort hydrodynamisme se trouvaient des moulières à modioles *Modiolus modiolus* (habitat prioritaire d'OSPAR) qui étaient en Normandie en limite méridionale de répartition. Aucune modiole n'a été récoltée par Foveau et Dauvin (2017) dans leur prélèvement de 2015-2016. La présence ou l'absence de cette espèce reste à confirmer, sa disparition dans cette zone pouvant être liée au CC.

Delavenne et al. (2013) ont donné une classification du plancton avec cinq zones présentes en Normandie : estuaire de Seine, côtes du Calvados, eaux côtières en baie de Seine-Seine-Maritime, eaux du large en baie de Seine-Seine-Maritime et eaux du large du nord Cotentin.

3.2. Etat des connaissances sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes marins

L'ouest Cotentin se caractérise par la présence de huit havres caractérisés par de tout petits fleuves côtiers et par un vaste estran dont les abondances et biomasses sont importants et jouent un rôle de nourricerie pour les poissons à marée haute de vive-eau (mulets, bars), aux oiseaux à marée basse et en morte-eau ainsi que lieux d'hivernage et de halte migratoire pour l'avifaune, notamment les oies bernaches. Aujourd'hui, les ruptures de cordons dunaires lors des tempêtes hivernales en lien aussi avec l'élévation du niveau marin, se traduit par un ensablement de ces havres et pourrait réduire la forte productivité des havres par une perte conséquente des surfaces des prés salés et des vasières zones les plus productives de ses milieux. A présent, la productivité ne semble pas encore trop impactée par les modifications sédimentaires, car les milieux de transitions sont propices à un bon niveau de production primaire (Morelle et al. 2020). Les connaissances sur la biodiversité marine sont réduites sauf en rade de Cherbourg et en baie du Becquet. Le nord Cotentin représente la limite biogéographique septentrionale de nombreuses espèces marines : pointe de la Hague ou pointe de Barfleur ; les observations dans ce secteur sont essentielles pour comprendre les migrations vers l'est de bon nombre de ces espèces.

La Manche orientale et l'estuaire de la Seine est un secteur à enjeu pour la production des larves de poissons qui alimentent les zones côtières de la Manche en juvéniles et le bassin Sud de la mer du Nord. L'abondance de poissons juvéniles en estuaire de Seine aval confirme l'importance de la fonction de nourricerie qui peut y être considérée comme majeure, favorisée notamment par les fonds riches en faune benthique, source de nourriture pour les jeunes poissons.

Foveau et al. (2017) ont modélisé la sensibilité des habitats benthiques du bassin oriental de la Manche et du sud de la mer du Nord aux effets des arts traînants. Il apparaît que les zones côtières sablo-vaseuses

sont moins affectées, car les espèces présentes sont résistantes, alors que les sédiments plus grossiers du large fréquentés par des espèces à faible potentiel de croissance sont plus sensibles aux fortes pressions de pêche et la résilience de ces zones est plus longue. Outre les pressions de pêche, les efflorescences algales nuisibles (HABs) affectent le fonctionnement des écosystèmes côtiers (voir encart 2). Il est donc important d'associer les changements des habitats dus au CC à ceux dus aux diverses activités humaines et aux risques toxiques qui peuvent d'ailleurs augmenter en relation avec les augmentations de température.

3.3. Changements de biodiversité attestés

Invertébrés benthiques

Des progressions vers l'est liées aux CC sont attestées chez deux espèces de crabe, le crabe marbré *Pachygrapsus marmoratus* (Pezy et Dauvin, 2015) et le crabe *Asthenognathus atlanticus* (Pezy et Dauvin, 2017) (Figure 5). Un exemple illustratif du CC est donné par le suivi des balanes cirripèdes (crustacés) à Flamanville avec une relation entre la rigueur de l'hiver et l'importance numérique de ces cirripèdes qui se fixent sur le substrat rocheux entre mars et juin (Dreves, 2001) (Figure 6). Introduite volontairement dans les années 1970 l'huître japonaise *Crassostrea gigas* trouve depuis une dizaine d'années, des conditions de température favorable à sa reproduction aboutissant à la création de récifs sur les structures portuaires et quelques zones des estrans normands. A l'inverse, le bulot *Buccinum undatum* serait menacé par de plus fortes températures enregistrées en fin d'automne, sa reproduction s'étalant de décembre à janvier, des températures de l'eau élevées à la fin de l'automne diminueraient la capacité du bulot à pondre en masse. Gaudin et al. (2019) ont évalué les effets du CC récent sur la distribution de la macrofaune benthique subtidale en comparant des données collectées à l'échelle de la Manche lors d'une période froide (1960-70) et d'une période chaude (2012-2014). L'évolution des températures de fond au cours des 30 dernières années montre un réchauffement de 0,1 à 0,5°C par décennie d'ouest en est. Toutefois, ce réchauffement ne se s'est pas traduit par d'importants déplacements de l'aire de distribution des espèces mais par une forte diminution du nombre d'occurrences des espèces d'eaux froides et une forte augmentation de celui des espèces d'eaux chaudes.

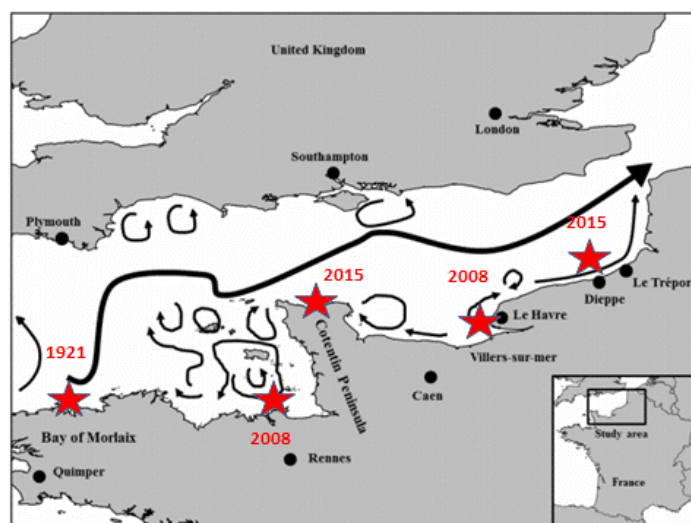


Figure 5. Progression en Manche orientale du crabe *Asthenognathus atlanticus* avec les dates de premières observations, étoiles rouges (D'après Pezy et Dauvin, 2018). Trait noirs courants résiduels.

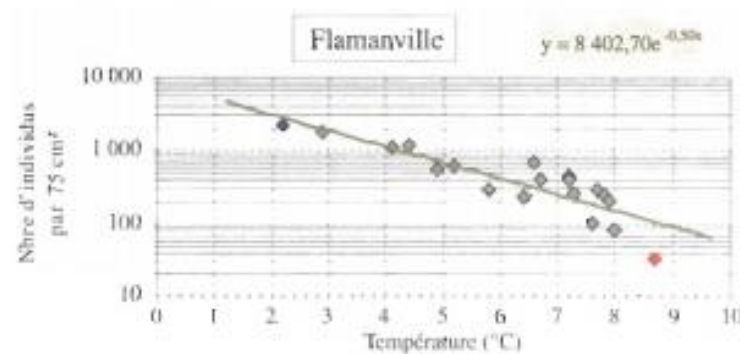


Figure 6. Relation entre le nombre d'individus de balanes au printemps sur des plaques de par 75 cm² en fonction de la température mensuelle moyenne de l'air la plus froide de l'année (en °C) ; en rouge année 1990 (D'après Dreves, 2001).

Organismes planctoniques

Beaugrand et Goberville (2010) ont montré des migrations très rapides du zooplancton le long des côtes européennes entre les latitudes correspondant au sud du golfe de Gascogne à l'Islande. Et d'importantes modifications de la phénologie des espèces, c'est-à-dire des changements dans les rythmes naturels des espèces, phénomène attribué au réchauffement des températures : modification de la période de floraison printanière, décalage de la présence du méroplancton (phase larvaire pélagique de certains organismes benthiques), avec un maximum saisonnier progressant d'un mois entre 1958 et 2002, changement de proies pour les larves et juvéniles de morues contribuant à la diminution de leurs survies. En relation aux réductions hydrologiques liées au CC, on assiste à une 'marinisation' de l'estuaire de la Seine avec une pénétration d'espèces marines dans la partie aval de l'estuaire et une forte réduction des biomasses planctoniques donc des proies pour les juvéniles poissons dans cette partie de l'estuaire.

Poissons

Lenoir (2011) à l'aide d'un modèle d'habitat appelé le Non-Parametric Probabilistic Ecological Niche Model (NPPEN) basé sur l'absence ou la présence des espèces a montré qu'en majorité, la cinquantaine d'espèces modélisées vont effectuer un déplacement vers le nord, pour rester dans un environnement conforme à leur niche écologique. Ces changements altèrent le fonctionnement du réseau trophique en modifiant la disponibilité et la qualité des ressources en poissons pour les consommateurs supérieurs comme les oiseaux marins. Ces bouleversements trophiques sont d'autant plus prononcés que l'espèce concernée se trouve en limite de sa niche écologique. Le projet Eclipse (Ifremer) sur les effets de la pêche et du CC sur la structure des populations de poissons a montré de fortes modifications au cours des années 1990 dans le bassin oriental de la Manche. Les stocks de poissons pélagiques ont fortement diminué, parallèlement à leur augmentation en mer du Nord (Aubert et al., 2015). De même, en baie de Somme, Auber et al. (2017) ont montré la tropicalisation de la communauté de poissons au milieu des années 1990, période où une hausse des températures s'est produite dans le Nord-Est Atlantique. Les données temporelles de pêches scientifiques sont plus rares dans le bassin occidental de la Manche et ne permettent pas d'esquisser de grands bouleversements ; cependant, des espèces auparavant cantonnées au Golfe de Gascogne progressent en Manche occidentale, notamment le thon rouge, le baliste ou la daurade rose.

3.4. Changements de biodiversité attendus

Outre des analyses rétrospectives basées sur des observations, des modèles de niche écologique (Ecological Niche Models) ont été utilisés pour déterminer la répartition potentielle d'espèces benthiques à l'horizon 2100 (modèle NPPEN, Rombouts et al., 2012). Les répartitions probables en tenant compte du scénario de changement climatique A2 du GIEC pour deux périodes 2050-2059 et 2090-2099 montrent des déplacements généraux des espèces benthiques de la Manche (coquille Saint-Jacques et amande de mer par exemple ; Figure 7) vers la mer du Nord et la côte sud de la Norvège.

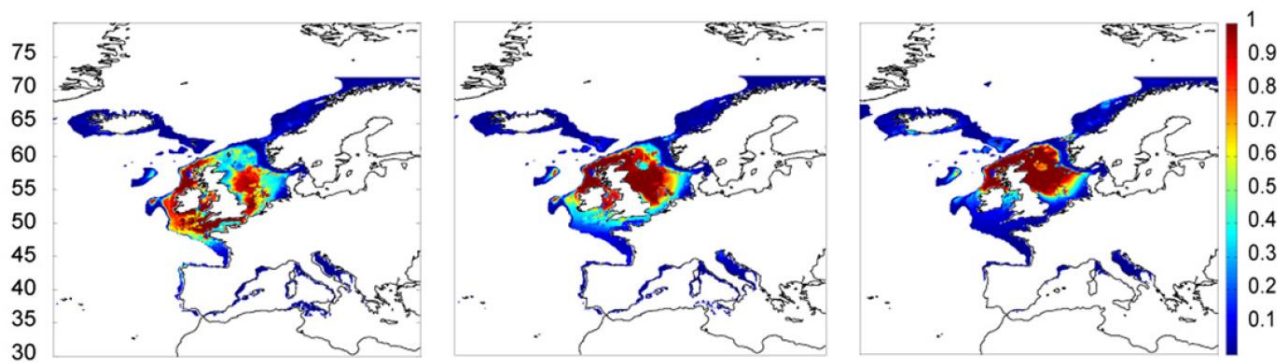


Figure 7. Probabilité de présence de *Glycymeris glycymeris* en Manche-Mer du Nord modélisée par le modèle NPPEN. A gauche situation actuelle, au milieu situation modélisée en 2050-2059 et à droite 2090-2099 (D'après Rombouts et al., 2002). En rouge 100% de probabilité de présence en bleu 100% de probabilité d'absence.

Les travaux en cours sur la modélisation des changements d'aire de répartition des espèces marines en Manche sont passés d'une simulation basée sur un unique modèle de niche à une approche multi-modèles avec une sélection des modèles les plus efficaces (Araignous et al., 2019, Ben Rais Lasram et al., 2020). Plusieurs modèles de niche ont été créés à partir de données d'occurrences géographiques et de variables environnementales. Afin d'intégrer la variabilité de ces modèles, neuf algorithmes comprenant le modèle NPPEN (Non-Parametric Probabilistic Ecological Niche *model*), et huit autres modèles intégrant des données simulant l'absence de l'espèce (données de pseudo-absence) ont été utilisés pour chacun des deux filtres suivants : 1) Un filtre de premier ordre à échelle globale correspondant aux préférences climatiques de chaque espèce, prenant en compte la température et la salinité sur trois profondeurs différentes ; 2) Un filtre de second ordre à échelle plus fine correspondant aux préférences des espèces benthiques et démersales, prenant en compte quatre caractéristiques physiques de l'habitat, dont le type de sédiment. Ceci permet de considérer le fait que les caractéristiques de l'habitat, comme la profondeur ou la nature du fond, influencent fortement les distributions des espèces localement (Maxwell et al., 2009). À partir des 120 espèces qui dominent la biomasse de la macrofaune en Baie de Seine, 73 espèces de poissons, invertébrés, oiseaux et mammifères marins ont été sélectionnées pour cette modélisation des niches écologiques. Ces modèles ont été utilisés pour étudier les potentielles variations de distribution des espèces à partir de projections climatiques sous les scénarios RCP 2.6 et RCP 8.5 du GIEC (Araignous et al., 2019 ; Ben Rais Lasram et al., 2020). Dans l'article de Ben Rais Lasram et al (2020), un lien vers l'algorithme en libre accès permet aux non modélisateurs d'effectuer leur choix d'espèce et de simuler la projection de l'aire comprenant les conditions favorables à son accueil en fin de 21^{ème} siècle (Figure 8).

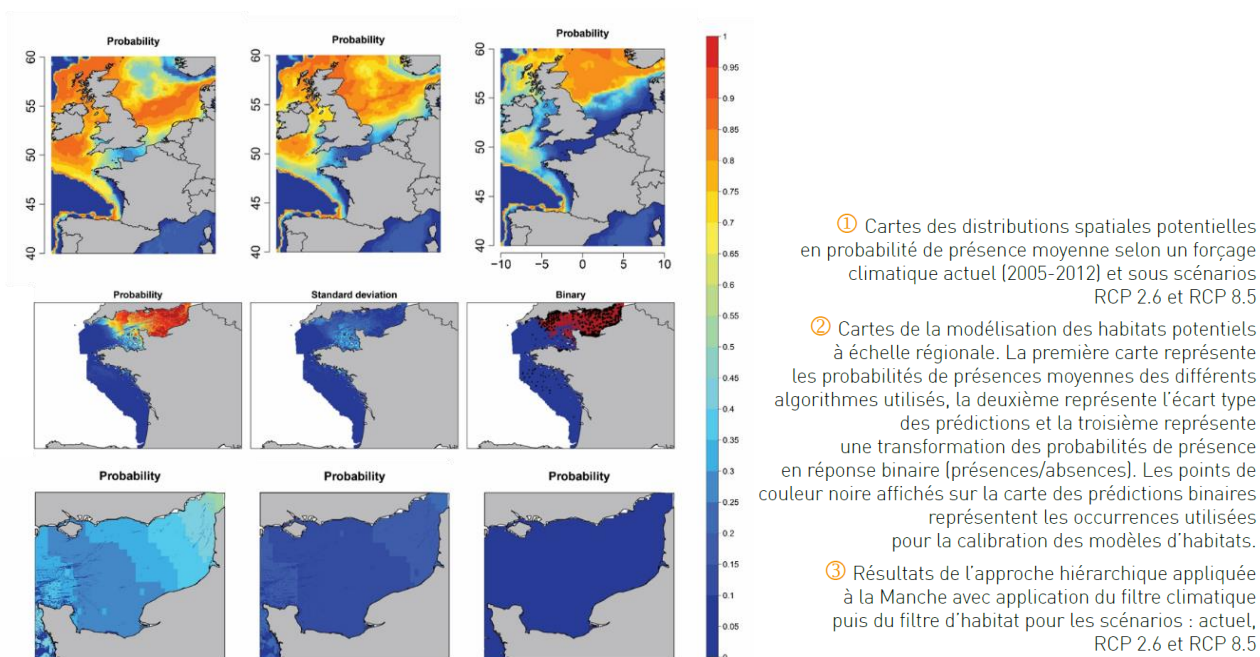


Figure 8. Exemple de résultats de la modélisation de l'aire de répartition de la coquille St-Jacques pour les scénarios actuel, RCP 2.6 et RCP 8.5 par l'approche multi-modèles intégrant les variations de température et salinité avec la profondeur, et les caractéristiques des habitats (Araignous *et al.*, 2019 ; Ben Rais Lasram *et al.*, 2020).

3.5. Intégration des changements de biodiversité simulés dans des modèles de cumul d'impact

Dans une telle approche de modélisation de la biodiversité, les espèces sont considérées indépendamment les unes des autres, cependant ces espèces s'organisent au sein d'un réseau complexe d'interactions, basé en particulier sur les relations prédateurs proies. Ce réseau d'interactions est appelé réseau trophique. Différentes méthodes permettent d'estimer les flux de matière organique au sein de ce réseau soit ponctuellement (méthode de l'analyse inverse linéaire ou méthode Ecopath), soit dynamiquement dans le temps (méthode Ecosim) et dans l'espace en 2 dimensions (méthode Ecospace). A partir de ces modèles de réseaux trophiques, les indices ENA (pour analyse des réseaux écologiques) permettent de caractériser des propriétés telles que le recyclage ou encore l'efficacité de transfert. Ces indices sont proposés aux gestionnaires de l'environnement pour caractériser l'état de santé des écosystèmes en particulier pour l'évaluation du « bon état écologique » tel que requis par la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (Safi *et al.*, 2019). L'application de ces méthodes en Baie de Seine (Raoux *et al.*, 2017 ; Halouani *et al.*, 2020) et dans l'Estuaire de la Seine (Tecchio *et al.*, 2015) a permis d'en caractériser le fonctionnement écologique. Elle a permis aussi de caractériser différents impacts humains sur ce fonctionnement, par la caractérisation avant - après la construction de l'extension au port du Havre appelée Port 2000 (Tecchio *et al.*, 2016 ; Le Guen *et al.*, 2019) ou le dépôt des sédiments de dragage de l'embouchure de la Seine (Pezy *et al.* 2017, 2018) ou des bassins portuaires du port du Havre (Raoux *et al.*, 2020). Cette modélisation écosystémique a aussi permis de simuler l'effet de la présence du futur parc éolien de Courseulles-sur-mer (Raoux *et al.*, 2017 et 2019). Ces travaux servent actuellement de base à la mise en place de méthodes pour l'étude du cumul de ces impacts avec les effets du changement climatique sur la distribution des espèces. De premiers essais ont été réalisés sur le cumul entre l'effet de la présence du futur parc de la Baie de Seine, ponctuellement (Noguès *et al.*, 2020) et dans l'espace en 2 dimensions afin de voir l'étendue des effets hors du parc (Noguès *et al.*, 2019). Ces études permettent d'appréhender la complexité de ces interactions qui peuvent se neutraliser l'une l'autre ou au contraire s'amplifier. C'est ce qu'on appelle un effet cumulé tamponné ou synergique (Figure 9).

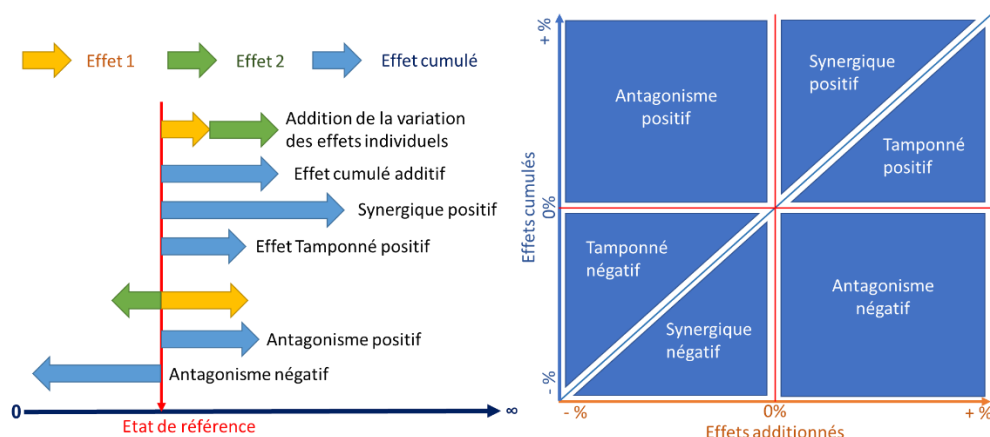


Figure 9. Définition des termes désignant les types d'effet cumulé dont la mesure est ensuite appliquée dans le modèle spatialisé de la Baie de Seine étendue jusqu'à la limite des eaux France – Grande Bretagne (Noguès et al., 2019).

3.6. Enjeux pour la biodiversité marine face au changement climatique

La complexité des mécanismes et l'ampleur et la disparité des réponses au changement climatique exigent le développement d'observatoires de la biodiversité, et donc des ressources humaines et financières appropriées, il est capital de prendre en compte à la fois les observations récentes et actuelles, à l'échelle du siècle ou moins, et les observations à l'échelle du millénaire et au-delà. Un tel observatoire est présent à Luc-sur-mer (voir encart 1) et joue un rôle primordial pour le suivi de la biodiversité marine.

Mais pour aller plus loin, les interactions entre écologues, historiens, archéologues et géologues devront encore être renforcées. Le développement de scénarios de biodiversité s'appuyant sur les observations exige un effort accru de modélisation des dynamiques des écosystèmes et des socio-écosystèmes, prenant en compte la complexité dans ces réseaux d'interactions (voir les premiers essais de modélisation socio-écosystémique de Raoux et al. (2018) et Haraldsson et al. (2020). Pour faciliter l'adaptation des sociétés aux réponses de la biodiversité aux changements climatiques, l'apport des Sciences de l'Homme et de la Société et le développement d'une « éducation appropriée à un développement durable » sont indispensables. L'interaction des effets potentiels du CC sur la biodiversité avec d'autres facteurs, et les risques d'effets de seuils sur certains services écosystémiques, exigent des interventions fortes pour limiter ces facteurs. Des effets de ces changements dans les écosystèmes marins en termes de biodiversité et de fonctionnement écologique sur la pêche et l'aquaculture sont déjà observables à ce jour (Voir Chapitre Pêche et Aquaculture).

L'interaction avec les phénomènes de transport est aussi primordiale, afin d'étudier la connectivité des habitats de la Manche et les échanges d'organismes au sein des masses d'eau, comme pour les larves de poissons, aussi bien que les espèces vagiles. Il importe donc de rassembler un panel complet de sciences, des outils mathématiques au couplage physique-écologie et écologie-sciences humaines et sociales pour se projeter dans des scénarios futurs de la biodiversité marine et de l'adaptation des socio-écosystèmes au changement climatique.

Bibliographie

- Abellán, P., Sanchez-Fernandez, D., Velasco J., Millan A., 2005. Conservation of freshwater biodiversity: a comparison of different area selection methods. *Biodiversity and Conservation*, 14, 3457-3474.
- Anonyme, 2020. Catalogue des acteurs de la biodiversité. Agence normande de la biodiversité et du développement durable, <https://www.anbdd.fr/biodiversite/catalogue-des-acteurs/> Consulté le 21/11/2020.
- AREHN, 2015. Le changement climatique, une réalité en Haute-Normandie. Plaque
- Baudran, C., Blanchard P., Loyer S., 2008. Caractérisation et évolution du climat : quelles conséquences pour la végétation forestière - Région Pays de la Loire. Centre régional de la propriété forestière des Pays de la Loire, Région des Pays de la Loire, Office national des forêts, 44 pages.
- Bellard, C., 2013. Effets des changements climatiques sur la biodiversité. Paris XI : Université Paris sud, 175 pages.
- Bloechl, A., Koenemann, S., Philippi, B., Melber A., 2010. Abundance, diversity and succession of aquatic Coleoptera and Heteroptera in a cluster of artificial ponds in the North German Lowlands. *Limnologica* 40, 215-225.
- Bournaud, M., Richoux, P., Usseglio-Polatera P., 1992. An approach to the synthesis of qualitative ecological information from aquatic Coleoptera communities. *Regul. Rivers: Res. Manag.* 7, 165-180.
- Bousquet, T., Magnanon S., Brindejonc O., 2015. Liste rouge de la flore vasculaire de Basse-Normandie. DREAL Basse-Normandie/Region Basse-Normandie/Feader Basse-Normandie. Conservatoire botanique national de Brest, 43 pages + annexes.
- Buchet, J., Housset, P., Joly, M., Douville C., Levy, W., Dardillac, A., 2015. Atlas de la flore sauvage de Haute-Normandie. Centre régional de phytosociologie agréé Conservatoire botanique national de Bailleul, 696 pages.
- Cartan, M., Godron M., 1978. Inventaires et cartographies de répartitions d'espèces - faune et flore. Editions du Centre national de la recherche scientifique, 127 pages
- Chaussi, S., Hugo, P., 2013. Les compétences naturalistes et l'expertise en biodiversité et géodiversité en Basse-Normandie - Rapport présenté au Conseil économique, social et environnemental régional de Basse-Normandie. Région Basse-Normandie, 185 pages.
- Lévêque, A., Witté, I., 2019. Commissariat général au développement durable. Les enjeux de biodiversité en France métropolitaine : analyses croisées – Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 68 pages.
- DATAR, 2013a. L'adaptation aux effets du changement climatique en Haute et Basse-Normandie – Analyse du climat futur en Haute et Basse-Normandie, 30 pages.
- DATAR, 2013b : L'adaptation aux effets du changement climatique en Haute et Basse-Normandie – Rapport technique final, 271pages.
- De Brebisson, A., 1835. Catalogue des insectes de l'ordre des Coléoptères qui se trouvent en Normandie, notamment aux environs de Falaise. *Mém. Soc. Linn. Normandie* 5, 107-237.
- Douville, C., Zambettakis C., 2019. Etat des lieux de la de Normandie : Nombre de données et nombre d'espèces de plantes vasculaires en Normandie, pour l'Observatoire de la Biodiversité de Normandie, Conservatoires de Brest et Bailleul, Rouen, 26 pages
- DREAL, 2013. La Normandie s'adapte au changement, plaque corédigée par le CGET, les SGAR et les DREAL de Haute-Normandie et de Basse-Normandie, sous la coordination de Sylviane Le Guyader (CGET) et Caroline Renault (SGAR Haute-Normandie), 7 pages.
- DREAL, 2015. Profil Environnemental de Basse Normandie, la Biodiversité, 124 pages.
- Fox, R., 2012. The decline of moths in Great Britain : a review of possible causes. *Insect Conser. Diversity* 6, 1-15.
- Gouverneur, X., Guerard P., 2011. Les longicornes armoricains - Atlas des coléoptères Cerambycidae des départements armoricains. Cahiers GRETIA, 224 pages.
- INPN, 2019. La biodiversité en France - 100 chiffres expliqués sur les espèces. UMS PatriNat (AFB-CNRS-MNHN), Paris, 48 pages.
- Jamieson, M.A., Burkle, L.A., Manson, J., Runyon, J B., Trowbridge, A.M., Zientek J., 2017. Global change effects on plant-insect interactions: The role of phytochemistry. *Insect Sci.* 71, 1-25.
- Jeffries, M., 1988. Do water beetle communities reflect the wider freshwater community ? A trial run. *The Balfour-Browne Club Newsletter* 42, 14-17.
- Le Péru B., 2007. Catalogue et répartition des araignées de France. *Rev. Arachnol.* 16, 1-468.
- Lepertel, N., Quinette J.P., 2016. Atlas des papillons de nuit de Basse-Normandie et des îles Anglo-Normandes. Invertébrés Armoricains. Cah. GRETIA, 467 pages.
- Lorthiois, M., Moulin N., 2013. Expansion de *Brenthis daphne* (Bergsträsser, 1780) dans le nord de la France Premières observations en Haute-Normandie. *Entomol. Haut-normand* 3, 6-8.
- Nageleisen, L.M., Bouget C., 2009. L'étude des insectes en forêt : méthode et technique, éléments essentiels pour une standardisation. Synthèse des réflexions menées par le groupe de travail « Inventaires entomologiques en forêt ». *Dossiers Forestiers* 19, 1-144.
- Massu, N., Landmann, G., 2011. Connaissance des impacts du changement climatique sur la biodiversité en France métropolitaine, synthèse de la bibliographie. Mars 2011. ECOFOR, 180 pages.
- Parmesan, C., Ryrholm, N., Stefanescu, C., Hill J.K., Thomas, C.D., Descimon, H., Huntley, B., Kaila, L., Kullberg, J., Tammaru, T., Tennent, W.J., Thomas, J.A., Warren, M., 1999. – Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming. *Nature* 399, 579-583.
- Picard, L., 2020. Evaluation biologique des mares à l'échelle en Bretagne et Normandie : Application de l'IcoCAM, Année 4., 80 pages.

- Rasmont, P., Franzen, M., Lecocq, T., Harpke, A., Roberts, S.P.M., Beisemeijer, J.C., Castro, L., Cederberg, B., Dvorak, L., Fitpatrick, U., Gonseth, Y., Haubruge, E., Mahé, G., Manino, A., Michez, D. et al. 2015. Climatic Risk and Distribution Atlas of European Bumblebees. *BioRisk* 10, 1-246.
- Sanchez-Fernandez, D., Abellan, P., Mellado, A., Velasco, J., Millan, A., 2006. Are water beetles good indicators of biodiversity in Mediterranean aquatic ecosystems ? The case of the Segura river basin (SE Spain). *Biodiv. Conser.* 15 , 4507-4520.
- Sanchez-Fernandez, D., Lobo, J.M., Abellan, P., Millan A., 2011. How to identify future sampling areas when information is biased and scarce: An example using predictive models for species richness of Iberian water beetles. *J. Nat. Conser.* 19, 54-59.
- Savouret, E., Cantat, O., 2008. Identification et spatialisation des bioclimats. Les apports du couplage d'une approche naturaliste et de l'analyse des conditions climatiques. *Actes des Journées de climatologie 2008*, «Climat et végétation». Comité National Français de Géographie, Commission « Climat et Société », pp. 29-44.
- Seidbold, S., Gossner, M.M., Simons, N.K., Blüthgen, N., Müller, J., Ambarli, D., Ammer, C., Bauhus, J., Fischer, M., Habel, J.C., Linsenmair, K.E., Nauss, T., Penone, C., Prati, D., Schall P., 2019. Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers. *Nature* 574, 671-674.
- Settele, J., Kudrna, O., Harpke, A., Kühn, I., Van Swaay, C., Verovnik, R., Warren, M., Wiemers, M., Hanspach, J., Hickler, T., Kühn, E., Van Halder, I., Veling, K., Vliegenthart, A., Wynhoff, I., Schweiger, O., 2008. Climatic risk atlas of European butterflies. Pensoft Moscow, 710 pages.
- Simon, A., 2012. *Coprimorphus scrutator* (Herbst, 1789) en Haute-Normandie - Précisions sur sa répartition et éléments de biologie (Coleoptera ; Aphodiidae). *Entomol. Haut-Normand* 2, 11-17.
- Simon, A., 2016. Expansion de quatre espèces d'insectes d'affinités méridionales en Normandie (Odonata – Rhopalocera – Orthoptera - Coleoptera). *Entomol. Haut-Normand* 6, 2-10.
- Simon, A., 2020. Les scarabées de Normandie : un atlas régional (Coleoptera, carabaeoidea) - Statuts et répartitions. Invertébrés Armoricaux, Cah GRETIA, 228 pages
- Stallegger, P., 2019. Sauterelles, grillons, criquets, perce-oreilles, mantes et phasmes (Orthoptera, Dermaptera, Mantodea, Phasmatodea) de Normandie : statuts et répartition. Cah. GRETIA., 228 pages.
- Thomas, J.A., 2005. Monitoring change in the abundance and distribution of insects using butterflies and other indicator groups. *Phil. Trans. Royal Soc. Biol. Sci.* 360, 339-357.
- Zambettakis, C., Provost, M., 2009. Flore rare et menacée de Basse-Normandie : un outil d'évaluation et de préservation de la biodiversité régionale, Conservatoire Botanique National de Brest, 423 pages.

Biodiversité marine

- Araignous, E., Beaugrand, G., Ben Rais Lasram, F., Bourdaud, P., Champagnat, J., Dauvin, J.C., Grangeré, K., Halouani, G., Haraldsson, M., Hattab, T., Le Loc'h, F., Leroy, B., Lejart, M., Niquil, N., Noguès, Q., Pagot, J.P., Raoux, A., Safi, G. et Villanueva, C., 2019. Recommandations pour une approche écosystémique des aires d'implantation d'énergies marines renouvelables. Cas d'étude du parc éolien offshore de Courseulles-sur-mer. Plouzané : France Energies Marines édition, 60 pages.
- Auber, A., Travers-Trolet, M., Villanueva, M.C., Ernande, B., 2015. Regime Shift in an Exploited Fish Community Related to Natural Climate Oscillations. *PLoS ONE* 10(7): e0129883.
- Aubert, A., Gohin, F., Goascoz, N., Schailch, I., 2017. Decline of cold-water fish species in the Bay of Somme (English Channel, France) in response to ocean warming. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 189, 189-202.
- Baffreau, A., Chouquet, B., Dancié, C., Duhamel, S., Foveau, F., Hacquebart, P., Navon, M., Pezy, J.P., Poisson, A., Marmin, S., Dauvin, J.C., 2017. Mapping benthic communities: an indispensable tool for the preservation and the management of the Bay of Seine eco-socio-system. *Reg. Stud. Mar. Sci.* 9, 162-173.
- Baffreau, A., Pezy, J.P., Rusig, A.M., Mussio, I., Dauvin, J.C., 2018. Les espèces marines et animales et végétales introduites en Normandie. Imprimerie Moderne de Bayeux, France.
- Beaugrand, G., Goberville, E., 2010. Conséquences des changements climatiques en milieu océanique. *Vertigo*. DOI : 10.4000/vertigo.10143.
- Ben Rais Lasram, F., Hattab, T., Noguès, Q., Beaugrand, G., Dauvin, J.C., Halouani, G., Le Loc'h, F., Niquil, N., Leroy, B., 2020. From data acquisition to atlas creation: a ready to use R script for projecting future patterns of marine species distributions at local scale. *Ecol. Inform.* 59, 101130.
- Delavenne, J., Marchal, P., Vaz, S., 2013 Defining a pelagic typology of the eastern English Channel. *Cont. Shelf Res.* 52, 87-96.
- Dreves, L., 2001. Effets climatiques sur les écosystèmes marins Exemple du recrutement des Crustacés Cirripèdes sur la côte ouest du Cotentin. *Hydroécol. Appl.* 13, 101-112.
- Foveau, A., Dauvin, J.C., 2017. Surprisingly diversified macrofauna in mobile gravels and pebbles from high-energy hydrodynamic environment of the 'Raz Blanchard' (English Channel). *Reg. Stud. Mar. Sci.* 16, 188-197.
- Foveau, A., Vaz, S., Desroy, N., Kostylev, V.E., 2017. Process-driven and biological characterisation and mapping of seabed habitats sensitive to trawling. *PLoS ONE* 12(10): e0184486.
- Gaudin, F., Desroy, N., Dubois, S., Broudin, C., Cabioch, L., Fournier, J., Gentil, F., Grall, J., Houbin, C., Le Mao, P., Thiebaut, E., 2018. Marine sublittoral benthos fails to track temperature in response to climate change in a biogeographical transition zone. *ICES J. Mar. Sci.*, 75, 1894-1907.
- Godet, L., Le Mao, P., Grant, C., Olivier, F., 2010. Marine invertebrate's fauna of the Chausey archipelago: an annotated checklist of historical data from 1828 to 2008. *Cab. Biol. Mar.* 51, 147.165.

- Halouani, G., Villanueva, M.C., Raoux, A., Dauvin, J.C., Ben Rais Lasram, F., Foucher, E., Le Loc'h, F., Safi, G., Aраignous, E., Robin, J.P., Niquil, N., 2020. A spatial food web model to investigate potential spillover effects of an offshore wind farm. *J. Mar. Syst.* 212, 103434.
- Haraldsson, M., Raoux, A., Riera, F., Hay, J., Dambacher, J. M., Niquil, N., 2020. How to model social-ecological systems?—A case study on the effects of a future offshore wind farm on the local society and ecosystem, and whether social compensation matters. *Mar. Pol.* 119, 104031.
- Le Guen, C., Tecchio, S., Dauvin, J.C., De Roton, G., Lobry, J., Lepage, M., Morin, J., Lassalle, G., Raoux, A., Niquil, N., 2019. Assessing the ecological status of an estuarine ecosystem: linking biodiversity and food-web indicators. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 228, 106339.
- Le Mao, P., 2009. Inventaire de la biodiversité marine dans le golfe normano-breton. Agnathes, Condrichthyens et Osteichthyens. Rapport IFREMER DOP LER/FBN-SM.
- Le Mao, P., Godet, L., Fournier, J., Desroy, N., Gentil, F., Thiébaud, E., Pourinet, L., 2019. Atlas de la faune marine invertébrés du golfe Normano-Breton. [Editions de la Station Biologique de Roscoff](#)
- Lenoir, S., 2011. Impact du réchauffement climatique sur la distribution spatiale des ressources halieutiques le long du littoral français. Thèse Uni. Lille1.
- Maurin, J., 2010. Poissons, habitats, ressources halieutiques. Cas de l'estuaire de la Seine. Fasc. Seine-Aval, 2.5.
- Maxwell, D.L., Stelzenmüller, V., Eastwood, P.D., Rogers, S.I., 2009. Modelling the spatial distribution of plaice (*Pleuronectes platessa*), sole (*Solea solea*) and thornback ray (*Raja clavata*) in UK waters for marine management and planning. *J. Sea Res.* 61, 258-267.
- Morelle, J., Claquin, P., Orvain, F., 2020. Evidence for better microphytobenthos dynamics in mixed sand/mud zones than in pure sand or mud intertidal flats (Seine estuary, Normandy, France). *Plos one* 15(8): e0237211 . <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237211>
- Noguès, Q., Bourdaud, P., Aраignous, E., Champagnat, J., Foucher, E., Halouani, G., Hattab, T., Ben Rais Lasram, F., Le Loc'h, F., Leroy, B., Raoux, A., Robin, J.-P., Safi, G., Villanueva, C.-M., Dauvin, J.C., Niquil, N., 2019. Indices ENA et approche holistique des écosystèmes : application à la baie de Seine, espace de cumul d'activités humaines autour du futur parc éolien. Association Française d'Halieutique. Caen. 26-28 juin 2019.
- Noguès, Q., Raoux, A., Aраignous, E., Chaalali, A., Hattab, T., Leroy, B., Ben Rais Lasram, F., David, V., Le Loc'h, F., Dauvin, J.C., Niquil, N., 2020. Cumulative effects of Marine energy and climate change on ecosystem properties: Ecological Network Analysis sensitivity. *Ecol. Ind.* Available online 9 November 2020, 107128
- Pezy, J.P., Dauvin, J.C., 2015. First record of the marbled crab *Pachygrapsus marmoratus* (Fabricius, 1787) on the coast of Calvados (Bay of Seine, English Channel). *Cah. Biol. Mar.* 56, 151-154.
- Pezy, J.P., Raoux, A., Marmin, S., Balay, P., Niquil, N., Dauvin, J.C., 2017. Before-After analysis of the trophic network of an experimental dumping site in the eastern part of the Bay of Seine (English Channel). *Mar. Poll. Bull.* 118, 101-111.
- Pezy, J.P., Raoux, A., Marmin, S., Balay, P., Dauvin, J.C., 2018. What are the most suitable indices to detect the structural and functional changes of a natural physical perturbed community after a local and short-term disturbance? *Ecol. Ind.* 91, 232-240.
- Pezy, J.P., Dauvin, J.C., 2018. Extension of the geographical distribution of the crab *Asthenognathus atlanticus* Monod, 1932 in the eastern English Channel through its commensal relationship with the polychaete *Chaetopterus variopedatus* (Renier, 1804). *Mar. Biod.* 48, 987-993.
- Raoux, A., Dambacher, J., Pezy, J.P., Mazé, C., Dauvin, J.C., Niquil, N., 2018 Assessing cumulative socio-ecological impacts of offshore wind farm development in the Bay of Seine (English Channel). *Mar. Pol.* 89, 11-20
- Raoux, A., Lassalle, G., Pezy, J.P., Tecchio, S., Safi, G., Ernande, B., Mazé, C., Le Loc'h, F., Lequesne, J., Girardin, V., Dauvin, J.C., Niquil, N., 2019. Measuring sensitivity of two OSPAR indicators for a coastal food web model under offshore wind farm construction. *Ecol. Ind.* 96, 728-738
- Raoux, A., Tecchio, S., Pezy, J.P., Lassalle, G., Degraer, S., Wilhelmsson, D., Cachera, M., Ernande, B., Le Guen, C., Haraldsson, M., Grangeré, K., Le Loc'h, F., Dauvin, J.C., Niquil, N., 2017. Benthic and fish aggregation inside an offshore wind farm: Which effects on the trophic web functioning? *Ecol. Ind.* 72: 33-46
- Raoux, A., Baux, N., Pezy, J.P., Balay, P., Lesourd, S., Dauvin, J.C., 2020. Evaluating ecosystem functioning of a long-term dumping site (1947-2017), in the Bay of Seine (English Channel). *Ecol. Ind.* 115,106381.
- Rombouts, I., Beaugrand, G., Dauvin, J.C., 2012. Potential changes in distribution of macro-benthic fauna from the English Channel simulated under climate change scenarios. *Estuar. Coast.Shelf Sci.* 99, 153-161.
- Ruellet, T., Dauvin, J.C., 2008. Invertébrés aquatiques de la partie orientale de la baie et de l'estuaire de Seine: deux siècles d'observations. *C. R. Biologies* 331, 481-488.
- Safi, G., Giebel, D., Arroya, N.L., Heymans, J.J., Preciado, I., Raoux, A., Schückel, U., Tecchio, S., de Jonge, V.N., Niquil, N., 2019. Vitamine ENA: a framework for the development of ecosystem-based indicators for decision-makers. *Ocean Coast. Manag.* 174, 116-130.
- Tecchio, S., Chaalali, A., Raoux, A., Tous Rius, A., Lequesne, J., Girardin, V., Lassalle, G., Cachera, M., Riou P., Lobry, J., Dauvin, J.C., Niquil, N., 2016. Evaluating ecosystem-level anthropogenic impacts in a stressed transitional environment: the case of the Seine estuary. *Ecol. Ind.* 61, 833-845.
- Tecchio, S., Tous Rius, A., Dauvin, J.C., Lobry, J., Lassalle, G., Morin, J., Bacq, N., Cachera, M., Chaalali, A., Villanueva, M.C., Niquil, N., 2015. The mosaic of habitats of the Seine estuary: Insights from food-web modelling and network analysis. *Ecol. Model.* 312, 91-101.
- Vaz, S., Carpentier, A., Coppin, F., 2006. Eastern English Channel fish assemblages: measuring the structuring effect of habitats on distinct sub-communities. *ICES J. Mar. Sci.* 64, 271-287.

Encart 1

Observatoire océanologique de la baie de Seine Claquin Pascal et Orvain Francis

La hausse de température induite par l'augmentation spectaculaire du niveau de concentration du CO₂ atmosphérique depuis 50 ans est incontestable dans les océans marins (Hoegh-Guldberg et al., 2014). 80% de la chaleur excédentaire est absorbée par les océans à l'échelle globale. Les températures de l'eau de mer sont plus stables que celle de l'air, avec des changements thermiques progressifs à cause d'un effet tampon océanique très prononcé. Les suivis de température de l'eau de mer sont donc de meilleurs indicateurs du réchauffement global que celle de l'air atmosphérique et elles montrent des relations très fortes avec les autres paramètres hydrologiques. Les observatoires océanologiques sont donc déployés à l'échelle nationale comme par exemple le Service national d'observation (SNO) SOMLIT (Service d'Observation en Milieu Littoral, www.somlit.fr) qui ont commencé leurs mesures pour la plupart à la fin des années 1990 et pour d'autres au début des années 2000. Les observations des huit premières années de suivi multiparamétrique (Goberville et al. 2010) avaient déjà révélé en 2010 que la Manche (Wimereux, Roscoff) était la plus impactée et la plus vulnérable de toutes les façades maritimes métropolitaines face au CC.

Les changements hydrologiques ne se limitent pas à la température car le changement est global et multifactoriel (Figure 10). Les risques principaux concernent la baisse enregistrée des débits fluviaux rapportée dans tous les fleuves normands (voir fiche 10, Deloffre et al.) et dont les niveaux moyens baissent considérablement depuis 30 ans. Si cela limite partiellement des risques d'eutrophisation liés à l'azote, ce qui peut être vu comme positif en termes de qualité de l'eau, cela met aussi en péril le soutien à la croissance phytoplanctonique en limitant l'ensemble des apports en sels nutritifs. Cela induit une limitation de l'ensemble des éléments nutritifs qui soutiennent la croissance de l'élément essentiel à la base des chaînes trophiques marines : le phytoplancton. L'un des risques majeurs du CC à l'échelle globale est de voir diminuer les biomasses de microalgues planctoniques et benthiques (phytoplancton et microphytobenthos), mais aussi la croissance de certaines macroalgues à terme.

Le CREC-station marine de l'UniCaen (Luc-Sur-Mer) met en œuvre des SNO de l'IR ILICO [SOMLIT, PHYTOBS et COAST-HF (bouée SMILE)]. Depuis 2007, le SOMLIT réalise des mesures hydrologiques afin d'identifier les trajectoires hydrologiques à long terme en baie de Seine. Les résultats des 14 premières années confirment la forte vulnérabilité de la baie de Seine face au CC. Un suivi benthique de deux stations près de la bouée SMILE et face à Cabourg a commencé au début de 2020 afin de suivre l'évolution temporelle de ce compartiment connu pour être un bon indicateur des changements des écosystèmes côtiers. Par ailleurs, Le SNO COAST-HF en baie de Seine (bouée SMILE et SCENES) doit permettre d'étudier l'évolution des événements extrêmes sur le long terme.

Les modifications hydrologiques concernent tous les paramètres de manière simultanée : température, pH, biomasse phytoplanctonique (Chla), nutriments (N,P, Si), salinité et oxygène (O₂). Tout d'abord, la température montre au travers de ses oscillations annuelles une dérive significative avec en moyenne 0,88°C d'augmentation en 14 ans ($P < 0,001^{***}$). Cela n'est pas probablement pas imputable au seul réchauffement climatique, même s'il est bien établi que le réchauffement est plus marqué à nos latitudes qu'au niveau des zones tropicales en particulier dans l'hémisphère Nord (Hoegh-Guldberg et al., 2014). En effet, les effets des oscillations climatiques décennales (NAO) et surtout multi-décennale (AMO) peuvent induire des anomalies négatives et positives successives pouvant soit amplifier, soit réduire la dérive climatique liée au CC et ces oscillations varient à des échelles de l'ordre de 30 ans de manière cyclique (voir fiche Aquaculture). Il serait possible que les 14 dernières années traduisent une conjonction de la hausse thermique globale et du passage à une nouvelle phase multi-décennale. Cependant, cette élévation thermique semble être plus forte qu'ailleurs en France sur les 14 dernières années.

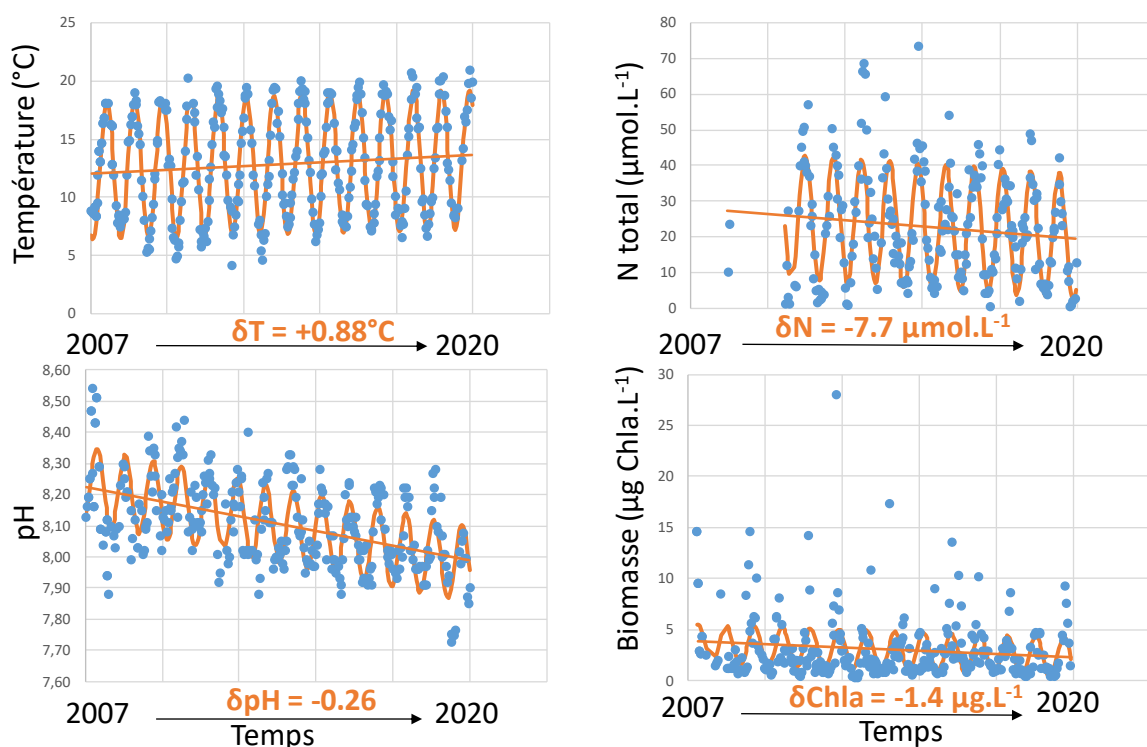


Figure 10. Variation des paramètres de quatre paramètres hydrologiques enregistrée à Luc-sur-Mer dans le cadre du suivi SOMLIT (en bleu). Pour chaque paramètre, la variation saisonnière (harmonique sinusoïdale) a été ajustée et retirée pour mieux analyser la dérive climatique (modèle simple de régression linéaire). Les courbes orange montre le résultat du modèle additionnant les deux équations (harmonique et la dérive climatique) avec des $R^2 = 0,94$ pour la température, $R^2 = 0,66$ pour l'azote total (NH_4^+ , NO_3^- et NO_2^-), $R^2 = 0,56$ pour le pH et $R^2 = 0,21$ pour la concentration en Chla. La part de la dérive climatique seule a été analysée sur les résidus (en retirant l'effet de la composante harmonique sur les données) et ces variations seules sont très significatives pour ces quatre paramètres : Température ($F_{1,318} = 17,7$; $P < 0,001^{***}$), N total ($F_{1,226} = 7,74$, $P < 0,01^{**}$), le pH ($F_{1,308} = 159$, $P < 0,001^{***}$) et la concentration en chla ($F_{1,288} = 4,89$, $P < 0,05^*$). La variation de concentration en phosphate n'a quant à elle pas montré de tendance significative en 14 ans. Les écarts sont significatifs sont de $+0,88^\circ\text{C}$ en 14 ans pour la température, de $-7,7 \mu\text{mol.L}^{-1}$ pour l'azote total, de $-0,26$ pour le pH et de $1,4 \mu\text{g.L}^{-1}$ pour la biomasse en chla.

Les autres paramètres hydrologiques révèlent la même réponse au CC plus rapide qu'ailleurs en France. En particulier, la biomasse chlorophyllienne phytoplanctonique montre des variations annuelles typiques avec des floraisons printanières et un 2^{ème} pic automnal atténué par rapport à celui du printemps. Cependant, en moyenne sur 14 ans, ces biomasses ont été diminuées d'une valeur de $-1,4 \mu\text{g.L}^{-1}$ ce qui correspond à un pourcentage de -37% par rapport aux valeurs initiales du suivi. Ce phénomène est observé à l'échelle de la Manche mais est particulièrement marqué en baie de Seine (Gohin et al, 2019). La réduction de la Chla est multifactorielle et il faut considérer l'ensemble de la biogéochimie de l'N et du P ainsi que l'hydrodynamisme local pour appréhender cette tendance. La baisse des concentrations en N liée à la réduction des débits, ne doit pas masquer les excès d'N qui arrive encore en baie de Seine. Par ailleurs, les apports en P ont largement baissé en Baie de Seine avant 2007, suite à des programmes successifs de gestion, ce qui influence également la croissance du phytoplancton sur le long terme (Romero et al 2013).

Le phénomène le plus alarmant concerne l'acidification des eaux normandes (Figure 10). L'augmentation de la concentration atmosphérique du CO_2 se traduit par une modification de la chaîne des carbonates en libérant des ions hydrogène H^+ . L'océan, qui a absorbé 20 à 30 % des émissions de carbone d'origine humaine depuis les années 1980, devient de plus en plus acide (Hoegh-Guldberg et al., 2014). L'eau de mer est en moyenne à 8,2 en moyenne au cours du 20^{ème} siècle. Les projections du GIEC parlent d'un pH de 7,6 dans le pire des scénarios pessimistes (RCP8.5). A ce pH, les équilibres chimiques impliquant la chaîne des carbonates peuvent s'inverser et le pH pourrait se stabiliser, mais cela inverserait un puits naturel d'absorption du CO_2 , actuellement très efficace pour limiter la hausse dans l'air, et cette inversion de flux à l'interface air-eau pourrait contribuer à accélérer encore plus la hausse du CO_2 atmosphérique que l'on connaît (boucle de rétroaction positive).

Cette acidification, qui a déjà des répercussions sur la vie marine, va donc se poursuivre au cours du 21^{ème} siècle avec un risque majeur pour le climat lui-même. Cette acidification est un phénomène observé de la même manière à une échelle mondiale. On parle plus souvent de ce processus et de la vulnérabilité des espèces marines (à tests carbonatés) dans les zones tropicales à cause du blanchiment spectaculaire des récifs coralliens (Hoegh-Guldberg et al., 2014), mais la Manche semble tout aussi vulnérable à ce phénomène, même si on le ressent de façon plus masquée. Nous aurions ainsi perdu -0,26 de pH en 14 ans à Luc sur mer, soit 1,8 fois plus d'ions hydrogène dans l'eau en termes de concentration.

Bibliographie

Hoegh-Guldberg, O., Rongshuo, C., Poloczanska, E., et al., 2014. The Ocean. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. 1655-1731 p.

Goberville, O., Beaugrand, G., Sautour, B., et l'équipe SOMLIT, 2010. Climate-driven changes in coastal marine systems of western Europe. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 408, 129-147.

Gohin, F., Van der Zande, D., Tilstone, G., Eleveld, MA, Lefebvre, M, Andrieux-Loyer, F, Blauw, AN, Bryere, P., Devreker, D., Gamesson, P., Farinas, T.H., Lamaury, Y., Lampert, L., Lavigne, H., Menet-Nedelec, F., Pardo, S., Saulquin, B., 2019. Twenty years of satellite and in situ observations of surface chlorophyll-a from the northern Bay of Biscay to the eastern English Channel. Is the water quality improving? *Rem. Sens. Envir.* 233. doi:10.1016/j.rse.2019.111343

Romero, E., Garnier, J., Lassaletta, L., Billen, G., Le Gendre, R., Riou, P., Cugier, P., 2013. Large-scale patterns of river inputs in southwestern Europe: seasonal and interannual variations and potential eutrophication effects at the coastal zone. *Biogeochemistry* 113, 481-505.

Encart 2

Efflorescences algales nuisibles et changement climatique en Normandie Juliette Fauchot et Tania Hernandez

Les efflorescences algales nuisibles sont des proliférations d'algues (microalgues ou macroalgues) engendrant des conséquences néfastes pour la santé humaine, les écosystèmes et les activités socio-économiques (pêche, aquaculture, tourisme). Les impacts de ces efflorescences nuisibles en Normandie incluent surtout des décolorations des eaux côtières (ex : marées rouges liées à certains dinoflagellés) et des contaminations de produits de la mer tels que les coquillages par des phycotoxines produites par les microalgues et dangereuses pour la santé humaine. Les réseaux d'observation REPHY et de surveillance REPHYTOX de l'Ifremer contribuent au suivi du phytoplancton nuisible (depuis 1988) et des toxines dans les coquillages des zones de production et de pêche (à partir de 1999). Des seuils d'alerte, en nombre de cellules par litre dans l'eau, sont associés aux espèces toxiques. Des fermetures de secteurs de pêche ou de ramassage de coquillages ont ainsi lieu chaque année sur les côtes normandes suite au dépassement des seuils réglementaires de concentration de toxines chez les bivalves. Ces épisodes toxiques sont en lien principalement avec les développements de différentes espèces de dinoflagellés (*Dinophysis*) ou diatomées (*Pseudo-nitzschia*).

Le Rapport spécial du GIEC sur les Océans et la Cryosphère dans le Contexte du CC, paru en septembre 2019, prévoit des impacts sur la biogéographie, l'abondance et la toxicité des efflorescences algales nuisibles liés au réchauffement et aux augmentations des niveaux de CO₂ durant le 21^{ème} siècle, avec une aggravation des risques pour les écosystèmes marins et la santé humaine. Sur les côtes françaises, les efflorescences de certaines espèces nuisibles sont plus fréquentes depuis le début des années 2000 et certaines ont été reliées à des événements climatiques extrêmes (ex : *Pseudo-nitzschia* et la tempête Xynthia, Husson et al., 2016). D'autres espèces nuisibles répondent aux changements de température. Ainsi, le réchauffement de l'eau semble être un facteur primordial de l'initiation des blooms d'*Alexandrium* (responsable du syndrome paralytique en France, Guallar et al., 2017).

En Normandie, l'augmentation de la température des eaux de surface liée au CC engendre des risques de changement d'aire de répartition des espèces algales et donc de développement de nouvelles espèces potentiellement nuisibles, mais aussi de modifications de leur production de toxine (ex : croissance et production de toxine affectées par la température chez les diatomées toxiques *Pseudo-nitzschia* de la Baie de Seine, Thorel et al. 2014). Les dynamiques des éléments nutritifs (nitrates, silicates, phosphates) dans les eaux côtières normandes sont aussi influencées par les CC, au travers de modifications des régimes de précipitations, de vent, de la stratification de la colonne d'eau, en lien avec d'autres facteurs tels que l'eutrophisation (voir encart 1). Or les concentrations en éléments nutritifs et les équilibres entre ceux-ci sont primordiaux dans le contrôle du développement des microalgues. Ainsi les diatomées toxiques du genre *Pseudo-nitzschia* seraient favorisées par les concentrations élevées en nitrates, mais les équilibres entre nitrates, silicates et phosphates jouent un rôle dans la sélection d'espèces plus ou moins toxiques (Klein et al., 2010 ; Thorel et al., 2017). En Normandie, les conditions climatiques et hydrodynamiques influencées par le régime de vents et les marées sont aussi responsables de phénomènes d'accumulation et de dispersion du dinoflagellé toxique *Dinophysis* (Soudant et al., 1997). La hausse des températures des eaux de surface, en renforçant la stratification verticale de la colonne d'eau en conditions estivales en mer, pourrait créer des conditions moins turbulentes et plus favorables au développement des dinoflagellés, dont *Dinophysis*.

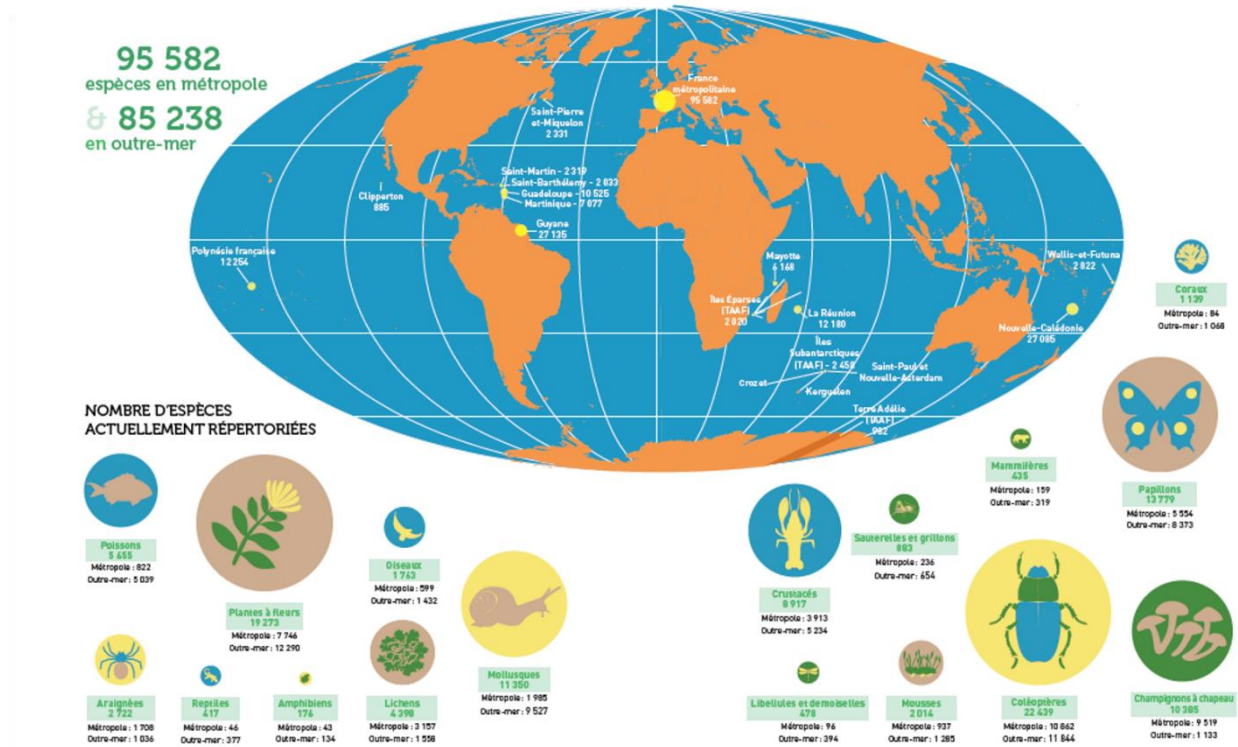
Des programmes d'observation et de suivi de la diversité du phytoplancton (réseau national PHYTOBS auquel participent le laboratoire BOREA de l'Université de Caen Normandie et le LERN-IFREMER de Port-en-Bessin), ainsi que des projets de recherche sur le contrôle environnemental du développement des efflorescences nuisibles et de leur toxicité dans les eaux côtières normandes sont en cours (Projets INCIDENCE et DAMOCLES financé par la Région Normandie, projet PHENOMEN financé par l'AESN). Ces projets ont pour objectif d'élaborer des modèles conceptuels qui pourront être à la base de futurs scénarios d'évolution des efflorescences toxiques sous l'influence du changement climatique.

Références

- Guallar Morillo, C., Bacher, C., Chapelle, A. 2017. Global and local factors driving the phenology of *Alexandrium minutum* (Halim) blooms and its toxicity. Harmful Algae 67, 44-60.
- Husson, B., Hernández-Fariñas, T., Le Gendre, R., Schapira, M. & Chapelle, A. 2016. Two decades of *Pseudo-nitzschia* spp. blooms and king scallop (*Pecten maximus*) contamination by domoic acid along the French Atlantic and English Channel coasts: Seasonal dynamics, spatial heterogeneity and interannual variability. Harmful Algae 51, 26-39.

- Klein, C., Claquin, P., Bouchart, V., Le Roy, B., Véron, B., 2010. Dynamics of *Pseudo-nitzschia* spp. and domoic acid production in a macrotidal ecosystem of the Eastern English Channel (Normandy, France). *Harmful Algae* 9, 218-226.
- Soudant, D., Beliaeff, B., Thomas, G. 1997. Explaining *Dinophysis* cf. *acuminata* abundance in Antifer (Normandy, France) using dynamic linear regression. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 156, 67-74.
- Thorel, M., Fauchot, J., Morelle, J., Raimbault, V., Le Roy, B., Miossec, C., Kientz-Bouchart, V., Claquin, P. 2014. Interactive effects of irradiance and temperature on growth and domoic acid production of the toxic diatom *Pseudo-nitzschia australis* (Bacillariophyceae). *Harmful Algae* 39, 232-241
- Thorel, M., Claquin, P., Schapira, M., Le Gendre, R., Riou, P., Goux, D., Le Roy, B., Raimbault, V., Deton-Cabanillas, A.F., Bazin, P., Kientz-Bouchart, V., Fauchot, J., 2017 Nutrient ratios influence variability in *Pseudo-nitzschia* species diversity and particulate domoic acid production in the Bay of Seine (France). *Harmful Algae* 68, 192-205.

Annexes



La biodiversité française. Source : INPN 2019 : La biodiversité en France - 100 chiffres clés expliqués sur les espèces