

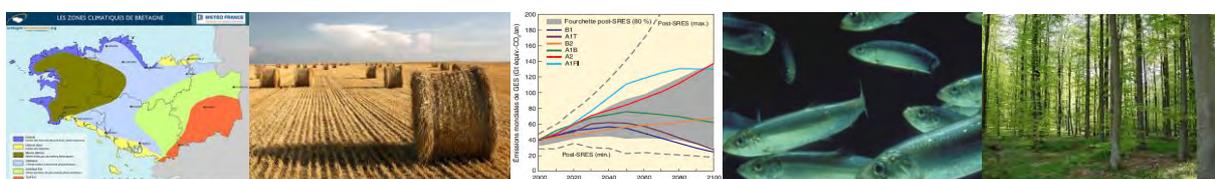
Conseil Scientifique de l'Environnement de Bretagne

Quelles sont les connaissances actuelles sur le changement climatique de l'échelle globale aux échelles régionales ?

Gaëlle ROUSSEL

Sous l'encadrement de Philippe Mérot, Hervé Quénol, Paul Tréguer et Josette Launay

- Janvier 2012 -



Avant-propos

Le Conseil Régional a proposé au Conseil Scientifique de l'Environnement de Bretagne (CSEB) de constituer, en son sein, un groupe de travail permanent sur le thème « changement climatique et adaptations des territoires » pour apporter un appui scientifique à la définition et à la mise en œuvre de ses politiques publiques.

Le groupe de travail constitué a choisi, dans une première phase, de mettre à disposition de la Région un cadre de compréhension des enjeux scientifiques soulevés et de dresser un état des connaissances en Bretagne sur ce sujet. A cet effet, un travail de recensement des ressources et d'analyse bibliographique et a été mené par Gaëlle Roussel, en tant que chargée d'étude au CSEB de juillet 2011 à janvier 2012, dont la mission précise était :

1. dresser un état des **compétences et des ressources scientifiques** à application régionale sur le sujet du changement climatique (équipes et programmes de recherche, études, publications scientifiques) ;
2. faire une synthèse sur les **constats concernant le changement climatique actuel** et sur la **régionalisation des modèles globaux de projections climatiques** ;
3. mener une analyse des **connaissances sur les impacts avérés ou potentiels** du changement climatique sur les milieux (écosystèmes littoraux et continentaux, agro-systèmes), voire sur les activités socio-économiques en Bretagne.

Le 1^{er} point fait l'objet du tome 1 du rapport d'étude, intitulé :
Recensement des programmes de recherche et des compétences scientifiques et techniques à application régionale sur le sujet du changement climatique.

Les points 2 et 3 sont rassemblés dans le tome 2 du rapport d'étude, intitulé :
Quelles sont les connaissances actuelles sur le changement climatique de l'échelle globale aux échelles régionales ?

Remerciements

Remerciements pour leur encadrement, collaboration et relecture :

Josette Launay (CSEB), Olivier Le Pape (UMR ESE / Agrocampus-INRA, Rennes), Philippe Mérot (UMR SAS / Agrocampus-INRA, Rennes), Hervé Quéno (UMR LETG / CNRS-Université de Rennes 2), Paul Tréguer (IUEM, UBO Brest) et Frédérique Viard (UMR Adaptation et Diversité en Milieu Marin / CNRS-UPMC, Station biologique de Roscoff).

Remerciements pour leur contribution et/ou les informations fournies :

L'équipe du COSTEL (UMR LETG / CNRS-Université de Rennes 2), Franck Baraer (Météo France, Rennes), Vincent Donato (SHOM, Brest), les gestionnaires du réseau SOMLIT et Michel Colombet (CRPF Bretagne).

SOMMAIRE

1^{ERE} PARTIE : L'EVOLUTION DU CLIMAT

1	Chapitre 1. L'évolution du climat actuelle et passée.....	1
	1.1. Introduction : de la variabilité naturelle du climat au changement climatique.....	1
	1.2. Que sait-on de l'évolution des indicateurs climatiques généraux en France et en Bretagne ?	5
2	Chapitre 2. Les projections climatiques	11
	2.1. Quel sera le climat futur dans le Nord Ouest ?	12
	2.2. La modélisation climatique et ses incertitudes	15
3	Chapitre 3. L'évolution des événements climatiques extrêmes.....	28
	3.1. Les extrêmes de températures : risque de vagues de chaleur ou de froid	29
	3.2. Les extrêmes de précipitations : risque de périodes sèches et d'inondations	30
	3.3. Les extrêmes de vents : risque de tempêtes.....	33
	3.4. Conclusion concernant les événements extrêmes.....	35
	3.5. Les perspectives de recherche sur les événements extrêmes	35

2^{EME} PARTIE : LES EFFETS ET IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

4	Chapitre 4. Les effets du changement climatique sur les sols et l'eau.....	39
	4.1. Les sols.....	40
	4.2. L'eau	50
5	Chapitre 5. Les impacts du changement climatique sur l'agriculture et la forêt.....	59
	5.1. L'effet rétroactif de l'augmentation en CO ₂ atmosphérique	60
	5.2. Les impacts du changement climatique sur les grandes cultures végétales en Bretagne	60
	5.3. Les impacts du changement climatique sur les vignes.....	73
	5.4. Les impacts du changement climatique sur les forêts à l'échelle nationale	79
6	Chapitre 6. Les effets et impacts du changement climatique sur le milieu marin et côtier.....	105
	6.1. L'évolution physique et chimique du milieu marin	107
	6.2. Les effets du changement climatique sur l'évolution des côtes : étude du risque d'érosion et de submersion en Bretagne	126
	6.3. Les impacts du changement climatique et des événements climatiques extrêmes sur la biodiversité marine et côtière	137
	6.4. Conclusion concernant les impacts du changement climatique et de l' « acidification » des océans sur la biodiversité marine et côtière	168

1^{ERE} PARTIE : L'EVOLUTION DU CLIMAT

En préambule à cette première partie, il nous paraît important de préciser quelques notions générales sur le climat :

La **notion de climat** est assez difficile à définir et il faut faire une distinction entre météorologie et climatologie, autrement dit entre le temps et le climat. Selon le GIEC (2007), le climat est une description statistique en termes de moyenne et de variabilité des variables météorologiques, sur une longue période (souvent une trentaine d'années), alors que le temps renvoie aux conditions météorologiques d'une seule journée. Le climat peut être défini en différents types (océanique, tempéré, etc.) en fonction des paramètres climatiques tels que la température, les précipitations, l'insolation, le vent, etc., auxquels peuvent s'ajouter les phénomènes extrêmes (tempêtes), la nature du sol, l'humidité, etc. (Ribes, 2009 ; Bretagne Environnement¹).

Le **système climatique** terrestre résulte d'un apport d'énergie par le soleil et des interactions entre l'atmosphère, l'hydrosphère (océans et autres plans d'eau), la cryosphère (neige et glace), la surface terrestre et la biosphère (êtres vivants). L'atmosphère et l'océan sont les principaux éléments du système climatique qui conditionnent le climat.

Le système climatique évolue avec le temps sous l'effet de sa propre dynamique interne et en raison de forçages externes. Ces forçages externes comprennent des phénomènes naturels tels que les éruptions volcaniques et l'activité solaire, ainsi que des forçages anthropiques tels que les émissions de gaz à effet de serre (GES). De plus, les systèmes climatiques comprennent de nombreux mécanismes de rétroaction capables d'amplifier ou d'atténuer les effets d'une variation dans le forçage climatique (voir chapitre 2.2.4 ; Ribes, 2009 ; Trenberth *et al.*, 2007).

Nota bene : Tous les résultats et informations spécifiques concernant la Bretagne sont en gras soulignés dans le texte.

¹ <http://www.bretagne-environnement.org/Air-et-climat/Le-climat-breton/De-la-variabilite-naturelle-du-climat-au-changement-climatique>

Chapitre 1. L'évolution du climat actuelle et passée

1.1. Introduction : de la variabilité naturelle du climat au changement climatique	1
1.1.1. Le phénomène de changement climatique.....	1
1.1.2. Le réchauffement global observé peut-il être attribué aux activités humaines ?.....	3
1.1.3. Quelle est l'importance de ces changements à long terme ?	4
1.1.4. Conclusion concernant le changement climatique global.....	5
1.2. Que sait-on de l'évolution des indicateurs climatiques généraux en France et en Bretagne ?.....	5
1.2.1. Le rôle de la circulation atmosphérique et océanique	5
1.2.2. L'évolution des températures de l'air	6
1.2.3. L'évolution des précipitations	7
1.2.4. L'importance de la durée des séries d'observation	9
1.2.5. Conclusion concernant le changement climatique observé en Bretagne	10

1.1. Introduction : de la variabilité naturelle du climat au changement climatique

Dans cette étude, la **variabilité naturelle du climat** correspond aux changements naturels du climat, à des échelles de temps annuelles et décennales (températures, précipitations, etc.), allant jusqu'au millénaire et au million d'années (modifications de l'orbite terrestre, activité solaire, éruptions volcaniques). Cette variabilité du climat correspond au fait que l'on peut observer des années plus ou moins chaudes ou sèches. Par exemple, en Bretagne, la variabilité interannuelle des précipitations est moins forte qu'elle ne l'est dans les régions méditerranéennes (Dubreuil et Planchon, 2008). Le **changement climatique** désigne des changements à long terme des valeurs moyennes, accentués par les activités humaines (GIEC, 2007).

1.1.1. Le phénomène de changement climatique

Depuis le début de l'ère industrielle, l'Homme contribue activement au changement climatique, notamment en accentuant l'effet de serre. Le changement climatique résulte essentiellement des variations de la concentration des GES dans l'atmosphère, mais aussi des modifications des petites particules (aérosols) et des changements dans l'usage des sols (agriculture, forêt, urbanisation, irrigation, etc. ; Trenberth *et al.*, 2007).

➤ Le renforcement anthropique de l'effet de serre

L'effet de serre est un phénomène naturel, dû à la présence de GES contenus dans l'atmosphère. Le soleil détermine le climat de la Terre en émettant de l'énergie. Un tiers de cette énergie atteint les couches supérieures de l'atmosphère et est directement renvoyé vers l'espace. Les deux tiers restants sont absorbés par la surface et par l'atmosphère. Une partie est réémise par la Terre sous forme de rayonnement thermique (infrarouge) qui est alors absorbé par l'atmosphère, puis réfléchi de nouveau vers la Terre (Fig. 1).

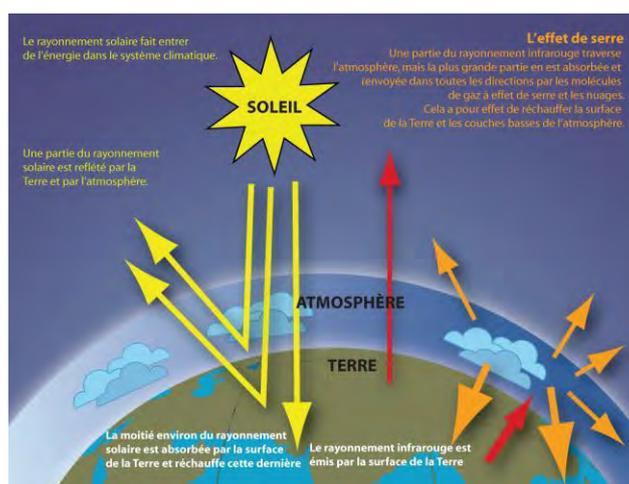


Figure 1 : Représentation de l'effet de serre naturel (Trenberth *et al.*, 2007).

Les principaux GES contribuant à l'effet de serre sont la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), l'oxyde nitreux (N₂O), l'ozone et quelques autres gaz présents dans l'atmosphère en faibles quantités. Ils retiennent une large part de l'énergie renvoyée vers l'espace par la Terre, sous forme de rayons infrarouges, ce qui réchauffe la surface de la planète et maintient ainsi la température sur Terre à une moyenne d'environ 14°C. Une hypothèse non vérifiée avance

que sans l'effet de serre naturel, la température moyenne sur Terre serait de l'ordre de -19°C (Trenberth *et al.*, 2007 ; Ribes, 2009).

On observe des évolutions des concentrations de GES dans le temps, mais à partir de l'époque industrielle leur taux d'accroissement a très probablement été sans précédent depuis plus de 10 000 ans (Fig. 2) (GIEC, 2007). Les activités humaines, en particulier l'utilisation de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz, etc.), la déforestation et les pratiques agricoles telles que l'élevage intensif, ont fortement contribué à accroître les concentrations en GES, intensifiant l'effet de serre naturel et provoquant le réchauffement de la planète (Trenberth *et al.*, 2007).

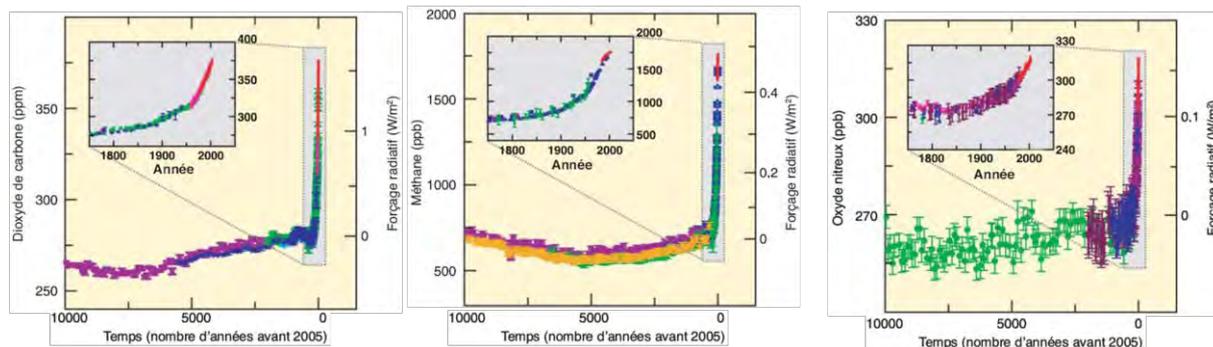


Figure 2 : Evolution des GES depuis 10 000 ans, pour le dioxyde de carbone (CO_2 , gauche), le méthane (CH_4 , milieu) et l'oxyde nitreux (N_2O , droite). (GIEC, 2007).

➤ Le réchauffement observé de la planète

Selon le GIEC (2007), la température moyenne de l'air, à l'échelle mondiale, a augmenté de 0.74°C entre 1906 et 2005 (entre $0,56^{\circ}\text{C}$ et $0,92^{\circ}\text{C}$ avec les marges d'incertitudes ; Fig. 3). De plus, parmi les douze dernières années (1995–2006), onze années figurent parmi les plus chaudes depuis 1850 (début des relevés instrumentaux de la température à la surface du globe). L'augmentation des températures a été plus importante dans les hautes latitudes et l'hémisphère Nord, les terres émergées se sont réchauffées plus rapidement que les océans.

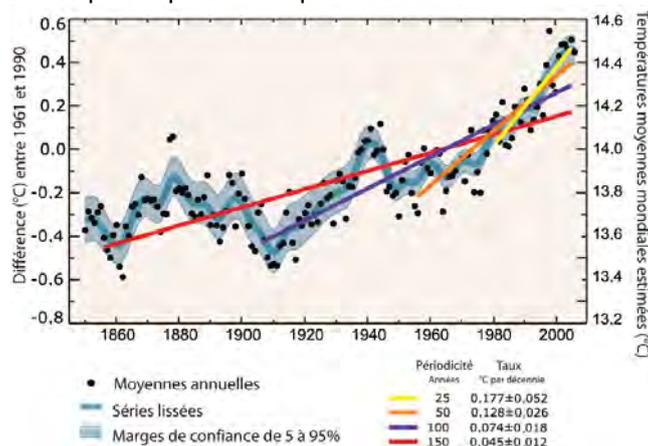


Figure 3 : Moyenne annuelle mondiale des températures relevées (points noirs) avec ajustements simples par rapport aux données. L'axe vertical de gauche indique les anomalies par rapport aux moyennes des années 1961-1990, l'axe vertical de droite indique la température réelle estimée (en $^{\circ}\text{C}$). Les ajustements des tendances linéaires indiquent les 25 (en jaune), 50 (en orange), 100 (en violet) et 150 (en rouge) dernières années, et correspondent aux périodes 1981-2005, 1956-2005, 1906-2005 et 1856-2005, respectivement (Trenberth *et al.*, 2007).

1.1.2. Le réchauffement global observé peut-il être attribué aux activités humaines² ?

Afin d'attribuer les changements climatiques aux activités humaines, il faut pouvoir représenter la variabilité interne du système climatique et son influence sur le climat. Les modèles incluant les effets de l'augmentation de GES ainsi que les facteurs naturels externes simulent correctement le réchauffement observé au siècle passé (Fig. 4). Les modèles n'arrivant pas à reproduire le réchauffement observé à partir des seuls facteurs naturels, les conclusions du GIEC (2007) ont donc été :

- depuis le milieu du 20^{ème} siècle, l'essentiel de l'élévation des températures moyennes globales est très probablement attribuable à la hausse des concentrations de GES anthropiques ;
- il est aussi probable que tous les continents, à l'exception de l'Antarctique, aient subi un réchauffement anthropique marqué depuis cinquante ans.

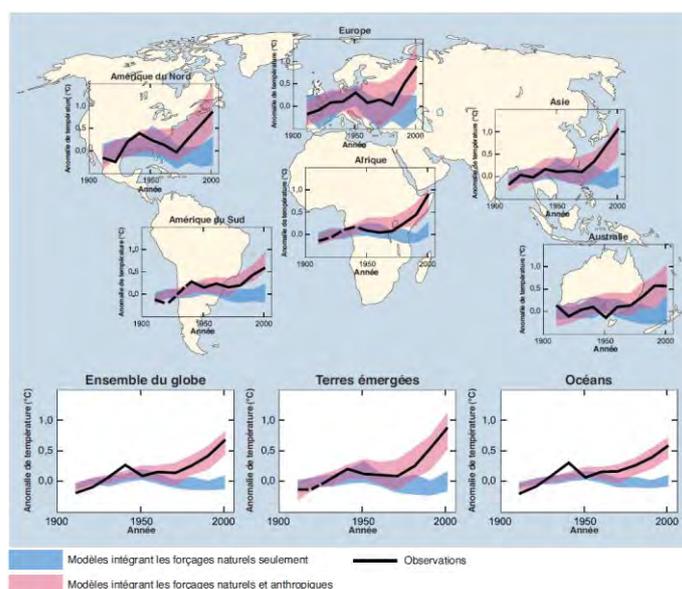


Figure 4 : Variation des températures à l'échelle du globe et des continents (GIEC, 2007).

De plus, les variations du climat observées ces dernières décennies n'ont pas été identifiées comme imputables aux forçages externes naturels seuls. Durant cette période, le forçage externe produit par l'activité volcanique aurait probablement dû refroidir le climat, et non pas le réchauffer (GIEC, 2007). L'énergie solaire a suivi son cycle naturel de 11 ans, sans augmentation nette. Il est donc extrêmement peu probable que l'influence solaire ait été un moteur important du réchauffement global depuis plusieurs décennies (Fig. 5 ; NCDC, NOAA).

² Pour plus d'informations : <http://www.ncdc.noaa.gov/faqs/climfaq15.html>

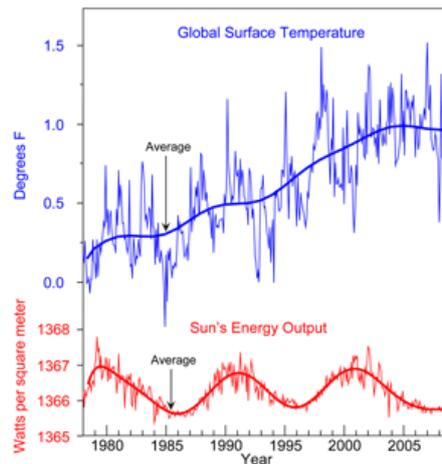


Figure 5 : Température de surface globale (bleu) et énergie du Soleil reçue dans l'atmosphère terrestre (rouge). L'énergie solaire a été mesurée par les satellites depuis 1978 (NCDC, NOAA).

1.1.3. Quelle est l'importance de ces changements à long terme ?

La durée de vie des GES peut varier de quelques années à quelques millénaires et peut se mesurer en fonction du temps de rémanence d'un gaz dans l'atmosphère. Les concentrations de certains GES peuvent disparaître immédiatement dès que leur émission diminue, mais d'autres peuvent continuer d'augmenter pendant des siècles, même si leurs émissions ont été réduites. Par exemple, du fait de la lenteur du processus d'absorption, le CO₂ atmosphérique continuera d'augmenter sur le long terme, même si son émission devait s'abaisser au-dessous des seuils actuels. Ce n'est que dans le cas d'un arrêt quasi complet des émissions que la concentration atmosphérique en CO₂ serait finalement stabilisée à un niveau constant (GIEC, 2001 ; GIEC, 2007).

Ceci implique que ce que l'on émet aujourd'hui aura un impact retardé et sera perceptible dans plusieurs dizaines d'années, c'est ce qui est appelé l'inertie du système climatique (Fig. 6).

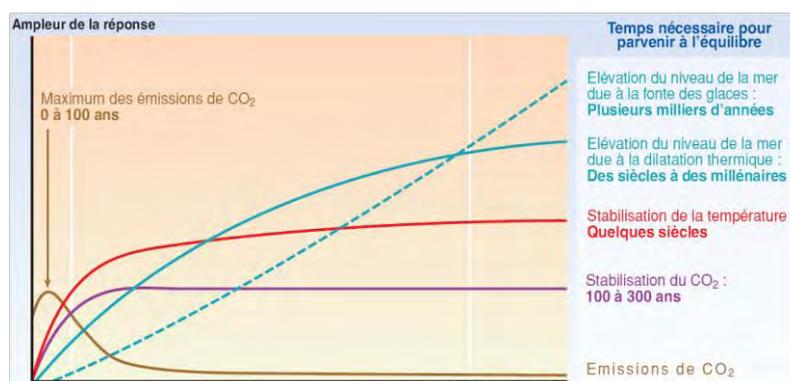


Figure 6 : Inertie du système climatique, symbolisée par l'évolution du niveau de la mer, de la température et des concentrations de CO₂, face à une réduction radicale des émissions de CO₂ (GIEC, 2001).

Après stabilisation de la concentration atmosphérique de CO₂ et d'autres GES, la température de l'air et le niveau de la mer devraient continuer d'augmenter pendant des centaines d'années. De plus, certains effets du changement climatiques peuvent être irréversibles (fonte importante des inlandsis, modification fondamentale de la circulation océanique) si le rythme et l'ampleur des changements climatiques ne sont pas limités avant le dépassement de seuils encore mal connus (GIEC, 2001).

1.1.4. Conclusion concernant le changement climatique global

A l'échelle de la Terre, l'homme a donc radicalement modifié la composition chimique de l'atmosphère, ce qui a eu des conséquences considérables sur le climat. Ce réchauffement climatique et ses effets n'ont pas été sans conséquences sur les écosystèmes, les populations et les activités humaines.

La difficulté dans la prise en compte du changement climatique et de ses nombreux impacts sur notre société, est qu'il ne faudra pas juste faire face à un nouveau climat, mais faire face à un climat perpétuellement en changement. C'est pourquoi, il est important d'étudier les effets de ce phénomène global à des échelles plus régionales / locales afin d'anticiper si possible les adaptations à mettre en œuvre.

1.2. Que sait-on de l'évolution des indicateurs climatiques généraux en France et en Bretagne ?

Le réchauffement du système climatique est aujourd'hui une réalité qui ressort des observations de l'augmentation des températures moyennes mondiales de l'atmosphère et de l'océan, de la fonte généralisée des neiges et des glaces et de l'élévation du niveau moyen mondial de la mer (GIEC, 2007). Dans ce contexte, la connaissance de la variabilité du climat passé est un élément qui peut permettre de comprendre les changements de climat actuels et évaluer les changements futurs.

1.2.1. Le rôle de la circulation atmosphérique et océanique

La variabilité du climat européen dépend largement des interactions entre l'atmosphère et l'océan. L'atmosphère déclenche des phénomènes dans l'océan par l'action du vent, des précipitations, du rayonnement solaire et l'océan répond en réchauffant ou refroidissant l'atmosphère par l'effet conjugué des températures et des courants océaniques. Des études ont déjà mis en lien la variabilité du climat de l'Europe de l'Ouest avec deux oscillations étudiées depuis longtemps : l'Oscillation Nord-Atlantique (en anglais, NAO : *North Atlantic Oscillation*) et l'oscillation Atlantique multi-décennale (en anglais, AMO : *Atlantic Multidecadal Oscillation*).

La NAO est un phénomène atmosphérique et océanique pluriannuel, qui concerne principalement l'Atlantique Nord. Elle se mesure généralement comme la différence de pression atmosphérique entre l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande, et entraîne :

- des changements de la pression au sol ;
- des variations des vents d'Ouest moyens ;
- des influences sur le climat (températures, précipitations) tout autour du bassin atlantique, et tout particulièrement sur l'Europe.

L'AMO est une variation multi-décennale, de 40 à 80 ans, observée dans le nord de l'océan Atlantique, qui peut entraîner des variations de température de surface de la mer de l'ordre de 4°C (Dieppois *et al.*, 2011). Elle semble aussi reliée à la variation de la pluviométrie et des températures de l'air sur de longues périodes dans l'hémisphère Nord, en particulier en Europe.

D'autres formations anticycloniques centrées sur la Sibérie ou sur des latitudes plus méridionales peuvent aussi impacter le climat local (Tréguer *et al.*, 2009).

Des travaux en cours (cf. O. Planchon, laboratoire COSTEL) utilisent la notion de « types de temps » pour caractériser la variabilité climatique à l'échelle régionale. Cette notion est basée d'une

part sur la classification des différents types de temps et types de circulation existants : (i) le « type de temps » (ex. temps chaud et humide, etc.) correspondant à l'ensemble des variables décrivant l'état de l'atmosphère (pluviométrie, températures, etc.) pour un endroit et une période donnée, (ii) le « type de circulation » (ex : circulation anticyclonique, etc.) correspondant à l'ensemble des caractères du champ de circulation et de pression, pour un endroit et une période donnée ; d'autre part sur la confrontation entre ces deux classifications afin d'établir le lien entre tel type de situation atmosphérique et tel type de climat (Durand-Dastès, 2004). Ce type d'étude permettrait *in fine* de projeter quelles seront les types de circulations atmosphériques au 21^{ème} siècle, afin de savoir comment elles pourraient influencer le climat futur. Par exemple, il serait possible de caractériser le lien entre la fréquence d'épisodes secs et les situations synoptiques³ observées, afin de mieux comprendre la variabilité interannuelle des sécheresses (Dubreuil et Planchon, 2009). Pour l'instant, ce type d'étude est au stade exploratoire, un « type de circulation » n'étant pas toujours corrélé à un « type de temps ».

1.2.2. L'évolution des températures de l'air

➤ A l'échelle nationale

Pour la France, au 20^{ème} siècle, la variation des températures montre un réchauffement plus important que le réchauffement global. La température moyenne annuelle a augmenté de 0,1°C par décennie depuis le début du 20^{ème} siècle (Fig. 7). Le réchauffement s'est accéléré pour atteindre 0,6°C par décennie sur la période 1976-2003 (Dandin, 2006). Par ailleurs, Ribes (2009), en utilisant des méthodes de détection statistique, a montré que l'anomalie des températures moyennes annuelles observées en France était principalement liée aux forçages anthropiques.

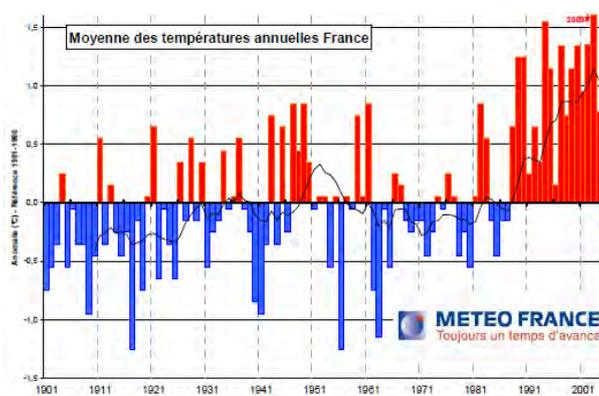


Figure 7 : Evolution de l'anomalie de température annuelle moyenne en France au 20^{ème} siècle, par rapport à la normale 1961-1990 (Dandin, 2006).

➤ A l'échelle régionale

Les données fournies par Météo France montrent que l'évolution des températures en Bretagne suit l'évolution des températures au niveau national. La température moyenne observée pendant les dix années de la période 1997-2006 a été plus élevée que celle observée pendant les trente années de la période 1971-2000 (Fig. 8 ; Tréguer *et al.*, 2009). En Bretagne, les 10 années les plus chaudes depuis 1946 sont toutes postérieures à 1989 (Dubreuil et Planchon, 2008).

³ A une échelle globale. En météorologie, le terme "synoptique" qualifie plus particulièrement les phénomènes atmosphériques dont l'ordre de grandeur est de quelques milliers de kilomètres pour les dimensions horizontales, de quelques kilomètres pour la dimension verticale et de quelques jours pour la durée.

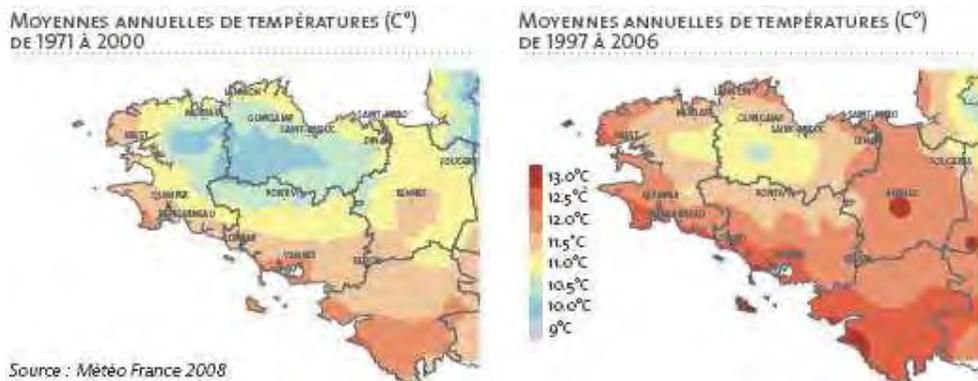


Figure 8 : Températures moyennes annuelles pour les périodes de 1971-2000 et 1997-2006. (données Météo France, dans Tréguer *et al.*, 2009).

➤ A l'échelle plus locale

L'évolution des températures à Rennes et Brest, entre 1946 et 2006, montre l'alternance d'années plus ou moins chaudes ou froides, illustrant la variabilité du climat breton (Fig. 9). On observe cependant, l'effet du changement climatique, avec une augmentation de l'ordre de 1°C sur un demi-siècle. On remarque aussi un effet urbain plus prononcé à Rennes, la courbe des minima semblant rejoindre celle de Brest, alors que les courbes des maxima restent parallèles (Dubreuil et Planchon, 2008).

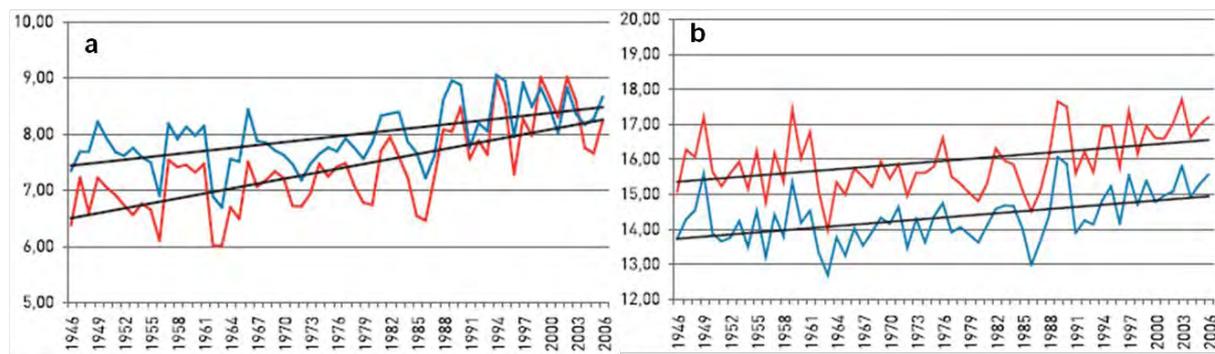


Figure 9 : Evolution des températures moyennes minimales (a) et maximales (b) à Rennes (en rouge) et Brest (en bleu) de 1946 à 2007 ; courbe de tendance en noir (données Météo France, dans Dubreuil et Planchon, 2008).

1.2.3. L'évolution des précipitations

L'augmentation de la température moyenne globale accroît l'évaporation de l'eau, à certaines latitudes, humidifiant l'air au lieu de le chauffer. Cette évolution modifie le régime des précipitations dans de nombreuses régions et l'une des conséquences visibles est que les étés ont souvent tendance à être soit chauds et secs, soit frais et humides. Au cours de la période 1900-2005, les précipitations ont généralement augmenté sur le nord de l'Europe et diminué dans les zones méditerranéennes. Les observations concernant les précipitations sont plus hétérogènes, dû à leur variabilité naturelle généralement forte. El Niño, ainsi que les modifications de la circulation atmosphérique, telle l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO), ont une influence considérable sur les précipitations (GIEC, 2007).

La variabilité des précipitations à l'échelle globale ne peut s'expliquer uniquement par la variabilité intrinsèque, mais aucun résultat ne permet de conclure catégoriquement à un impact anthropique sur les précipitations au siècle passé. Toutefois, en comparant les changements observés des précipitations continentales aux résultats de 14 modèles climatiques, une étude a pu

démontrer une influence anthropique (i) dans l'augmentation des précipitations aux moyennes latitudes de l'hémisphère Nord, (ii) dans la diminution des précipitations aux subtropiques et tropiques de l'hémisphère Nord et (iii) dans l'augmentation des pluies aux subtropiques et tropiques de l'hémisphère Sud ; ces changements étant incompatibles avec la variabilité naturelle (source : Zhang *et al.*, 2007 cités dans Boé, 2007)

➤ A l'échelle nationale

Les tendances concernant les précipitations au niveau national sont moins significatives que celles concernant les températures, car l'étude sur les données de précipitations est plus délicate, du fait de la forte variabilité spatio-temporelle du paramètre et des difficultés de mesure. Au niveau national, sur la période 1900-2001, on ne distingue pas de tendance significative sur la moyenne des précipitations, mais plutôt des changements portant essentiellement sur la distribution spatiale (Fig. 10 ; Dandin, 2006).

De façon générale, on observe une tendance à l'augmentation du volume des précipitations, mais également une accentuation des contrastes saisonniers et régionaux. Dans le nord de la France, les précipitations ont augmenté en hiver et diminué en été, alors que dans les régions méditerranéennes, on observe des baisses de précipitations plus marquées en été (Dandin, 2006). Par ailleurs Ribes (2009), en utilisant des méthodes de détection statistique, suggère une influence des forçages anthropiques sur les changements de précipitations en hiver sur la France.

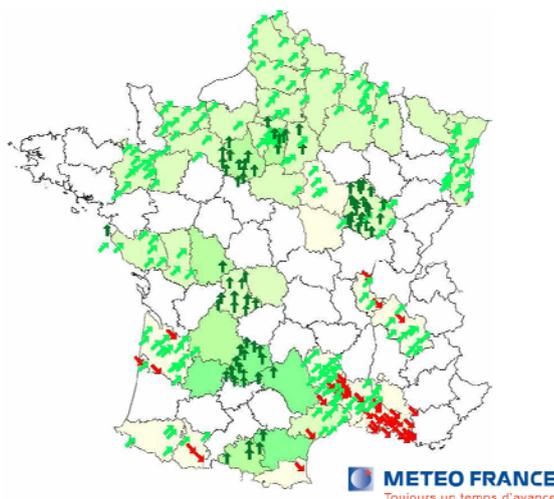


Figure 10 : Evolution du cumul annuel de précipitation en France au cours de la période 1901-2000. Chaque flèche représente une série de mesure. Les baisses sont en rouge, les hausses en vert. Les évolutions les plus significatives sont représentées par une flèche verticale. La carte montre également les départements pour lesquels il n'existe pas encore de diagnostics concernant l'évolution des précipitations sur une longue période (données Météo France, dans Dandin, 2006).

➤ A l'échelle plus locale

L'indicateur "précipitations annuelles" ne permet pas d'apprécier l'évolution des précipitations car il lisse la variabilité intra-annuelle. D'après une étude de Météo France, la pluie cumulée sur une année à Rennes ne montre pas d'évolution sur les 50 dernières années (Fig. 11).

Par ailleurs, les données moyennes pour la période hivernale (octobre-mars) et pour la période estivale (avril-septembre) ne montrent pas non plus de réelle tendance, mis à part une plus forte variabilité (Fig. 11).

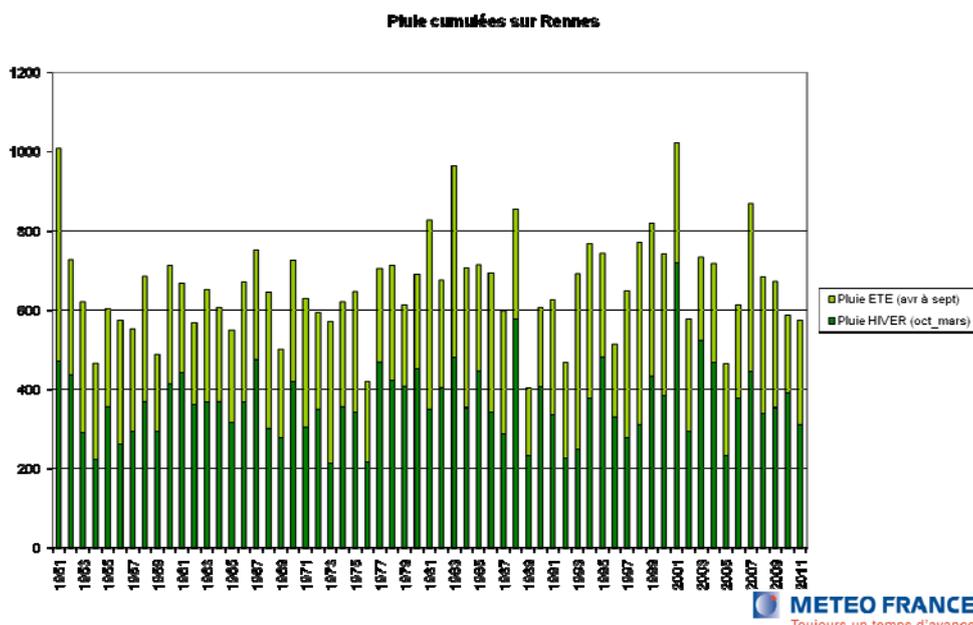


Figure 11 : Evolution de la pluie à Rennes de 1961 à 2011, pour les précipitations moyennes en été (avril-septembre, vert clair) et en hiver (octobre-mars, vert foncé) (données Météo France ; F. Baraer, com. pers.).

Toutefois, dans une analyse mensuelle des régimes pluviométriques moyens sur 60 ans (1946-2006) pour la station de Rennes, Dubreuil et al. note une augmentation sensible de la pluviométrie pour le mois de janvier et un affaiblissement de la pluviométrie en août (Dubreuil *et al.*, 1996b ; Dubreuil *et al.*, 1998 ; Dubreuil et Planchon, 2009). Cependant, il ne faut pas oublier l'hétérogénéité du climat breton et que cet exemple ne concerne que la ville de Rennes. **L'analyse saisonnière des précipitations serait à affiner sur différentes stations de Bretagne et du grand Ouest pour préciser les tendances de ces dernières décennies.**

Les études en cours par « types de temps » permettraient aussi d'avoir plus d'information sur la variabilité et l'évolution des précipitations (cf. O. Planchon, laboratoire COSTEL). Il faut rappeler que la période pendant laquelle la pluie tombe a des conséquences importantes, les pluies d'hiver rechargeant les sols et les nappes (recharge hydrologique) ; les pluies d'été rechargeant la réserve des sols et s'évapotranspirant (réserve en eau agronomique).

1.2.4. L'importance de la durée des séries d'observation

Vouloir observer le changement climatique et faire la part entre les variations liées à la variabilité naturelle et celles liées au changement climatique, suppose au préalable de disposer de séries d'observations standardisées, contrôlées et fiables sur une longue période (au minimum de l'ordre du demi-siècle). La période instrumentale de référence commence ainsi généralement dans le courant du 19^{ème} siècle lorsque les différents services nationaux de météorologie ont été créés, souvent pour des raisons militaires et stratégiques. La France, de ce point de vue, dispose d'assez peu de très longues séries d'observations comme c'est le cas pour l'Angleterre (Kew Gardens depuis 1697) ou l'Allemagne (Berlin depuis 1701) (Dubreuil et Planchon, 2008).

En plus du problème de la longueur et de la continuité des observations, une autre difficulté concerne la qualité des séries d'observation et plus précisément leur homogénéité. Au cours du temps, les instruments utilisés pour l'observation ont évolué, de même que les protocoles préconisés. Les sites d'observation ont été souvent déplacés, et même lorsque ce n'est pas le cas, l'environnement immédiat du site de mesure a souvent évolué (modification de la végétation,

urbanisation, etc.) influençant directement la mesure. Ces défauts pouvant se traduire, pour les températures par exemple, par quelques degrés de décalage entre différentes périodes, qui pourraient être injustement attribués aux changements climatiques.

1.2.5. Conclusion concernant le changement climatique observé en Bretagne

Le changement climatique en Bretagne est surtout marqué pour les températures, qui tendent à augmenter, dans le même sens que les observations à l'échelle nationale et globale. Concernant les précipitations, les tendances ne sont pas significatives. Toutefois, les incertitudes n'empêchent pas de pouvoir envisager l'évolution probable de ces indicateurs par la réalisation de projections climatiques.

Chapitre 2. Les projections climatiques

2.1. Quel sera le climat futur dans le Nord Ouest ?.....	12
2.1.1. Les températures	12
2.1.2. Les précipitations	13
2.1.3. Conclusion sur les projections climatiques dans le Nord Ouest.....	14
2.2. La modélisation climatique et ses incertitudes	15
2.2.1. Les scénarios socio-économiques du GIEC.....	15
2.2.2. Les modèles climatiques globaux	17
2.2.3. Comment passer du climat global au climat régional ?	19
2.2.4. Les incertitudes liées aux projections climatiques	22
2.2.5. Les perspectives d'études sur la modélisation climatique	26
2.2.6. Conclusion concernant la modélisation climatique	26

2.1. Quel sera le climat futur dans le Nord Ouest ?

Pour le moment, il n'existe pas de projections concernant l'évolution future du climat à une échelle fine centrée sur la Bretagne, nous présentons donc les projections climatiques réalisées par Météo France à l'échelle du Grand Ouest, pour les températures et les précipitations.

Les valeurs moyennes (écart entre la valeur de référence et l'horizon choisi) présentées proviennent du rapport Jouzel (2011) et les illustrations d'une étude réalisée par Météo France dans le cadre du SRCAE (F. Baraer, com. pers.). Les simulations des climats futurs se basent sur 3 scénarios d'émission : A2, A1B et B1, pour 3 périodes représentatives du début (horizon 2030), du milieu (horizon 2050) et de la fin du 21^{ème} siècle (horizon 2080).

Toutefois, il faut faire attention à la lecture de ces projections car il n'est pas possible d'utiliser les cartes présentées en extrayant un résultat de manière isolée sur un point géographique donné, car cela apporterait encore plus d'incertitudes (voir chapitre 2.2.4). Il faut considérer ces résultats en termes de tendances d'évolution du climat sur un ensemble de points de grille. En effet, le recours au modèle ARPEGE seul qui représente 8-9 stations en Bretagne, ne permettrait pas aujourd'hui, de prendre en compte la diversité du climat de la Bretagne, par exemple le microclimat du golfe du Morbihan (Fig. 13).

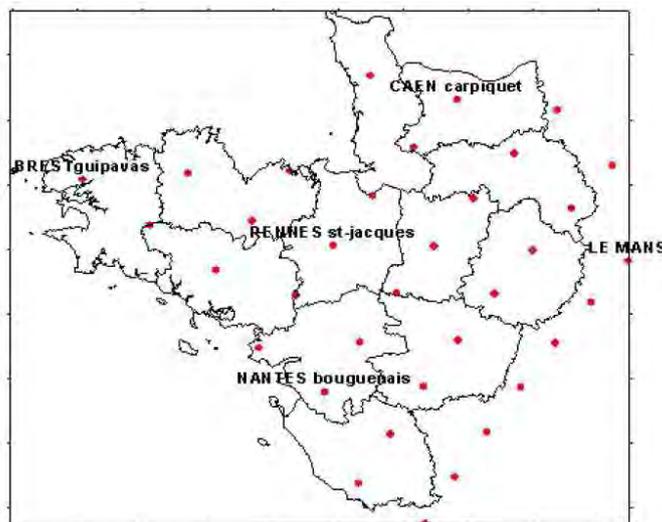


Figure 13 : Couverture du Grand Ouest par le modèle ARPEGE (en Bretagne : 8-9 points) (CESR de Bretagne, 2009).

Des projections pour d'autres indices climatiques, réalisées par Météo France et l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) selon les scénarios A2 et B2, peuvent être obtenues dans le rapport Jouzel (2011) pour la France métropolitaine et pour 5 grandes régions (en moyenne annuelle et en moyenne saisonnière).

2.1.1. Les températures

Suivant le scénario A2 et le modèle ARPEGE-Climat, la température moyenne quotidienne en moyenne annuelle (écart entre les scénarios et la référence : 1990), dans le nord-ouest de la France augmenterait par rapport à 1990. On donne l'intervalle d'incertitude pour la valeur moyenne entre crochets, ainsi que les valeurs extrêmes entre parenthèses. Ces valeurs moyennes sont les suivantes (Jouzel, 2011) :

- + 0.4°C [1.1] (-0.1/-1.8) en 2030 ;
- + 0.9°C [1.7] (-0,1/2,3) en 2050 ;
- + 2.5°C [3.5] (1,8/4,9) en 2090.

Le réchauffement est semblable pour le scénario A1B aux 3 horizons. Il est toutefois inférieur pour le scénario B1 en 2050 et 2090 (Fig. 14). La faible différence entre les horizons 2030 et 2050 souligne l'importance à ces échéances de l'impact de la variabilité climatique naturelle qui masque pour partie la tendance lente au réchauffement d'origine anthropique.

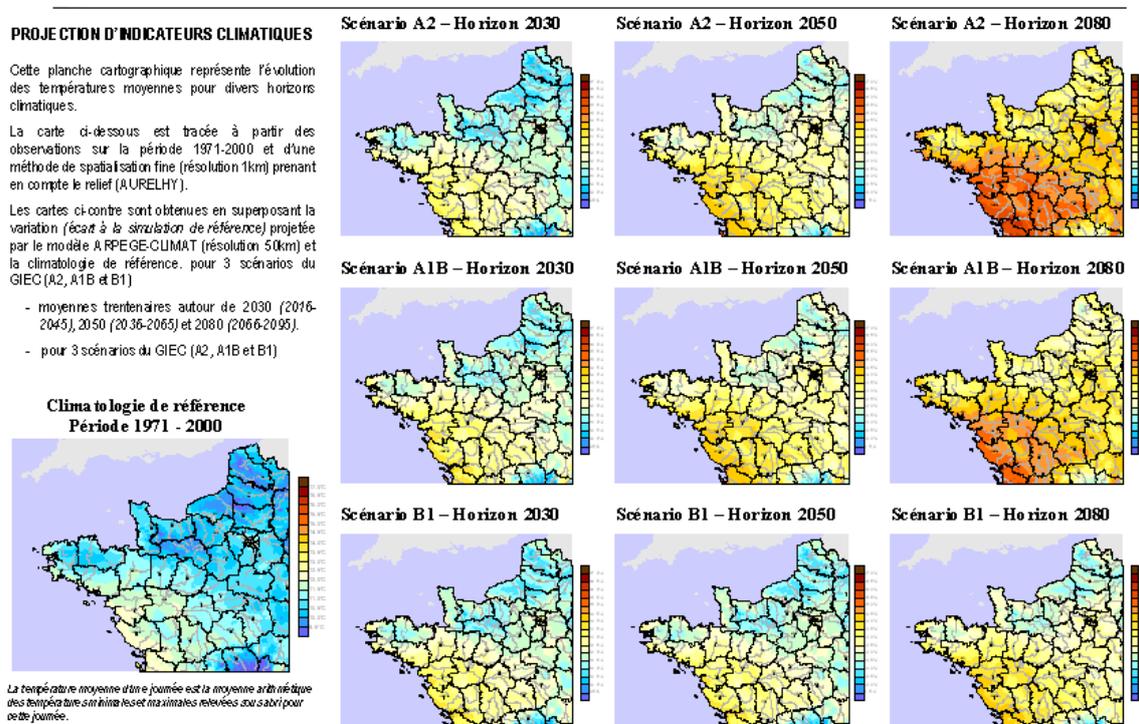


Figure 14 : Projections des températures moyennes sur le Nord Ouest pour 3 horizons différents (2030, 2050, 2080) et 3 scénarios du GIEC (A2, A1B, B1) (données Météo France, étude 2010 pour Datar ; F. Baraer, com. pers.).

A l'échelle saisonnière, on observe une forte variabilité, l'augmentation des températures étant beaucoup plus importante en été dans le Nord Ouest à l'horizon 2090. On donne l'intervalle d'incertitude pour la valeur moyenne entre crochets, ainsi que les valeurs extrêmes entre parenthèses. Ces valeurs moyennes quotidiennes par saison (écart entre les scénarios et la référence : 1990) sont les suivantes (Jouzel, 2011) :

Températures (°C)	en 2030	en 2050	en 2090
en hiver	0°C [1,4] (-1,1/2,1)	-0,1°C [1,4] (-1,3/2,5)	1,8°C [3,4] (0,8/4,8)
au printemps	-0,1°C [1,1] (-1,0/2,5)	0,3°C [1,6] (-1,5/3,0)	1,5°C [2,9] (0,5/5,2)
en été	0,1°C [1,5] (-1,4/2,3)	1,0 [2,6] (-0,3/3,9)	3,5°C [5,4] (1,3/7,6)
en automne	0,4°C [1,6] (-0,9/2,7)	1,0 [2,3] (-0,5/3,1)	2,2°C [3,5] (1,6/4,5)

2.1.2. Les précipitations

Suivant le scénario A2 et le modèle ARPEGE-Climat, les précipitations moyennes quotidiennes par saison (écart entre les scénarios et la référence : 1990), dans le nord-ouest de la France ont été projetées. On donne l'intervalle d'incertitude pour la valeur moyenne entre crochets, ainsi que les valeurs extrêmes entre parenthèses. Ces valeurs moyennes sont les suivantes (Jouzel, 2011) :

Précipitations (mm/jour)	en 2030	en 2050	en 2090
en hiver	-0,3 [0,4] (-1,2/1,2)	-0,5 [0,2] (-0,9/1,3)	-0,5 [0,4] (-1,7/1,1)
au printemps	-0,3 [0,6] (-0,8/1,6)	-0,7 [0,1] (-1,1/0,3)	-0,8 [0,0] (-1,3/0,2)
en été	-0,2 [0,5] (-0,7/1,6)	-0,5 [0,2] (-0,8/1,0)	-1,0 [-0,3] (-1,3/1,2)
en automne	-0,4 [0,5] (-1,4/1,3)	-0,5 [0,4] (-1,3/1,1)	-0,4 [0,6] (-1,3/1,8)

L'évolution des précipitations moyennes au 21^{ème} siècle est relativement incertaine et celles-ci tendent à diminuer plus en été et au printemps qu'en hiver et en automne. Cette tendance à la diminution en période estivale (mars-septembre) est semblable pour les scénarios A1B et B1 aux 3 horizons (Fig. 15). Elle est toutefois supérieure pour le scénario A1B en 2090.

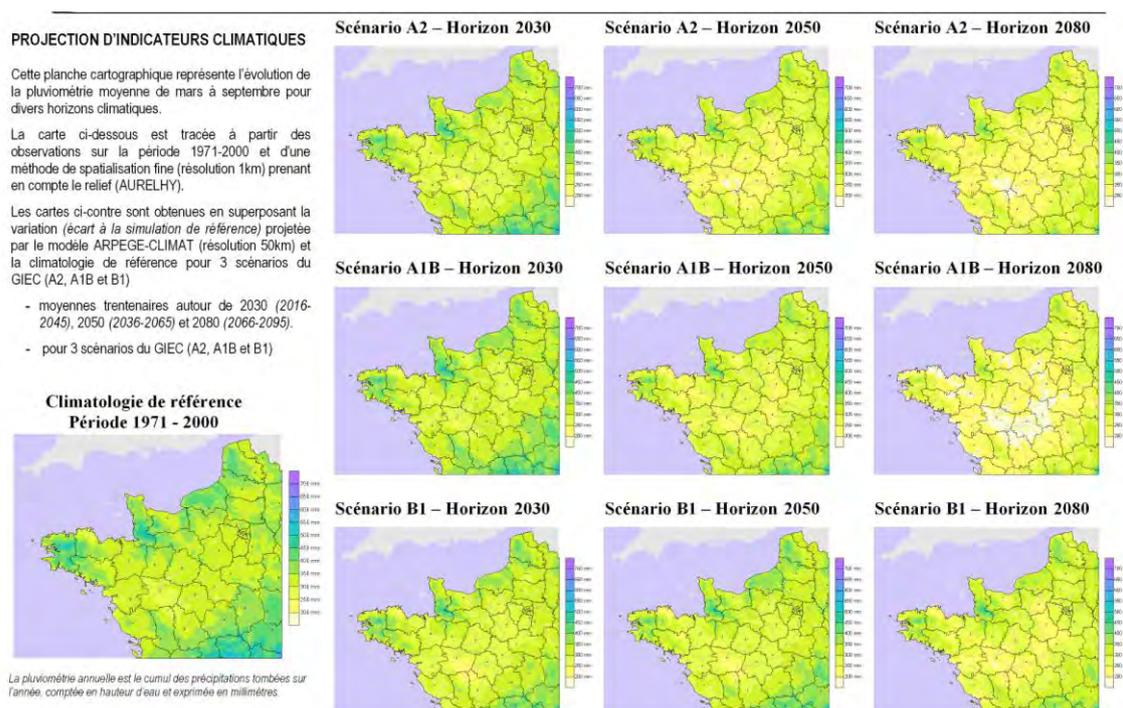


Figure 15 : Projections des précipitations moyennes sur le Nord Ouest pour 3 horizons différents (2030, 2050, 2080) et 3 scénarios du GIEC (A2, A1B, B1) (données Météo France, étude 2010 pour Datar ; F. Baraer, com. pers.).

Dans le cadre du projet IMFREX⁴, des simulations pour les précipitations en été et en hiver ont été réalisées selon le modèle de Météo France et de l'IPSL pour le scénario A2, de 2000 à 2100. Ces simulations montrent une tendance à l'augmentation des pluies en hiver et à la diminution des pluies l'été, avec une différence pour l'échéance selon les modèles climatiques utilisés.

2.1.3. Conclusion sur les projections climatiques dans le Nord Ouest

En Bretagne, l'élévation de la température devrait se poursuivre avec des différences en fonction du scénario suivi, les hivers devenant plus doux et les étés plus chauds. Cette évolution est complètement différente si on prend la période 2030-2050 où les écarts de températures sont faibles entre les différents scénarios et la période 2070-2100 où les écarts s'accroissent. **Le changement dans le régime des précipitations est beaucoup moins évident. On s'attend aussi à une variabilité accrue du climat, qui augmenterait avec le temps et serait plus importante pour certains**

⁴ <http://imfrex.mediasfrance.org/web/resultats/animation/index>

paramètres (comme les précipitations) que pour d'autres (comme les températures). Par ailleurs, les observations récentes montrent que les émissions de GES et que de nombreux aspects du climat tendent à évoluer vers la fourchette supérieure des projections publiées dans le quatrième rapport du GIEC (2007). En effet, d'autres effets additionnels liés par exemple aux émissions de méthane et de CO₂ libérées par la fonte du permafrost pourraient également être significatifs, mais leur ampleur n'est pas quantifiée à ce jour.

Afin de mieux comprendre et d'interpréter avec prudence ces projections climatiques, nous présentons dans la partie qui suit, la modélisation climatique, les méthodes de régionalisation ainsi que les incertitudes liées à leur lecture.

2.2. La modélisation climatique et ses incertitudes

Les projections climatiques pour le siècle à venir utilisent des modèles qui sont des représentations numériques simplifiées non seulement de notre atmosphère mais aussi de l'océan, de la biosphère, de la cryosphère, etc. On parle alors de modèles couplés car ils tiennent compte des interactions entre tous ces éléments du système climatique. Leur principe de fonctionnement est le même que celui des modèles de prévision météorologique, la différence majeure étant le pas de temps de calcul et d'échéances qui ne se comptent plus en heures comme pour la prévision, mais en années. La mise en œuvre de ces modèles climatiques suppose au préalable la définition de scénarios économiques et d'émissions de CO₂.

2.2.1. Les scénarios socio-économiques du GIEC

La modélisation climatique s'appuie sur des hypothèses d'évolution des émissions des principaux gaz à effet de serre (GES) - gaz carbonique : CO₂ ; méthane : CH₄ ; protoxyde d'azote : N₂O ; etc. - et d'aérosols (sulfatés ou carbonés) pour les prochaines années. Ces hypothèses sont réalisées à partir de scénarios socio-économiques, décrits dans le SRES (*Special Report on Emissions Scenarios*, 2000) et produits par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, en anglais : *Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC). Ces scénarios prennent en compte plusieurs facteurs tels que l'évolution démographique, le développement social et économique, le progrès technologique, l'utilisation des ressources et la lutte contre la pollution, afin de caractériser l'évolution des émissions de GES de la planète (MEDDTL, 2007). Cependant, ils ne considèrent pas les éventuelles initiatives futures en matière d'atténuation, telles que la mise en œuvre de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques ou la réalisation des objectifs d'émissions du Protocole de Kyoto (GIEC, 2001). Les scénarios SRES sont regroupés en 4 familles (A1, A2, B1 et B2), chacune représentant une évolution différente au plan démographique, social, économique, technologique et environnemental (Fig. 16).

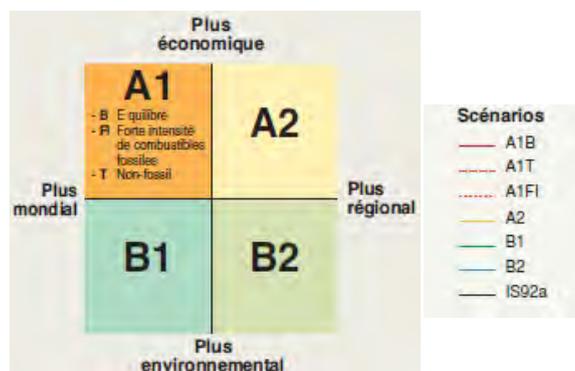


Figure 16 : Illustration schématique des scénarios SRES (GIEC, 2001).

✓ **A1** : La famille de scénarios A1 décrit un monde futur dans lequel la croissance économique sera très rapide, la population mondiale atteindra un maximum au milieu du siècle pour décliner ensuite et de nouvelles technologies plus efficaces seront introduites rapidement. On distingue 3 groupes qui décrivent des directions possibles de l'évolution technologique dans le système énergétique : A1FI (forte intensité de combustibles fossiles), A1T (sources d'énergie autres que fossiles) et A1B (équilibre⁵ entre les sources).

✓ **A2 (dit pessimiste)** : La famille de scénarios A2 décrit un monde très hétérogène. Le développement économique a une orientation principalement régionale, et la croissance économique par habitant et l'évolution technologique sont plus fragmentées et plus lentes que dans les autres familles.

✓ **B1** : La famille de scénarios B1 décrit un monde convergent avec la même population mondiale culminant au milieu du siècle et déclinant ensuite, comme dans A1. L'accent est placé sur des solutions mondiales orientées vers une viabilité économique, sociale et environnementale, y compris une meilleure équité, mais sans initiatives supplémentaires pour gérer le climat.

✓ **B2 (dit optimiste)** : La famille de scénarios B2 décrit un monde où l'accent est placé sur des solutions locales dans le sens de la viabilité économique, sociale et environnementale. La population mondiale s'accroît de manière continue mais à un rythme plus faible que dans A2. Les scénarios sont également orientés vers la protection de l'environnement et l'équité sociale, mais ils sont axés sur des niveaux locaux et régionaux.

A ces scénarios socio-économiques correspond donc l'évolution des émissions de GES pour le siècle à venir (Fig. 17).

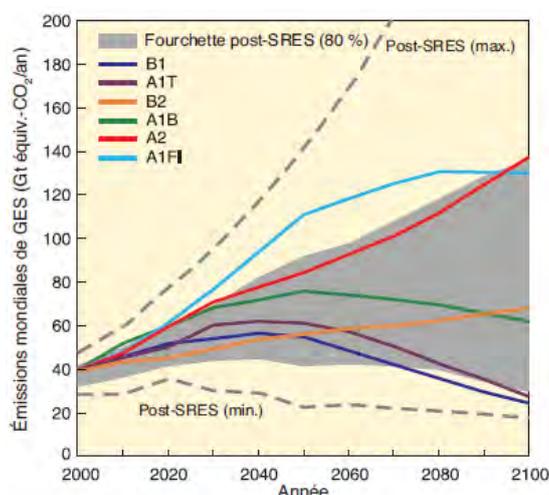


Figure 17 : Émissions mondiales de GES (en Gt équiv.-CO₂) en l'absence de politiques climatiques : six scénarios illustratifs de référence (SRES, lignes colorées) et intervalle au 80^{ème} percentile des scénarios publiés depuis le SRES (post-SRES, partie ombrée). Les lignes en pointillé délimitent la plage complète des scénarios post-SRES. Les GES sont le CO₂, le CH₄, le N₂O et les gaz fluorés (GIEC, 2007).

Ces chroniques d'émissions de GES sont transformées en concentrations de GES qui vont ensuite servir de paramètre d'entrée aux modèles climatiques. Ceux-ci vont déterminer l'impact de ces concentrations sur le climat en prenant en compte divers paramètres : l'atmosphère, les sols et la végétation, les océans, les banquises, l'effet climatique des aérosols sulfatés, et, dans certains cas, l'hydrologie continentale, le cycle du carbone incluant les effets de la biosphère et des écosystèmes marins, ou encore l'ozone stratosphérique (Jouzel, 2011).

⁵ « Equilibre » signifie que l'on ne s'appuie pas excessivement sur une source d'énergie particulière, en supposant que des taux d'amélioration similaires s'appliquent à toutes les technologies de l'approvisionnement énergétique et des utilisations finales (GIEC, 2001).

Ainsi, selon le GIEC et les différents scénarios socio-économiques, les émissions mondiales de GES devraient augmenter de 25 à 90 % entre 2000 et 2030, avec une hausse de 40 à 110 % des émissions de CO₂ dues à la consommation d'énergie (combustibles fossiles) au cours de cette période. L'augmentation de ces émissions devrait accentuer le réchauffement global de 2 à 6°C jusqu'en 2100 (GIEC, 2007).

2.2.2. Les modèles climatiques globaux

Les modèles climatiques sont basés sur l'ajustement entre l'énergie reçue par le système (rayonnement solaire) et l'énergie perdue vers l'espace (rayonnement infrarouge). Pour cela, ils prennent en compte, à des degrés différents, l'ensemble des milieux intervenant dans le cycle énergétique et le cycle de l'eau (atmosphère, surface continentale, océan, glaciers, etc.) ainsi que les échanges entre ces milieux (échanges de chaleur, évaporation, précipitations, etc.) afin de simuler au mieux le climat observé et futur. Cette grande quantité d'informations nécessaire à leur fonctionnement nécessite des ordinateurs très puissants. Ainsi, leur maille spatiale est relativement large : environ 200 à 300 km. Ils ne permettent donc pas de projeter le climat à une échelle fine, seules des tendances générales pouvant être dégagées avec une telle résolution spatiale (Braconnot *et al.*, 2007).

En France, les modèles de la circulation générale couplés atmosphère-océan (MCGOA) les plus utilisés afin de reproduire l'évolution du climat, sont ceux produits par le Centre National de Recherche Météorologique (CNRM) de Météo France et l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL). Ces deux organismes contribuent à de nombreux travaux de recherches internationaux et participent aussi à la réalisation et à l'analyse de projections climatiques en vue de la préparation des différents rapports du GIEC. Par ailleurs, au sein du projet ESCRIME⁶ (Analyse et modélisation du changement climatique), les scientifiques français ont pu réaliser des simulations climatiques s'ajoutant aux 23 autres modèles utilisés dans le 4^{ème} rapport du GIEC.

Ces deux modèles français diffèrent par la composante atmosphérique : Le modèle CNRM-CM3 utilise ARPEGE-Climat, spécifiquement adaptée pour les études climatiques et le modèle IPSL-CM4 utilise LMDz, spécifiquement développée pour les études du climat terrestre et des atmosphères planétaires (Braconnot *et al.*, 2007). La résolution spatiale d'ARPEGE-Climat varie entre 50 km en Méditerranée et 450 km dans le Pacifique Sud, et est de l'ordre de 60 km sur la France, alors que la résolution spatiale de LMDz est moins détaillée, de l'ordre de 160 km en France (Fig. 18 ; Jouzel, 2011).

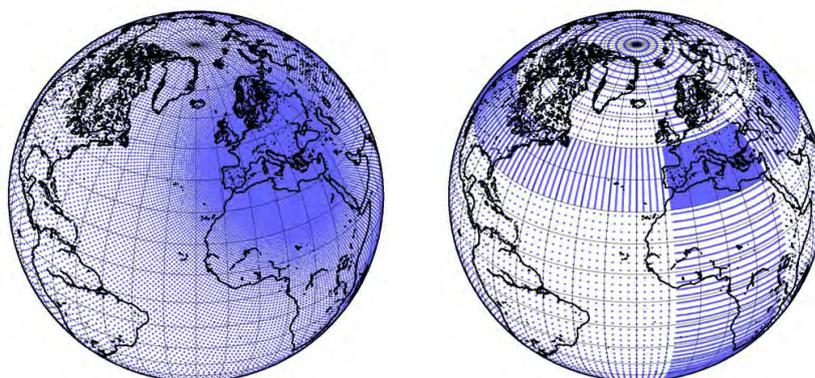


Figure 18 : Résolution spatiale des modèles ARPEGE-Climat (à gauche) et LMDz (à droite) (Planton, 2006).

Plusieurs études ont donc permis d'évaluer la fiabilité de ces deux modèles français vis-à-vis des observations passées du climat. Pour le 20^{ème} siècle, les deux modèles simulent des tendances de

⁶ <http://escrime.ipsl.jussieu.fr/>

température cohérentes avec les observations, aussi bien à l'échelle globale qu'à l'échelle de la France. On observe ainsi que les modèles simulent des températures plus froides que les observations passées mais qu'ils simulent bien un accroissement de la température moyenne du globe, surtout à partir des années 1960 (Fig. 19 ; Braconnot *et al.*, 2007). De plus, ces deux modèles donnent un accroissement de température similaire pour chaque scénario, ce qui montre une complémentarité d'un modèle vis-à-vis de l'autre et permet une estimation de l'incertitude liée à la modélisation climatique.

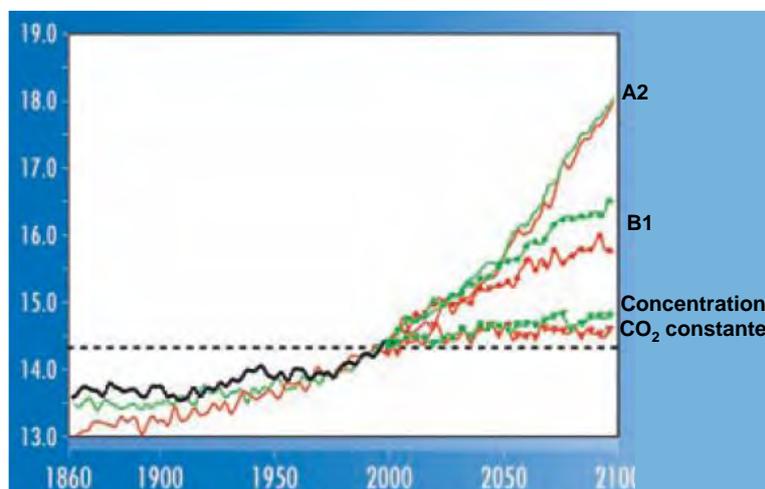


Figure 19 : Evolution de la température (°C) moyenne de surface du globe observée (en noir, de 1860 à 2004), et simulée par les modèles du CNRM (en rouge) et de l'IPSL (en vert). Après l'an 2000, on utilise, soit le scénario A2 (trait continu), soit le scénario B1 (trait avec cercles), ou bien on maintient la concentration de CO₂ constante (trait avec triangles). La droite horizontale en trait pointillé correspond à la température en 2000. Les observations sont celles compilées par le Climatic Research Unit (CRU) au Royaume-Uni, (source : Jones et Moberg, 2003 cités dans Braconnot *et al.*, 2007).

➤ Le choix des scénarios

Pour les simulations climatiques, quatre scénarios sont souvent utilisés dans les études sur le changement climatique :

- le scénario A2 (plutôt pessimiste) où les émissions de CO₂ augmentent jusqu'en 2100 ;
- le scénario A1B où les émissions de CO₂ continuent de croître jusqu'en 2050, puis décroissent ;
- les scénarios B1 ou B2 (plutôt optimistes) où les émissions de CO₂ sont presque stabilisées dès l'année 2000, puis décroissent à partir de 2050. Ces scénarios étant considérés comme obsolètes à l'heure actuelle.

➤ Le choix des échéances

Les périodes étudiées sont les horizons 2030 (court terme), 2050 (moyen terme) et 2100 (long terme). Ces horizons correspondent à des moyennes trentenaires autour de l'année choisie : par exemple pour 2030, le résultat correspond à la valeur moyenne entre 2015 et 2045. Ces échéances permettent de considérer les impacts du changement climatique à différentes échelles temporelles, qui sont utilisés pour la construction des bâtiments, la viticulture, la sylviculture, etc.

➤ Le choix des indicateurs

Nous avons retenu les variables pour lesquelles il existe des observations et qui sont simulées par des modèles d'impact. Les 19 indices retenus pour évaluer l'évolution du climat par le Plan

National d'Adaptation au changement climatique pour la France⁷, publié en 2011, sont issus de la mission confiée à Jouzel (2011⁸) :

- **Indices de température** : température moyenne quotidienne / température minimale quotidienne (Tmin) / Température maximale quotidienne (Tmax) / valeurs extrêmes de la température maximale quotidienne / nombre de jours de Tmax anormalement élevée / nombre de jours de Tmin anormalement élevée / nombre de jours de vagues de chaleur / nombre de jours de Tmin anormalement basse / nombre de jours à températures négatives / nombre de jours de gel / degrés-jours de chauffage / degrés-jour de climatisation ;

- **Indices de précipitations** : précipitations quotidiennes moyennes / valeurs extrêmes des précipitations quotidiennes / nombre de jours de précipitations intenses / périodes de fortes sécheresses / Nombre de jours de chutes de neige ;

- **Indice d'humidité du sol** ;

- **Indice de vents violents** ;

- **Niveau de la mer.**

Dans cette étude, nous avons présenté les projections (voir chapitre 2.1.) concernant les indices climatiques généraux (température, précipitations) et nous présenterons les extrêmes climatiques de température, de précipitations, et tempêtes (voir chapitre 3).

2.2.3. Comment passer du climat global au climat régional ?

Le climat régional résulte de l'interaction d'un état atmosphérique de grande échelle et de contraintes physiographiques locales (relief, occupation du sol, couverture végétale, trait de côte, etc.). Or, la résolution spatiale des modèles climatiques globaux (environ 200/300 km) n'est pas assez fine pour pouvoir simuler fidèlement le climat à l'échelle locale. Par exemple, à une résolution spatiale de 250 km, le Massif-Central n'existe pas, les Pyrénées sont rejetées vers le centre de l'Espagne, les Alpes sont repoussées vers l'Europe centrale et les altitudes sont sous-estimées (Fig. 20). Par ailleurs, ils reproduisent mal les liens entre circulation atmosphérique de grande échelle (CAGE) et précipitations dans le climat présent, surtout l'été (Boé, 2007).

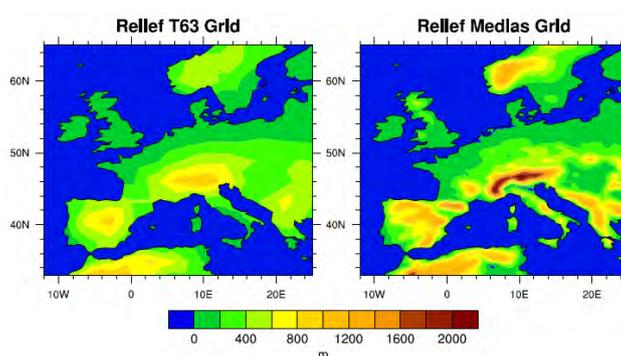


Figure 20 : Relief du modèle ARPEGE (gauche) dans sa version « classique » basse résolution et (droite) dans sa version à plus haute résolution (Boé, 2007).

Le climat pouvant varier à des échelles très fines (de l'ordre de quelques mètres), il est difficile de modéliser correctement avec des modèles globaux, certains paramètres tels que les précipitations, les débits des rivières ou encore les phénomènes extrêmes souvent aléatoires. L'étude des impacts du changement climatique sur un système repose sur l'utilisation d'un modèle d'impact. Ces modèles, simulant des processus se déroulant à une échelle spatiale fine (ruissellement sur un bassin versant, rendement agricole sur une unité de culture, etc.), sont souvent très sensibles

⁷ <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC-PNACC-complet.pdf>

⁸ http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/onerc_rapport_mission_jouzel_25janv2011_complet_8Mo.pdf

à ces variations de petite échelle du climat (Boé, 2007). Ainsi, les études d'impact effectuées à l'échelle d'un petit territoire impliquent de pouvoir caractériser le climat à des échelles spatiales très fines. Il est donc nécessaire d'ajouter une étape supplémentaire de descente d'échelle (régionalisation ou désagrégation ; Fig. 21).

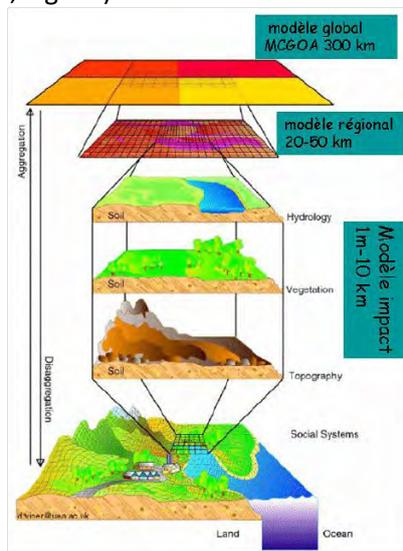


Figure 21 : La problématique de la désagrégation (source: Climate Research Unit, University of East Anglia, dans Boé, 2007).

Il existe différentes méthodes de descente d'échelle qui permettent d'obtenir des simulations d'une résolution de 20 à 50 km en général. Ces méthodes sont utilisées seules ou en combinaisons et sont classées en deux grandes familles (Fig. 22). La première est une méthode de désagrégation statistique basée sur l'analyse des régimes de temps. La deuxième combine une désagrégation dynamique (par un modèle climatique à haute résolution) avec une correction de biais par ajustement des quantiles simulés aux quantiles observés.

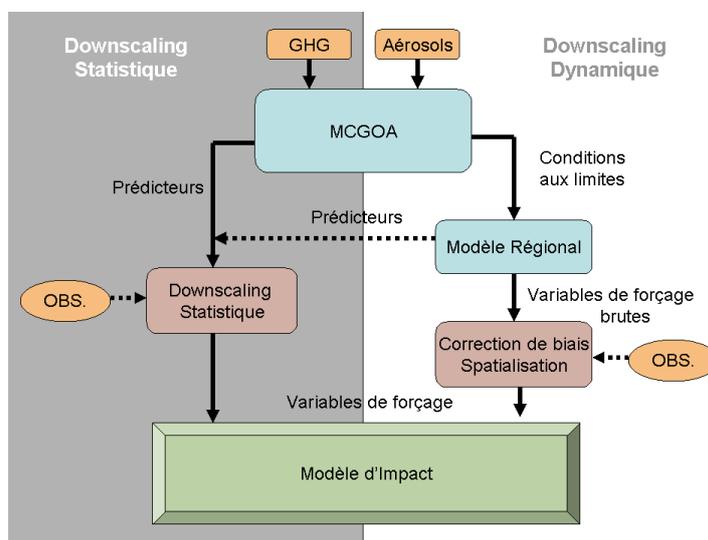


Figure 22 : Les différentes étapes d'une étude des impacts du changement climatique (Boé, 2007).

➤ La désagrégation statistique

Cette méthode consiste à bâtir un modèle statistique reliant les variables climatiques de grande échelle simulées aux variables d'échelle régionale ou locale au moyen d'outils statistiques. Pour construire ce modèle statistique, il est donc nécessaire de disposer d'un jeu d'observations

fiables, d'une zone géographique pertinente et des prédicteurs les mieux adaptés pour l'étude. La désagrégation statistique repose donc sur 3 hypothèses (Boé, 2007 ; Brisson et Levraut, 2010) :

- les prédicteurs sont simulés de façon réaliste par les modèles climatiques à l'échelle où on les considère (climat local) ;
- le modèle statistique établi et validé pour le climat présent (dans les bornes du climat observé), reste valable dans le climat perturbé par les forçages anthropiques ;
- les prédicteurs doivent représenter le signal du changement climatique : la circulation atmosphérique peut prédire efficacement la température de surface régionale pour le climat présent, mais pas pour le climat futur où les changements de température seront plus dominés par les changements radiatifs (concentration croissante en GES) que par les changements dynamiques (circulation atmosphérique).

Il existe plusieurs méthodes de désagrégation statistique, classées en 3 grandes familles et dont la plus utilisée est la **classification en type de temps**. Celle-ci se base sur l'idée que les mêmes types de temps (circulation atmosphérique de grande échelle : CAGE) produisent les mêmes effets au niveau du climat régional. Pour un jour donné, on recherche dans les archives, un jour avec le type de CAGE le plus proche, afin de connaître la valeur de la variable à prédire. Ainsi, les méthodes basées sur les types de temps, traduisent simplement les liens physiques existants entre la CAGE et le climat régional. L'inconvénient est qu'elles ne prennent pas en compte, les événements extrêmes journaliers d'amplitude supérieure à celles de l'archive (Boé, 2007 ; Brisson et Levraut, 2010).

Les principaux avantages de cette méthode est qu'elle tire parti des observations existantes à l'échelle régionale ou locale et qu'elle est peu coûteuse. Toutefois, elle présente l'inconvénient majeur d'être ajustée sur des conditions climatiques actuelles sans que l'on puisse être assuré de leur validité dans le cadre de la projection dans un climat futur (Planton, 2002).

➤ La désagrégation dynamique

La régionalisation dynamique consiste à utiliser des modèles climatiques plus précis sur la région d'intérêt que les modèles climatiques employés habituellement. La désagrégation dynamique utilise donc des modèles atmosphériques à plus haute résolution, non couplés à un modèle d'océan, mais forcés par les Température de Surface Océanique (TSO). Cependant cela reste assez coûteux en termes de calcul. Il existe deux types de modèles (Boé, 2007) :

- **les modèles à résolution variable** : augmentation de la résolution du modèle atmosphérique uniquement sur la zone d'intérêt et dégradation progressive à mesure qu'on s'en éloigne ;
- **les modèles à aires limitées** : utilisation d'un modèle atmosphérique à haute résolution sur une zone géographique limitée, forcé à ses frontières (atmosphériques et océaniques) par les sorties d'un modèle climatique couplé à basse résolution. Le modèle numérique ALADIN⁹ (maille de 20 km) dérivé du modèle ARPEGE-Climat du CNRM en est un exemple.

L'avantage de l'utilisation de modèles régionaux est de représenter explicitement la circulation et les variables climatiques à des échelles plus fines et d'autoriser la prise en compte d'échelles des forçages naturels ou anthropiques, elles aussi plus petites. Ils apportent aussi une valeur ajoutée aux études de changement climatique en représentant en particulier de façon plus précise l'influence du relief. Actuellement, la résolution d'un modèle dynamique est de l'ordre de 50 km, ce qui n'est pas toujours satisfaisant pour les études d'impact qui requièrent une échelle plus précise. Leur inconvénient majeur est leur coût en temps de calcul, d'autant que plusieurs simulations différentes sont généralement nécessaires pour évaluer l'incertitude des changements.

⁹ Aire Limitée Adaptation dynamique Développement International : <http://www.cnrm.meteo.fr/gmgec/spip.php?article80>

L'augmentation de la résolution ne résout pas tous les problèmes de paramétrisation, surtout liés aux précipitations (variabilité difficile à modéliser) et c'est pourquoi une étape de correction des biais est indispensable pour les études d'impact. La comparaison du climat modélisé avec les observations réelles du climat passé permet d'assurer la crédibilité des modèles. Les températures simulées sont corrigées de leurs biais, afin que les moyennes globales des modèles et des observations soient identiques sur la période récente. Pour cela, les données SAFRAN¹⁰ disponibles sur une grille de 8x8 km² sont utilisées comme des observations de base pour valider les modèles. La méthode de correction dite quantile/quantile¹¹ est ensuite utilisée pour permettre de corriger les biais des distributions statistiques (Boé, 2007 ; Jouzel, 2011). Une fois les biais corrigés, on dispose de séries modélisées qui ont la même distribution statistique, par construction, que les séries observées à la station météorologique la plus proche. Enfin, ces corrections statistiques sont appliquées aux simulations du climat futur, selon l'hypothèse que les biais restent inchangés entre le climat actuel et le climat futur (Déqué, 2004).

Au sein du projet TERVICLIM¹² qui mesure et modélise les impacts du changement climatique sur les vignobles français et dans le monde, l'étude de simulations climatiques à partir d'un modèle atmosphérique méso-échelle a été effectuée. Ce modèle dont la résolution spatiale est beaucoup plus fine (5 km à 200 m) que le modèle global ARPEGE-Climat (60 km) permet de mieux représenter les hétérogénéités de surface ainsi que les températures moyennes mensuelles (Briche *et al.*, 2011). Il permet par exemple de mieux évaluer les risques de gel printanier ainsi que les fortes chaleurs estivales, auxquelles sont sensibles les vignes. Cependant, même si utiliser un modèle régional améliore la situation, des biais demeurent. Suite à ces travaux, l'intégration de simulations climatiques intégrant les scénarios socio-économiques pour la période 2040-2050, permettra d'obtenir des simulations climatiques plus adaptées à l'échelle viticole (Bonnardot *et al.*, 2011).

De nouvelles projections climatiques à échelle fine sur la France, ont été réalisées par le Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS) afin d'améliorer la méthodologie de désagrégation. Ces nouveaux scénarii, dénommés SCRATCH2010, ont été utilisés dans le cadre du projet SCAMPEI (impact des changements climatiques sur les régions de montagnes) et ont une résolution spatiale de 8 km sur la France (Pagé et Terray, 2011).

2.2.4. Les incertitudes liées aux projections climatiques

La plus grosse difficulté dans l'étude des impacts du changement climatique est la prise en compte des nombreuses incertitudes qui en découlent. En effet à chaque étape de l'étude, des scénarios socio-économiques aux modèles d'impact, les incertitudes s'accumulent, on peut alors parler de cascade d'incertitudes (Fig. 23 ; Boé, 2007). De plus, le climat varie à toutes les échelles de temps, y compris à l'échelle d'une ou plusieurs dizaines d'années, ce qui constitue l'une des principales sources d'incertitude pour l'étude de l'évolution du climat des prochaines années et correspond à la limite de notre propre compréhension du climat (Jouzel, 2011). Il est donc nécessaire d'estimer au mieux cette incertitude.

¹⁰ Analyses météorologiques quotidiennes de température, précipitations et vent sur la France métropolitaine, réalisées par Météo France, qui couvrent la période 1971-2006.

¹¹ Pour chacun des points de la grille du modèle et pour chaque saison, on calcule les 99 centiles du modèle pour chaque variable et les 99 centiles des points de la grille SAFRAN, qui entourent le point de la grille du modèle. En faisant correspondre les centiles un à un entre le modèle et les analyses SAFRAN, on construit une fonction de correction, il suffit ensuite d'interpoler ou d'extrapoler pour corriger les valeurs du modèle.

¹² <http://terviclim.in2p3.fr/spip.php?rubrique1>

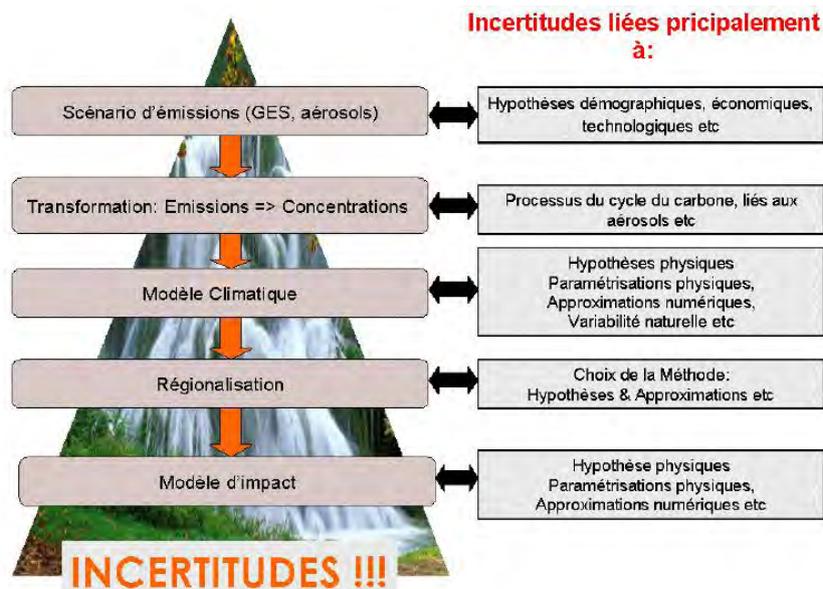


Figure 23 : La cascade des incertitudes caractéristique d'une étude des impacts du changement climatique (Boé, 2007).

➤ La cascade d'incertitudes

La 1^{ère} cause d'incertitude provient des **hypothèses de scénarios socio-économiques** à l'échelle mondiale qu'il faudrait réajuster. Ces hypothèses reflètent des évolutions de développement économique impossibles à vérifier puisqu'elles traitent du futur. C'est pourquoi, un certain nombre de scénarios ont été développés afin de tenir compte de cette grande source d'incertitude.

Suite à ces hypothèses sont calculées des **émissions de GES et leur concentration** dans l'atmosphère. Les modèles effectuant ces calculs comportent également des incertitudes liées à leur conception même (équations utilisées, traitement de ces équations, absence de représentation de certains processus ; Jouzel, 2011). Ces modèles projettent pour 2100 une concentration en CO₂ atmosphérique comprise entre 540 et 970 ppm¹³ selon les scénarios SRES, la fourchette d'incertitude inhérente étant importante et comprise entre 490 et 1260 ppm (GIEC, 2001).

Il existe ensuite des incertitudes liées aux **modèles climatiques**. Bien que des progrès aient été réalisés, avec des modèles de plus en plus complexes, les paramètres d'entrée des modèles ainsi que la conception de ces modèles ajoutent une certaine incertitude à la lecture des résultats qui divergent. C'est pourquoi le GIEC a utilisé 23 modèles différents dans son dernier rapport afin de les croiser pour une meilleure analyse de sensibilité (GIEC, 2007 ; Jouzel, 2011).

Aux horizons proches (2030, 2050), la **variabilité naturelle du climat** (El Niño-Southern Oscillation, Oscillation Nord-Atlantique, etc.) est difficilement captée, se traduisant par le fait qu'un même modèle partant de deux états climatiques très proches, peut calculer deux évolutions climatiques différentes (Braconnot *et al.*, 2007 ; Jouzel, 2011). De plus, les paramètres d'entrée ne sont pas tous bien calculés par les modèles, ce qui entraîne un biais de plus. Les extrêmes climatiques ainsi que l'évolution des précipitations, de par leur forte variabilité, sont difficiles à prévoir et à quantifier (Jouzel, 2011).

On retrouve une incertitude à chaque étape de la **descente d'échelle** à une maille régionale, tant sur le choix de la méthode (dynamique/statique) que sur les hypothèses posées. La **méthode de**

¹³ ppm signifie : partie par million, qui correspond à un rapport de 10⁻⁶ (ex : 1 mg par kg).

correction des biais présente elle aussi quelques limites, liées à la courte durée (environ 30 ans) de disponibilité des données d'observations (Boé, 2007). De plus, les modèles ne peuvent pas prendre en compte les futures valeurs du climat qui peuvent dépasser les valeurs observées.

Enfin, les **modèles d'impacts** présentent des biais par exemple au niveau des effets de seuils (thermiques, hydriques) selon les espèces, au niveau des interactions avec les changements atmosphériques et océaniques et des interactions selon les pratiques de gestion.

➤ Les rétroactions du système climatique

Toute évolution de la concentration en GES dans l'atmosphère entraîne une modification du bilan énergétique de la Terre, appelée forçage radiatif, qui va accentuer la température moyenne. Cette élévation de température va dépendre du forçage en lui-même et de la réponse du système climatique à ce forçage. Cette réponse est difficilement quantifiable à cause de nombreuses rétroactions¹⁴ et rajoute de l'incertitude. Ces phénomènes de rétroaction jouent un rôle clé dans l'estimation de l'amplitude du réchauffement climatique, puisqu'ils peuvent amplifier ou atténuer la réponse à un forçage donné. Ainsi, toute élévation de la température atmosphérique entraîne des modifications de divers autres paramètres (vapeur d'eau, nuages, etc.) qui, en retour, peuvent influencer sur la température de l'air (Braconnot *et al.*, 2007). On distingue 2 types de variations :

- **des rétroactions positives** qui accentuent l'effet de serre ;
- **des rétroactions négatives** qui limitent l'augmentation de l'effet de serre.

- Vapeur d'eau et cycle hydrologique¹⁵

L'augmentation de la température moyenne à la surface du globe entraîne une augmentation de la concentration en vapeur d'eau (l'un des GES) dans l'atmosphère. Cette vapeur d'eau supplémentaire tend elle-même à renforcer l'effet de serre, ce qui représente une rétroaction positive essentielle (GIEC, 2007).

Concernant l'évaporation globale, il existe une incertitude importante pour la France, puisque la moitié des modèles prédisent une diminution importante, tandis que l'autre moitié simule une augmentation. Cependant certains modèles sous-estiment voire ignorent le rôle limitant de l'humidité des sols, conduisant à une augmentation irréaliste de l'évaporation dans le climat futur et à une sous-estimation de l'augmentation de la température et de la diminution des précipitations sur la France (Boé, 2007). Au niveau continental, l'effet du CO₂ atmosphérique sur la transpiration des plantes aurait tendance à limiter l'évaporation des surfaces recouvertes de végétation et expliquerait en partie l'accroissement du ruissellement continental global, observé au cours du 20^{ème} siècle (Braconnot *et al.*, 2007).

- Le cycle du carbone

L'évolution de la température et des teneurs en vapeur d'eau de l'atmosphère pourrait diminuer significativement l'efficacité des puits naturels (océans, sols, etc.) à absorber le CO₂ anthropique, amplifiant ainsi le changement climatique (rétroaction positive ; GIEC, 2007). Des études ont d'ailleurs montré que cette amplification pouvait varier entre 20 et 200 ppm à l'horizon 2100, selon les modèles. Ainsi, la rétroaction du cycle du carbone pourrait induire un réchauffement

¹⁴ A partir d'une perturbation ou d'un forçage climatique donné, une rétroaction pourrait se définir comme un mécanisme de réponse perturbant lui-même le système climatique et influençant, de ce fait, la réponse totale à la perturbation initiale.

¹⁵ Cycle selon lequel l'eau des océans et l'eau présente à la surface des terres émergées s'évapore, se déplace dans l'atmosphère sous la forme de vapeur d'eau, se condense pour former des nuages, retombe sous forme de pluie ou de neige, est interceptée par les arbres et la végétation, s'écoule par ruissellement à la surface des terres émergées, s'infiltré dans les sols, réalimente les nappes souterraines, se déverse dans les cours d'eau et, pour finir, se jette dans les océans, d'où elle s'évapore de nouveau.

de 1,5°C, supérieur aux estimations faites par les modèles climatiques sans prise en compte du cycle du carbone (Braconnot *et al.*, 2007).

- La cryosphère¹⁶

Les glaces de mer (surtout en Arctique) et les glaces continentales sont actuellement en régression, en particulier l'été. Le réchauffement du climat pourrait entraîner une réduction de la cryosphère, ce qui modifierait l'albédo¹⁷ global de la Terre, augmentant la quantité d'énergie solaire absorbée par la Terre et renforçant ainsi le réchauffement climatique. La fonte de la cryosphère entraîne donc des rétroactions positives qui auraient tendance à renforcer la réponse aux hautes latitudes (GIEC, 2007 ; Braconnot *et al.*, 2007)).

- Les nuages

Les rétroactions liées aux nuages restent la plus grande source d'incertitude pour la sensibilité climatique. En effet, l'écart de prédictions entre les 15 à 20 modèles climatiques qui existent, est en partie dû aux nuages, dont les variations sont difficiles à mesurer (Braconnot *et al.*, 2007). Selon la forme des nuages, leur altitude, leur localisation, leur teneur en eau, les dimensions et les types de particule qui les constituent, ils peuvent conduire soit à un réchauffement (en piégeant le rayonnement infrarouge montant), soit à un refroidissement (en réfléchissant vers l'espace le rayonnement solaire incident). L'évolution des nuages peut donc entraîner des rétroactions positives et/ou négatives sur le réchauffement climatique en cours (Fig. 24 ; Trenberth *et al.*, 2007 ; Boé, 2007).

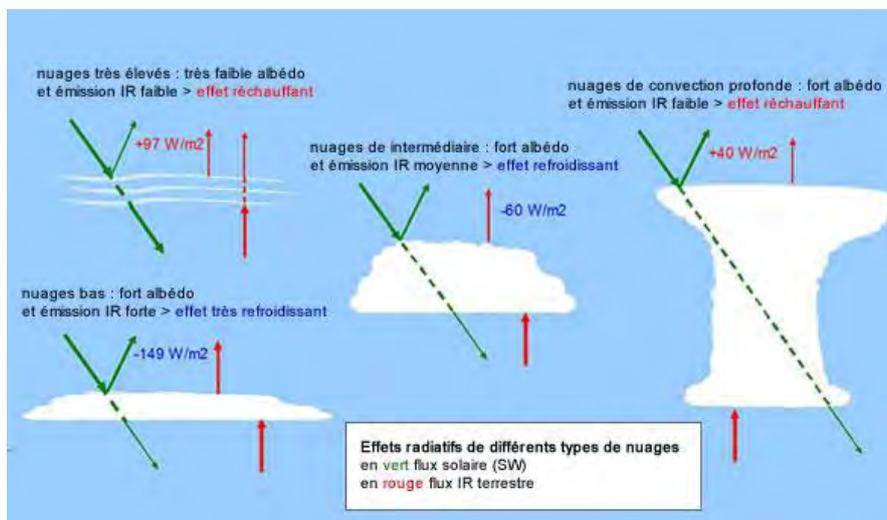


Figure 24 : Effets radiatifs de différents nuages (Source : Climat-évolution sur le site ClimObs¹⁸).

L'arrivée de nouveaux jeux de données d'observation spatiale par les satellites Calipso et CloudSat, devrait aider à mieux comprendre la physique de ces processus et savoir si les nuages vont renforcer ou diminuer le réchauffement climatique (Braconnot *et al.*, 2007).

¹⁶ Composante du système climatique constituée de la totalité de la neige, de la glace et du gélisol (y compris le pergélisol) au dessus et au dessous de la surface des terres émergées et des océans. (GIEC, 2007).

¹⁷ Fraction du rayonnement solaire réfléchi par une surface ou un objet, souvent exprimée en pourcentage. Les surfaces enneigées ont un albédo élevé, les sols de surface ont un albédo élevé à faible et les surfaces couvertes de végétation et les océans ont un albédo faible. L'albédo de la Terre varie principalement en fonction de la nébulosité, de l'enneigement, de l'englacement, de la surface foliaire et des variations du couvert terrestre (GIEC, 2007).

¹⁸ http://www.universcience.fr/climobs/figure/mecanismes_nuages-aerosols-vapeur-eau_effets-radiatifs-nuages/

- Les aérosols anthropiques

Les scénarios d'émissions se composent principalement d'émissions des principaux GES mais aussi d'émissions d'aérosols. Ces aérosols ont un effet inverse des GES, entraînant plutôt un refroidissement du climat à la surface (rétroaction négative). En effet, ces aérosols absorbent le rayonnement solaire et augmentent le pouvoir réfléchissant des nuages ainsi que leur durée de vie (GIEC, 2007).

2.2.5. Les perspectives d'études sur la modélisation climatique

Afin d'améliorer le réalisme et de réduire les incertitudes des scénarios climatiques régionaux dans le cadre des études d'impacts du changement climatique, il faudrait donc (Boé, 2007) :

- améliorer les modèles climatiques globaux et les modèles climatiques régionaux. Actuellement les modèles climatiques globaux sont en constante « complexification », intégrant de plus en plus de processus physiques intervenant dans le système climatique terrestre réel (végétation, chimie atmosphérique, cycle du carbone interactif, etc.) ;
- améliorer les méthodes de désagrégation statistique et/ou de correction de biais ;
- développer l'observation satellitaire et les systèmes au sol afin d'obtenir plus d'observations pour des paramètres importants tels que l'évaporation et l'humidité des sols.

Dans ce cadre, la mission CALIPSO¹⁹ (Cloud and Aerosol Lidar Pathfinder Satellite Observations) coordonnée par la NASA, a comme objectif d'analyser les propriétés structurales et optiques des nuages et des aérosols, dans le but de mieux déterminer le forçage radiatif lié à leur modification et de mieux comprendre les interactions aérosols-nuages-rayonnement.

Par ailleurs, le projet DRIAS²⁰ (Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnements) coordonné par Météo France, a pour but de mettre à disposition des utilisateurs impliqués dans des études d'impact et d'adaptation, des projections climatiques régionalisées, réalisées dans les laboratoires français de modélisation du climat (CERFACS, CNRM, IPSL, etc.).

Enfin, le prochain rapport du groupe scientifique du GIEC (5^{ème} rapport), publié fin 2013, tiendra plus compte du rôle des nuages et des aérosols dans le réchauffement climatique, ainsi que de l'accélération de la fonte des glaces du Groenland dans les projections climatiques du niveau des océans. De plus, dans le cadre de ce 5^{ème} rapport du GIEC en lien avec le projet DECLIC²¹ du GIS Climat (Etude des schémas économiques et des changements climatiques attendus pour plusieurs scénarios d'émission de gaz à effet de serre), de nouveaux scénarios vont être réalisés prenant en compte : (i) les interdépendances entre la croissance économique dans les différentes régions du monde, (ii) les cycles biogéochimiques des gaz à effet de serre et leurs rétroactions climatiques, (iii) les impacts régionaux du changement climatique et (iv) l'effet net de ces impacts sur l'activité économique. Des scénarios régionaux sur l'Europe seront aussi mis à disposition en 2012 (Jouzel, 2011).

2.2.6. Conclusion concernant la modélisation climatique

¹⁹ <http://calipso.ipsl.jussieu.fr/fr/faresavoir.html>

²⁰ http://www2.gip-ecofor.org/publi/page.php?id=413&rang=0&domain=38&lang=fr_FR

²¹ <http://www.gisclimat.fr/projet/declic>

Il existe donc de nombreuses incertitudes qui concernent entre autres le niveau réel des émissions de GES, la précision des modèles climatiques concernant certains paramètres (nuages, vapeur d'eau), le couplage et les rétroactions avec l'océan et les glaces, etc. Ces sources d'incertitudes ne remettent cependant pas en cause les prévisions des modèles climatiques. **Les résultats des simulations futures sont à mettre au conditionnel mais à considérer comme des évolutions fortes probables du climat.** En effet, il faut noter que les prévisions avancées lors des précédents rapports du GIEC ont été confortées par les observations faites depuis lors.

Toutefois, à l'échelle régionale, il faut rester prudent car on a vu que les sources d'incertitude sont multipliées. Il faut parler de tendance et utiliser les valeurs simulées en les encadrant le plus possible des bornes d'incertitude qui les accompagnent. De plus, plus l'horizon s'éloigne, plus l'incertitude est grande et ne prend pas en compte les politiques d'atténuation du changement climatique qui seront mises en place dans les années à venir.

Outre l'évolution des indices climatiques moyens, il faut aussi surveiller la fréquence, l'intensité et la durée des événements climatiques extrêmes (canicules, sécheresse, inondation, tempête, etc.) auxquels les populations humaines et les écosystèmes sont beaucoup plus vulnérables. Dans la partie qui suit, nous présentons donc l'état des connaissances relatif à l'évolution des événements climatiques extrêmes concernant les températures, les précipitations et les tempêtes.

Chapitre 3. L'évolution des événements climatiques extrêmes

Les événements extrêmes sont caractérisés par une faible probabilité d'occurrence mais de fortes conséquences sur les systèmes écologiques et sociaux (Décamps *et al.*, 2010). Par ailleurs, l'action de l'homme sur le milieu, l'urbanisation et l'accroissement de la population accroissent l'impact de ces événements extrêmes sur notre société. **Les effets du changement climatique sur les événements climatiques extrêmes sont difficiles à quantifier car ils présentent une variabilité plus grande que la moyenne et sont par conséquent plus difficiles à identifier avec les courtes séries de données actuelles.** Aussi, il est important d'identifier leurs impacts actuels sur l'environnement et de surveiller leur évolution, qui plus est sous un climat dont la variabilité risque de s'accroître avec le changement climatique.

Les événements climatiques extrêmes présentés dans cette étude et pouvant concerner la Bretagne sont :

- les extrêmes de température pouvant induire des risques de vague de chaleur ou de froid ;
- les extrêmes de précipitations pouvant induire des périodes sèches et des inondations ;
- les tempêtes pouvant aussi induire des risques d'inondations, en interaction avec de fortes pluies.

3.1. Les extrêmes de températures : risque de vagues de chaleur ou de froid	29
3.2. Les extrêmes de précipitations : risque de périodes sèches et d'inondations	30
3.2.1. Le risque de périodes sèches en Bretagne	31
3.2.2. Le risque d'inondations en France	32
3.3. Les extrêmes de vents : risque de tempêtes	33
3.3.1. Les observations concernant les tempêtes	33
3.3.2. Les projections des tempêtes	34
3.4. Conclusion concernant les événements extrêmes	35
3.5. Les perspectives de recherche sur les événements extrêmes	35
3.5.1. Les projets finalisés	35
3.5.2. Les projets en cours	36

3.1. Les extrêmes de températures : risque de vagues de chaleur ou de froid

A l'échelle locale de Rennes, le nombre de jours froids (seuils zéro et -5°C) a diminué entre 1951 et 2011, alors que le nombre de jours de chaleur (> 25 et > 30°C) a fortement augmenté (Fig. 25). A Rennes, au cours des 20 dernières années, le thermomètre a franchi les 25°C, en moyenne 43 jours/an contre 26 jours/an entre 1951-1980 (Dubreuil et Planchon, 2008).

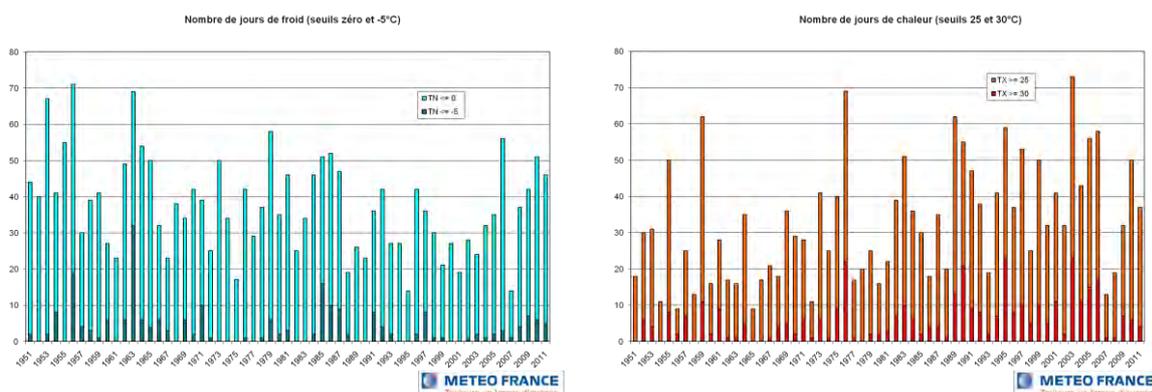


Figure 25 : Evolution du nombre de jours froids (seuils 0 et -5°C ; gauche) et de jours de chaleurs (seuils 25 et 30°C ; droite) de 1951 à 2011 (données Météo France ; F. Baraer, com. pers.).

Par ailleurs, à l'échelle de la Bretagne qui présente une forte variabilité spatiale du climat, une tendance à l'augmentation des jours chauds (>25°C) est aussi observée à Brest depuis 1949 (Fig. 26). Ces données montrent l'effet du réchauffement global, déjà observé sur les températures moyennes. Par ailleurs, une étude réalisée sur la vague de chaleur de 2003 en Europe, a montré que seule la prise en compte de facteurs humains (émissions anthropiques de CO₂) en plus des facteurs naturels pouvait expliquer la situation telle qu'elle a été réellement observée (Trenberth *et al.*, 2007).

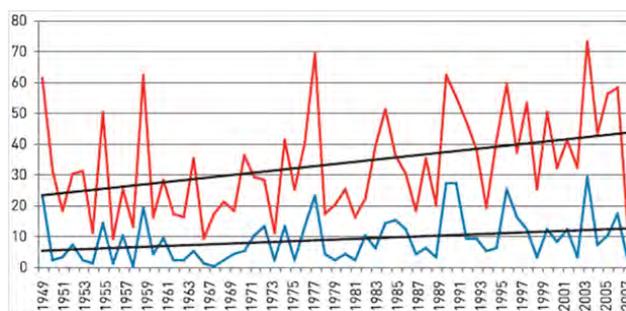


Figure 26 : Evolution du nombre annuel de jours chauds (> 25 °C) à Rennes (en rouge) et Brest (en bleu) de 1949 à 2007 ; courbe de tendance en noir (données Météo France, dans Dubreuil et Planchon, 2008).

Au niveau du nord-ouest de la France et pour le scénario A2, les projections d'évolution du nombre annuel de jours de vague de chaleur et de jours de gel (écarts entre les scénarios et la référence : 1990) ont été réalisées et retransmises dans Jouzel (2011). On donne l'intervalle d'incertitude pour la valeur moyenne entre crochets, ainsi que les valeurs extrêmes entre parenthèses. Ces tendances sont les suivantes :

- **une hausse du nombre annuel de jours de vague de chaleur au 21^{ème} siècle :**
 - de 2 jours [13] (-6/28) pour l'horizon 2030 ;
 - de 8 jours [26] (-5/66) pour l'horizon 2050 ;
 - de 45 jours [73] (9/113) pour l'horizon 2090 ;

- **une baisse des jours de gel (< 0°C) au 21^{ème} siècle :**
 - de -14 jours [-1] (-21/7) pour l'horizon 2030 ;
 - de -16 jours [-1] (-26/19) pour l'horizon 2050 ;
 - de -27 jours [-14] (-32/-11) pour l'horizon 2090.

La tendance à la baisse des jours de gel est aussi observée concernant les scénarios A1B et B1, quoique plus inférieure (Fig. 27). La faible différence entre les horizons 2030 et 2050 souligne l'importance à ces échéances de l'impact de la variabilité climatique naturelle qui masque pour partie la tendance lente au réchauffement d'origine anthropique.

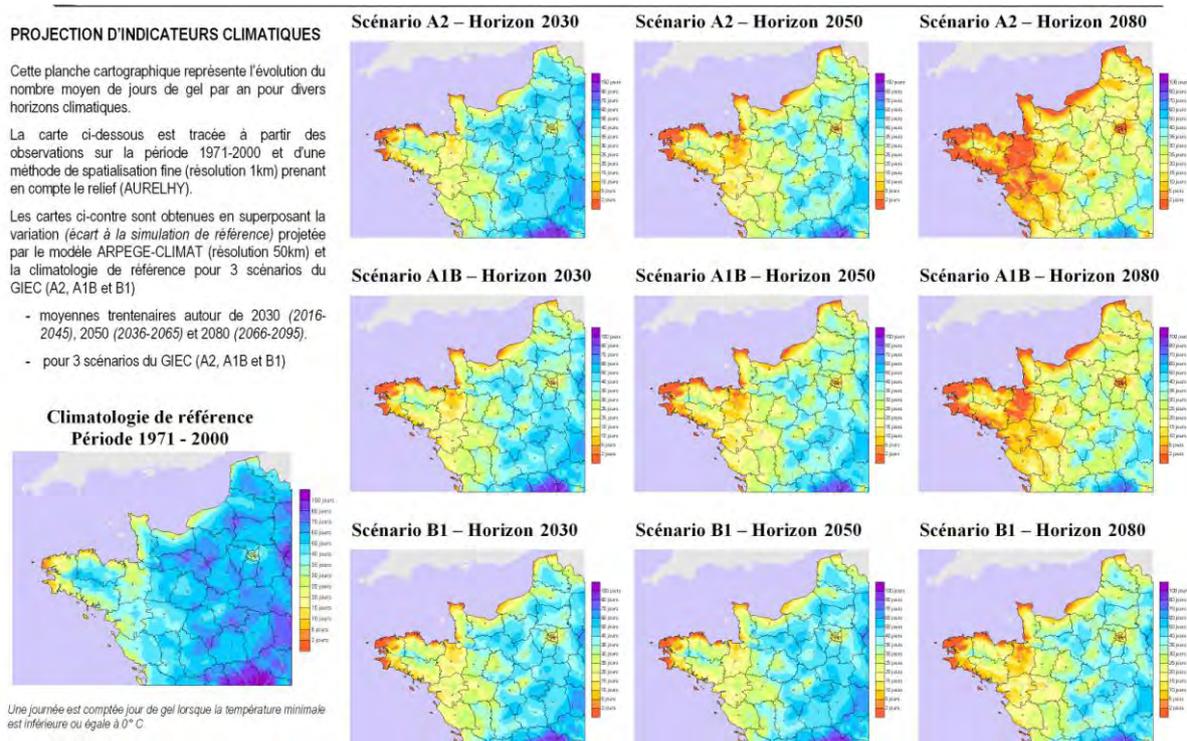


Figure 27 : Projections du nombre moyen de jours de gel par an sur le Nord Ouest pour 3 horizons différents (2030, 2050, 2080) et 3 scénarios du GIEC (A2, A1B, B1) (données Météo France, étude 2010 pour Datar ; F. Baraer, com. pers.).

Ces tendances sont aussi observées à l'échelle plus locale par des projections concernant la station climatique de Rennes dans le cadre du projet IMFREX. De plus, sur le site du projet IMFREX²², on peut obtenir ces données en moyenne annuelle et saisonnière, calculées par les deux modèles climatiques (ARPEGE et LMDz), ainsi que des animations dynamiques sur l'évolution des températures minimales en hiver²³ et des températures maximales en été²⁴ au cours du 21^{ème} siècle.

3.2. Les extrêmes de précipitations : risque de périodes sèches et d'inondations

L'évolution des précipitations intenses mensuelles (> 20 mm par jour) en Bretagne montre un contraste entre les stations de Rennes et Brest, sur la période 1946-1993. En effet, les fortes

²² <http://imfrex.mediasfrance.org/web/resultats/diagmod/index>

²³ <http://imfrex.mediasfrance.org/web/resultats/animation/tminHiver.html>

²⁴ <http://imfrex.mediasfrance.org/web/resultats/animation/tmaxEte.html>

pluies sont fréquentes et hivernales à Brest, alors qu'elles sont rares et plutôt estivales à Rennes. De plus, Dubreuil *et al.* (1996b) ont observé que **depuis 1970, elles ont tendance à augmenter en intensité à Rennes (surtout mai et septembre), alors qu'elles ont plutôt tendance à stagner à Brest (pour les mêmes mois), station pourtant plus océanique. Ces données vont dans le même sens que les observations pour les précipitations moyennes mensuelles, à savoir une forte variabilité géographique et saisonnière à l'échelle de la Bretagne.**

Ces auteurs ont émis l'hypothèse que les mutations paysagères, plus importantes depuis les années 1970 dans la région de Rennes, avaient un rôle dans cette intensification des précipitations. En effet, les changements d'occupation du sol (augmentation des sols nus par le recul du réseau bocager et l'accroissement de la culture du maïs, ainsi que l'augmentation des surfaces bâties) se traduisent par un échauffement au niveau du sol, lequel augmente les conditions d'instabilité de l'air dans les basses couches de l'atmosphère et la condensation, à l'origine de ces situations de fortes précipitations (Dubreuil *et al.*, 1996ab).

Le lien entre les précipitations extrêmes et le changement climatique n'est actuellement pas formellement établi. L'évolution de ces pluies intenses dans le futur présente les mêmes incertitudes et difficultés de modélisation que les précipitations moyennes. Pour le nord-ouest du pays, il est prédit peu de variations des précipitations intenses mais une forte variabilité en fonction des saisons. Par contre, il est prédit une hausse du nombre de jours secs consécutifs (< 1 mm de pluie), surtout marquée en été (Jouzel, 2011). Sur le site d'IMFEX²⁵, on peut obtenir ces données, en moyenne annuelle et saisonnière, calculées par les deux modèles climatiques (ARPEGE et LMDz).

3.2.1. Le risque de périodes sèches en Bretagne

Une sécheresse se caractérise par l'absence de pluies qui peut être aggravée par des températures plus élevées (sécheresse atmosphérique). Cependant, si l'on s'intéresse aux conséquences pour l'agriculture et les ressources en eau, il faut distinguer d'autres types de sécheresse (Dubreuil, 2005 ; Amigues *et al.*, 2006) :

- la sécheresse « édaphique », causée par une insuffisance de l'eau dans le réservoir superficiel du sol pendant la saison de culture. C'est la sécheresse classique en agriculture, causée par l'insuffisance des pluies de printemps et d'été ;
- la sécheresse « hydrologique », causée par une reconstitution déficiente des réserves hydrologiques et hydrogéologiques, résultant plutôt de l'insuffisance des pluies d'automne-hiver.

Schématiquement, le premier type de sécheresse joue directement sur la production agricole, le second sur l'alimentation en eau potable, et sur l'agriculture indirectement par le manque de disponibilité de l'eau pour l'irrigation.

Ces sécheresses se différencient également par leur intensité, leur durée et leur époque d'apparition par rapport au cycle cultural (Amigues *et al.*, 2006) :

- la sécheresse d'automne liée à une absence de pluies sur les sols secs en fin d'été ;
- la sécheresse d'automne-hiver liée à un déficit pluviométrique anormal en cette période, qui compromet la recharge de la réserve en eau des sols (faible après l'été) et la recharge des nappes ;
- la sécheresse de printemps souvent intermittente et durable ;
- la sécheresse d'été liée au développement de la végétation et au déficit pluviométrique estival.

Les sécheresses sont un phénomène récurrent et plutôt bien étudié en Bretagne (Mounier *et al.*, 1993, 1998 ; Dubreuil *et al.*, 1996ab ; 1998 ; Dubreuil, 1997 ; 2005 ; Dubreuil et Planchon, 2008

²⁵ <http://imfex.mediasfrance.org/web/resultats/diagmod/index>

; 2009). **Les années peu arrosées sont observées régulièrement dans l'Ouest tous les 10 à 15 ans, depuis le début du 20^{ème} siècle** (Dubreuil, 1997 ; 2005). On retrouve même des écrits d'historiens qui retracent ce genre d'épisodes aux 16^{ème} et 19^{ème} siècles (écrits de G. Le Doyen dans Marchand *et al.*, 2010 ; 2011). La sécheresse constitue un risque majeur pour la Bretagne, car ce déséquilibre entre l'offre et la demande en eau affaiblit les captages et les réservoirs pour l'alimentation en eau (vie courante, tourisme) et les réserves en eau du sol (agriculture).

Il existe une variabilité géographique en Bretagne puisque les sécheresses sont plus fréquentes dans certaines zones telles que les bassins intérieurs de Rennes et Ploërmel, le littoral et les îles, que dans d'autres telles que les reliefs des monts d'Arrée (Mounier *et al.*, 1993 ; Dubreuil, 1997 ; Dubreuil, 2005). Cette diversité est liée à la variabilité interannuelle du climat et à la diversité spatiale lithologique : les régions granitiques ont une réserve en eau du sol plus importante que les régions schisteuses. L'impact des sécheresses sur la réserve utile des sols bretons, dans le cadre du changement climatique sera étudié au chapitre 4.1.4.

A l'échelle nationale, le projet CLIMSEC²⁶ (impact du changement climatique sur la sécheresse et l'eau du sol en France ; 2008-2011) coordonné par Météo France pourrait apporter des éléments supplémentaires sur la compréhension des sécheresses au cours du 21^{ème} siècle et une mise en perspective dans le cadre des démarches pour l'adaptation au changement climatique.

3.2.2. Le risque d'inondations en France

Les crues et inondations sont occasionnées, soit en période humide par remontée de nappe et saturation du sol en eau lors des précipitations longues, mais pas nécessairement intenses - ce type de phénomène est majeur en Bretagne -, soit par de fortes pluies qui se déroulent souvent en l'espace de quelques heures et créent un fort ruissellement vers les rivières ou l'accumulation des eaux de surface dans les zones de bas relief. Elles peuvent être associées à d'autres événements extrêmes tels que les tempêtes ; en Bretagne, la conjugaison de fortes marées et de fortes précipitations crée un risque supplémentaire en zone littorale

Il n'existe pas d'études sur l'évolution des inondations en Bretagne. En Grande-Bretagne, il a été observé une forte augmentation du nombre de fermetures du barrage de la Tamise (créé pour protéger Londres des inondations), de moins de une fois par an dans les années 1980 à une moyenne de plus de six fois par an dans les années 2000 (King, 2004). Mais l'augmentation des inondations en tant que conséquence du changement climatique, n'a été prouvée jusqu'ici que dans de rares cas, comme les inondations en Angleterre et au Pays de Galles à l'automne 2000 (Pall *et al.*, 2011). Ces auteurs ont ainsi démontré que les GES émis depuis le début du 20^{ème} siècle, auraient augmenté de 20 à 90 % le risque de survenue de ces inondations en 2000.

Les zones côtières peuvent faire face à une menace supplémentaire provenant de l'élévation du niveau de la mer et des tempêtes qui peuvent provoquer des phénomènes de surcote et de submersion plus intenses (Pirazzoli *et al.*, 2006). Dans le projet REXHYSS, il a été montré que l'élévation du niveau marin due au changement climatique en fin de siècle entraînerait des inondations plus importantes de la Somme aval, notamment à Abbeville (Ducharne *et al.*, 2009). Dans le cadre de ce projet, les crues décennales et centennales ont aussi été étudiées pour la baie de la Seine (voir chapitre 4.2.1 ; Ducharne *et al.*, 2011).

Par ailleurs, le projet EXTRAFLOR²⁷ (Prédétermination des valeurs extrêmes de pluies et crues) coordonné par l'IRSTEA (ex Cemagref) de 2009 à 2013, se propose de procéder à une inter-

²⁶ <http://www.cnrm-game.fr/spip.php?article605>

²⁷ Programme ANR RiskNat : <https://extraflo.cemagref.fr/>

comparaison des principales méthodes de prédétermination des pluies et crues extrêmes utilisées en France et d'étudier leur capacité à prendre en compte les effets attendus du changement climatique. Il souhaite aussi mettre à disposition des acteurs concernés par la prévention du risque d'inondation, toute une série d'outils pratiques d'estimation en fonction des caractéristiques hydrologiques des bassins mais aussi des informations disponibles.

3.3. Les extrêmes de vents : risque de tempêtes

L'intérêt porté aux phénomènes de vents violents ou tempêtes est important à l'échelle nationale et internationale. Mais, malgré les nombreuses études menées dans divers pays, il reste encore beaucoup d'incertitudes quant à la compréhension de ces phénomènes. Par ailleurs, l'une des principales limites dans l'étude de cet événement extrême est liée au manque de corrélation entre la NAO (North Atlantic Oscillation) et les tempêtes (Planton, 2002 ; Jouan, 2003).

Une tempête correspond à une dépression atmosphérique (appelée cyclone extratropical aux latitudes moyennes) issue de la confrontation de deux masses d'air aux caractéristiques (température, humidité) bien distinctes. Les tempêtes sont caractérisées par des vents violents et de fortes précipitations. Comme pour les données de température et de précipitations, les séries de mesure de vent ne sont pas continues (Lemasson, 1999 ; Jouan, 2003). Il est donc préférable d'étudier les mesures de pression atmosphérique, plus anciennes et moins sensibles aux variations d'instrumentation, afin de décrire la variabilité des tempêtes en Europe de l'Ouest.

3.3.1. Les observations concernant les tempêtes

Des études portant sur l'hémisphère Nord ont montré une diminution de la fréquence des cyclones extratropicaux en hiver dans les moyennes latitudes depuis 1959 (McCabe *et al.*, 2001 ; Wing, 2009). De plus, les températures hivernales ont été mises en corrélation avec la fréquence des tempêtes en hiver, suggérant que le réchauffement climatique à venir pourrait entraîner un déplacement des tempêtes vers les pôles (McCabe *et al.*, 2001).

En Bretagne, les tempêtes sont des phénomènes récurrents (projet RENASEC²⁸). **Entre 1951 et 1997, Lemasson (1999) et Jouan (2005) observent une forte variabilité interannuelle des tempêtes (modifications de la vitesse moyenne, de la direction et de la fréquence des tempêtes) sur la façade maritime de l'ouest de la France.** Pirazzoli *et al.* (2004) ont aussi montré, pour la même période, une augmentation de la fréquence des vents violents dans la partie occidentale de la Bretagne et une diminution en Normandie et Pays de Loire. **Ces auteurs expliquent cette variabilité par les variations de la circulation atmosphérique, sans qu'elle soit significativement liée au changement climatique.**

Ces auteurs mettent en évidence la difficulté d'obtenir une tendance claire concernant l'évolution des tempêtes au niveau européen, une modification à l'échelle régionale ne traduisant pas forcément une modification à l'échelle de l'Atlantique Nord. De plus, il n'est pas possible de distinguer la part de variabilité naturelle et de changement climatique dans les variations des tempêtes. Cependant, **ces études ne signifient pas forcément que le changement climatique n'a ou n'aura pas d'effet sur les tempêtes, mais elles signifient qu'actuellement, les jeux de données sont trop courts (quelques décennies) pour montrer un lien avec le réchauffement global.** L'incertitude liée à ces résultats réside aussi dans la difficulté à mesurer le vent et à modéliser les situations extrêmes.

²⁸ Etude des caractéristiques et de la fréquence des événements extrêmes en France depuis 1500 : <http://gisclimat.fr/projet/renasec>

Le projet européen MICORE²⁹ (Morphological Impacts and COastal Risks induced by Extremes storm events) coordonné par l'Université de Ferrare (Italie) de 2008 à 2012, étudie les phénomènes de tempête sur l'Europe, afin d'évaluer l'évolution passée et future de ces phénomènes à des échelles locales, pour mieux comprendre le changement climatique régional et ses impacts sur les écosystèmes, les secteurs socio-économiques et la santé humaine. Il concerne 9 sites d'études dont un en France situé en Méditerranée. Le climat breton étant éloigné du climat méditerranéen, il serait plus intéressant d'analyser les résultats provenant de deux autres sites d'études, un au Royaume-Uni sur les côtes de la mer d'Irlande et un en Belgique sur les côtes de la Manche.

3.3.2. Les projections des tempêtes

Selon le GIEC (2007), le changement climatique devrait entraîner une modification de la fréquence, de l'intensité et de la trajectoire des cyclones extratropicaux. A l'échelle de l'Hémisphère Nord, selon différents modèles pour le scénario A1B du GIEC, le projet ENSEMBLES³⁰ présente peu de résultats significatifs pour la fin du 21^{ème} siècle. La fréquence des cyclones extratropicaux diminuerait en hiver mais leur intensité augmenterait dans certaines régions. De plus, la trajectoire des tempêtes se déplacerait également vers les pôles (projet UK Climate Projections³¹). Cela a aussi été observé selon le scénario A2 du GIEC (Wing, 2009 ; McDonald, 2010).

A une échelle plus régionale, plusieurs études projettent différentes évolutions des tempêtes en hiver pour la fin du 21^{ème} siècle :

- une augmentation de l'intensité mais une diminution de la fréquence à l'échelle de l'Ecosse, l'Irlande et la côte nord de la France, selon le scénario B1 (Lozano *et al.*, 2004) ;
- une augmentation de l'intensité et de la fréquence à l'échelle des îles britanniques (McDonald, 2010) ;
- une augmentation de la fréquence mais une diminution de l'intensité à l'échelle du sud-ouest du Royaume-Uni et du nord-ouest de la France (projet IMFREX ; Zacharioudaki *et al.*, 2011) selon les scénarios A1B et A2 ;
- peu de changements dans la fréquence et l'intensité des tempêtes sur le Royaume-Uni selon le scénario A1B, mais plutôt un déplacement des trajectoires des tempêtes vers le sud-ouest, lequel resterait peu affecté (projet UK Climate Projections).

Ce bilan très contrasté de l'évolution des tempêtes en fonction des modèles climatiques utilisés et de l'ampleur géographique considérée, montre bien les nombreuses incertitudes inhérentes à ces modèles climatiques ainsi qu'à la nature complexe des tempêtes et aux nombreux facteurs qui les influencent. De plus, l'un des problèmes majeurs est la convergence de grande tempête, de houle, de grande marée, de vents très violents, et de fortes précipitations dans l'arrière-pays, qui vont accentuer les dégâts occasionnés. Et si le niveau de la mer s'élève de 20 ou 30 cm, cela décuple les dégâts au moment des extrêmes (J. Jouzel, janvier 2012, dans la revue *Bretons*). En conclusion, les différents modèles climatiques ne prédisent pas de changements significatifs pour l'Europe de l'Ouest, même si plusieurs d'entre eux suggèrent une tendance à l'augmentation des tempêtes en hiver et une modification de leur trajectoire.

²⁹ Proramme EU-FP7 : <https://www.micore.eu/>

³⁰ <http://www.ensembles-eu.org/>

³¹ <http://ukclimateprojections.defra.gov.uk/content/view/12/689/>

3.4. Conclusion concernant les événements extrêmes

Ainsi, selon le GIEC (2007) le dérèglement des saisons et le déplacement des masses d'air pourraient, à long terme, accroître le nombre d'événements climatiques extrêmes. Cependant, il est difficile, voire impossible d'attribuer la cause de ces événements extrêmes à un facteur spécifique et de discerner la part de l'influence humaine, car :

- ils sont généralement dus à une combinaison de facteurs ;
- ils se produisent couramment même lorsque le climat ne change pas.

Compte tenu du manque de données et du caractère limité et parfois contradictoire des analyses, il n'existe pas de preuve indiscutable d'une augmentation durable et de grande ampleur de l'intensité et de la fréquence des cyclones extratropicaux dans l'hémisphère Nord, ni des tempêtes dans le nord-ouest de la France. Les effets des tempêtes locales devraient donc varier d'une région à l'autre, en fonction de l'exposition du site local et des changements possibles dans les trajectoires prédominantes des perturbations atmosphériques.

Le récent rapport intermédiaire du GIEC sur les événements extrêmes (novembre 2011) ne fait que confirmer cette incertitude. Il insiste sur l'augmentation importante des dégâts liés aux tempêtes et autres événements extrêmes, mais cette augmentation est due à l'accroissement de la vulnérabilité des territoires (par l'accroissement des biens et des personnes dans les territoires sensibles).

3.5. Les perspectives de recherche sur les événements extrêmes

Les laboratoires de recherches français spécialisés dans les études du climat, mais aussi les services de recherche et développement d'Electricité de France (EDF) et du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment de Nantes (CSTB), sont impliqués dans le développement des connaissances sur les événements extrêmes. Suite au projet IMFREX, la valorisation des résultats est destinée à alimenter les réflexions d'EDF³² sur le réseau de transport de l'électricité et du CSTB³³ sur les bâtiments, afin de développer des solutions techniques pour diminuer la vulnérabilité. Les événements extrêmes et leur analyse intéressent aussi naturellement le domaine des assureurs, de par leur vocation à couvrir une partie des dégâts provoqués par les catastrophes naturelles.

Le GDR RICLIM a pour objectif de dégager un point de vue clair sur les risques climatiques et de formuler des propositions d'application concrètes. Sa vocation est donc d'étudier des thèmes de recherche sur lesquels les différentes disciplines représentées peuvent combiner leurs approches.

3.5.1. Les projets finalisés

Le projet IMFREX³⁴ (IMpact des changements anthropiques sur la FRéquence des phénomènes EXtrêmes de vent, de température et de précipitations en France), porté par Météo France entre 2003 et 2005, avait pour but d'évaluer l'impact d'un changement climatique d'origine anthropique sur la fréquence des phénomènes extrêmes (tempêtes, pluies abondantes, sécheresses, canicules et vagues de froid) en France. Pour cela, ils ont évalué l'évolution passée à partir

³² <http://imfrex.mediasfrance.org/web/projet/justification/situation/electricite.fr.php>

³³ <http://imfrex.mediasfrance.org/web/projet/justification/situation/batiment.fr.php>

³⁴ Programme GICC (financé par le MEDDTL) : <http://imfrex.mediasfrance.org/web/>

d'observations et l'évolution future à partir de simulations réalisées par Météo France et l'IPSL, pour des projections de fin de siècle utilisant le scénario A2 du GIEC. Le principal objectif était de mettre au point des outils et méthodes permettant aux pouvoirs publics d'optimiser les stratégies de prévention et d'adaptation au changement climatique.

Le projet REVAEE³⁵ (REgionalisation et VAriabilité des Événements Extrêmes) du laboratoire de Météorologie Dynamique de l'IPSL, qui s'est déroulé entre 2007-2011, se propose d'apporter une meilleure connaissance des mécanismes liés à la variabilité spatiale et temporelle des événements extrêmes (tempêtes et les vagues de chaleur). Ils mettent l'accent sur l'effet de la vapeur d'eau dans la dynamique et l'intensification des dépressions atmosphériques et l'effet de l'humidité du sol dans la dynamique des canicules. Ils souhaitent aussi développer des simulations à haute résolution sur l'Europe Occidentale, afin de mieux quantifier l'impact à l'échelle régionale des événements extrêmes et plus généralement des changements climatiques.

Le projet « Dynamique des masses d'air et risques climatiques dans le Grand Ouest³⁶ » porté par le laboratoire COSTEL s'est déroulé entre 2008 et 2011. Il se propose d'étudier la dynamique de circulation atmosphérique sur l'Europe occidentale depuis un siècle et ses impacts sur les risques climatiques, afin de dresser une régionalisation de ces risques. La démarche proposée vise à étudier les situations à risque à partir des masses d'air synoptiques (à l'échelle de l'Europe), à évaluer la vulnérabilité des sociétés aux risques climatiques (sécheresses, inondations, etc.) et à spatialiser ces risques à une échelle régionale, échelle où les acteurs sont à même d'intervenir.

3.5.2. Les projets en cours

Le projet RENASEC³⁷ (Etude des caractéristiques et de la fréquence des événements extrêmes en France) porté par le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement de l'IPSL de 2008 à 2012, se propose d'étudier les événements météorologiques extrêmes (inondations, sécheresses, tempêtes, etc.) depuis 1500, dans 5 régions françaises dont le Grand Ouest (Bretagne et Normandie, pour les inondations et les tempêtes maritimes). Ils souhaitent déterminer si ces phénomènes extrêmes ont évolué en amplitude et en fréquence avec le changement climatique actuel puis modéliser l'impact de ces événements extrêmes sur les sociétés actuelles. Dans ce cadre, la thèse de J. Desarthe a été soutenue en octobre 2011.

Le projet JOHANNA³⁸ (Analyse systémique des dommages générés par les vagues de tempête Johanna : 10-12 mars 2008), porté par le BRGM de 2010 à 2013, se propose de développer une méthodologie, reproductible sur d'autres sites, d'étude des processus de dommages à partir d'un événement de tempête côtière récente. Cela prépare la mise en place de mesures de prévention ou de réduction des dommages et d'adaptation aux conséquences du changement climatique

Dans le cadre de l'initiative internationale ACE (Attribution of Climate-Related Events), plusieurs centres de recherche travaillent sur la création d'un système opérationnel capable de répondre rapidement et de façon objective sur la probabilité d'attribution d'un événement extrême au réchauffement du climat. Des premiers résultats sur la validité des modèles sont attendus en 2012-2013 (article paru dans Le Journal de l'Environnement, 31/10/2011).

³⁵ Financé par la Fondation MAIF : <http://www.fondation-maif.fr/fondation/notre-action/projets-soutenus/risques-naturels/revaae.html>

³⁶ Programme "Evolution Climatique, Risques Engendrés et Impact sur la Société" (Financé par la Fondation MAIF) : <http://www.fondation-maif.fr/fondation/notre-action/projets-soutenus/risques-naturels/dynamique-masses-air-et-risques-climatiques.html>

³⁷ Programme GIS Climat : <http://gisclimat.fr/projet/renasec>

³⁸ Programme ANR - CEP&S : Changements Environnementaux Planétaires et Société (Financé par la MAIF).

CONCLUSION DE LA 1^{ÈRE} PARTIE : L'ÉVOLUTION DU CLIMAT EN BRETAGNE

En Bretagne, les observations concernant l'évolution des températures moyennes montrent une tendance nette à l'augmentation au cours du 20^{ème} siècle, laquelle devrait s'amplifier au 21^{ème} siècle et accentuer les vagues de chaleur. Concernant les précipitations moyennes et extrêmes, les tendances sont moins nettes et montrent plutôt une évolution saisonnière marquée principalement par une baisse en été et une hausse en hiver. Toutefois, il est difficile de préciser si ces modifications sont liées au changement climatique, à la variabilité naturelle forte de ce phénomène ou à des changements anthropiques plus locaux. Si ces tendances s'accroissent au cours du 21^{ème} siècle, elles suggèrent une augmentation des périodes sèches et des périodes humides. En parallèle, les phénomènes de tempête ne montrent pas de tendance nette, mais seraient susceptibles d'augmenter en période hivernale au cours du 21^{ème} siècle.

Ainsi, la vitesse et l'ampleur de ces changements sont marquées d'une incertitude significative qui nécessiterait plus de recherche et des séries d'observations beaucoup plus longues, afin de discriminer changements climatiques, changements anthropiques locaux et variabilité naturelle. Ces incertitudes sont encore plus importantes pour les événements extrêmes car étant relativement rares, ils peuvent être plus issus de la variabilité climatique et il est donc plus difficile de lier leur évolution aux effets du changement climatique. Enfin, il est nécessaire dès aujourd'hui d'anticiper les conséquences du changement climatique afin de minimiser les impacts socio-économiques afférents et réduire la vulnérabilité des territoires et acteurs concernés. Il s'agit alors de définir et d'évaluer les effets du changement climatique auxquels les acteurs devront faire face afin d'envisager par la suite les mesures d'adaptation les plus appropriées.

2^{EME} PARTIE : LES EFFETS ET IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

La première partie de ce rapport s'est intéressée aux effets observés du changement climatique sur le climat, lesquels montrent une nette évolution pour certains paramètres (température) mais beaucoup d'incertitudes pour les autres paramètres (précipitations, tempêtes) et aux projections climatiques qui tendent vers une accentuation du réchauffement, des phénomènes de sécheresse estivale, de fortes pluies hivernales et de l'intensité des tempêtes en France. Néanmoins, malgré l'incertitude sur la vitesse et l'ampleur de ces changements, leur réalité rend nécessaire de pouvoir anticiper les conséquences du changement climatique afin de minimiser les impacts socio-économiques et environnementaux. Cette deuxième partie traite donc des effets du changement climatique sur les ressources naturelles continentales (sol, eau) et le milieu marin et côtier ; et des impacts sur l'agriculture et la biodiversité marine et côtière.

Deux grandes approches sont développées : (1) regarder les données anciennes et analyser en quoi le climat a modifié les ressources ; (2) utiliser les modèles et les scénarios climatiques pour porter des projections sur l'état futur des ressources. Dans la première approche, il faut disposer de longues séries d'observations. Dans la seconde approche, il faut disposer de modèles qui représentent bien les réalités physiques, chimiques et biologiques de l'environnement, pour les utiliser dans des conditions climatiques, pour lesquelles, par nature, ils n'ont pas été calibrés. Les incertitudes sur les scénarios climatiques, les imprécisions inhérentes à tout recours à une modélisation, amènent des incertitudes fortes sur le diagnostic porté sur l'évolution des ressources dans le contexte du changement climatique.

Nota bene : **Tous les résultats et informations spécifiques concernant la Bretagne sont en gras soulignés dans le texte.**

Chapitre 4. Les effets du changement climatique sur les sols et l'eau

Dans cette partie, nous nous basons principalement sur les résultats prochainement publiés du projet PSDR-GO CLIMASTER³⁹ (changements CLIMAtiques, Systèmes agricoles, ressources naturelles et développement TERRitorial). Ce projet a été coordonné par l'INRA de Rennes (UMR Sol, Agro et hydrosystème, Spatialisation) de 2008 à 2011 et porte sur le changement climatique et ses interactions avec les systèmes agricoles, les ressources naturelles et le développement territorial. Il a pour échelle d'observations 4 régions du Grand Ouest (Basse Normandie, Bretagne, Pays de Loire et Poitou-Charentes). Ses principaux objectifs sont :

- de caractériser la réalité du changement climatique dans le Grand Ouest et ses impacts sur le sol, l'eau et l'agriculture ;
- d'identifier et de caractériser les réponses actuelles des principaux acteurs (acteurs agricoles et acteurs de l'eau) à la perception qu'ils ont du changement climatique ;
- d'apporter une contribution opérationnelle au développement territorial à travers la fourniture d'outils et méthodes pour ses acteurs, dans une démarche de co-construction.

Nous ferons donc référence à quelques chapitres de l'ouvrage final (le climat change dans le Grand Ouest ; évaluation, impact, perception) qui devrait être publié aux Presses universitaires de Rennes, au premier semestre 2012. Par ailleurs, il faut noter qu'il n'existe pas de longues séries d'observation des sols et de l'eau permettant d'observer un signal de changement à long terme.

4.1. Les sols	40
4.1.1. Le carbone organique des sols	41
4.1.2. Les émissions de GES par les sols : le méthane et le protoxyde d'azote.....	44
4.1.3. L'érosion des sols	45
4.1.4. La réserve utile des sols.....	46
4.1.5. Conclusion concernant les sols.....	50
4.2. L'eau.....	50
4.2.1. L'intrusion d'eau salée dans les aquifères et les sols côtiers.....	51
4.2.2. Le débit des cours d'eau.....	51
4.2.3. L'extension des zones humides en Bretagne : projet CLIMASTER	55
4.2.4. La qualité des eaux en Bretagne : projet CLIMASTER.....	55
4.2.5. Conclusion concernant les eaux	58

³⁹ Programme Pour et Sur le Développement Régional dans le Grand Ouest : <http://www.rennes.inra.fr/climaster>

4.1. Les sols

Les sols sont un support dans la plupart des activités humaines. Ils jouent un rôle essentiel dans l'environnement, car ils sont à l'interface avec les autres milieux : atmosphère, biosphère, eaux superficielles et souterraines, sous-sol. Ils sont d'une grande diversité et possèdent de multiples fonctions pour l'environnement :

- support physique, réserve d'eau et source d'éléments nutritifs pour les cultures ;
- milieu vivant, où l'on trouve un grand nombre d'espèces, telles que les microorganismes qui vont participer aux cycles des éléments (carbone, azote, soufre, etc.) ;
- lieu de stockage et de filtration de l'eau ;
- rôle clé dans le stockage du carbone et l'atténuation de l'effet de serre, etc.

En échangeant en permanence des GES (CH_4 , CO_2 , N_2O) avec l'atmosphère, les sols représentent un compartiment majeur des cycles globaux du carbone et de l'azote (Fig. 28). Les sols se forment et évoluent d'une part, naturellement sous l'effet principal du climat, des flux d'eau et d'énergie le traversant et de l'activité biologique, et d'autre part, sous l'impact des activités humaines (GIS Sol, 2011).

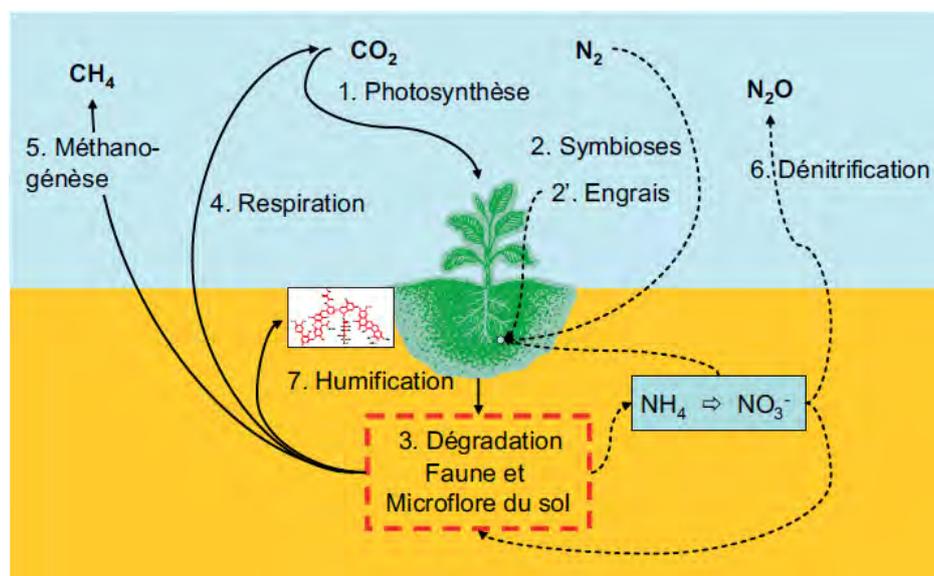


Figure 28 : Représentation simplifiée des gaz à effet de serre dans les sols (Source : GIS Sol, 2011, d'après Balesdent *et al.*, 2011 cités dans GIS Sol, 2011).

La modification des régimes hydriques et thermiques et l'augmentation de la fréquence de certains événements extrêmes seraient les principaux impacts induits par le changement climatique sur les sols (GIS Sol, 2011) :

- l'accroissement probable des précipitations extrêmes est susceptible d'accélérer l'érosion des sols et l'occurrence de coulées d'eau boueuse ainsi que les processus de lessivage des particules fines et des cations (calcium, magnésium, potassium, sodium, etc.) en profondeur, pouvant modifier la capacité des sols à stabiliser le carbone organique⁴⁰ ;
- l'augmentation des températures, en agissant directement sur l'activité microbienne des sols, peut être à l'origine de l'accélération de certains processus, comme par exemple la minéralisation de la matière organique. Inversement, l'augmentation des températures et de la

⁴⁰ Des cas extrêmes d'appauvrissement en cations peuvent conduire à une baisse du pH accompagnée de carences ou de toxicités pour les plantes (GIS Sol, 2011).

concentration en CO₂ dans l'atmosphère, en favorisant la productivité végétale dans certaines régions, pourraient être à l'origine d'entrées de carbone plus importantes dans les sols ;

- l'augmentation de la fréquence des sécheresses et des incendies de forêts est susceptible de modifier le cycle des éléments minéraux, de l'azote et du carbone organique. Dans des milieux naturellement engorgés (estuaires, etc.), un assèchement peut aussi conduire à la formation d'acides et à une baisse du pH, toxiques pour les cultures ;

- l'augmentation de la fréquence des tempêtes pourrait perturber la structuration verticale (en horizons) des sols forestiers à cause des chablis⁴¹. Dans les milieux côtiers, l'augmentation des tempêtes et l'élévation du niveau de la mer peuvent conduire à des inondations plus fréquentes, affectant certaines propriétés du sol (pH, salinité, etc.).

Cependant, actuellement, il est difficile de prévoir quels seront les effets réels du changement climatique sur les sols français. On peut toutefois supposer que ses effets devraient se différencier selon les régions, en fonction de l'évolution spatiale du climat, des types de sol et des stocks de carbone présents aujourd'hui et des conditions locales.

Compte tenu de leurs fonctions essentielles et des risques de dégradation qu'ils peuvent encourir avec les activités humaines et éventuellement avec le changement climatique et les activités humaines, il est nécessaire d'avoir une bonne gestion de cette ressource, laquelle nécessite au préalable une évaluation de l'état des sols et un suivi de leur évolution à long terme. A l'échelle de la Bretagne, le programme Sols de Bretagne⁴² a été développé depuis 2005 par de nombreux partenaires autour d'Agrocampus Ouest. Ce programme est la déclinaison à l'échelle régionale de deux programmes nationaux, le programme Inventaire, Gestion et Conservation des Sols (IGCS) et le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS). Ce dernier repose sur l'installation et l'observation, à pas de temps réguliers (tous les 10-12 ans), de près de 110 sites de suivi en Bretagne avec un volet régional complémentaire sur la biodiversité des sols, suivie par l'Université de Rennes 1.

Dans le cadre de notre étude sur les effets du changement climatique sur les sols, nous sommes focalisé sur les teneurs en carbone organique, le phénomène d'érosion et la réserve utile des sols.

4.1.1. Le carbone organique des sols

Les sols, plus grands réservoirs terrestres de carbone organique (constituant principal des matières organiques contenues dans les sols), peuvent représenter un puits ou une source de CO₂ atmosphérique, susceptibles d'influencer ou d'atténuer le changement climatique. Généralement, ce sont les 30 premiers centimètres du sol qui contiennent le stock de carbone le plus important. La teneur en carbone d'un sol est fonction d'un bilan qui comprend, d'une part les flux entrants dans le sol (par exemple l'apport de matière organique par les résidus végétaux) et d'autre part les flux sortants, principalement associés à la minéralisation des matières organiques dans le sol. Ce bilan peut être positif (stockage), négatif (déstockage) ou nul. Par ailleurs, ces stocks sont dépendants des activités humaines, mais aussi du climat, qui influence la production végétale et l'activité des microorganismes (GIS Sol, 2011).

➤ Les observations en Bretagne

⁴¹ Les zones de chablis correspondent aux arbres déracinés à cause des tempêtes, qui vont se décomposer et influencer la composition des différentes couches du sol (= horizons).

⁴² <http://www.sols-de-bretagne.fr/>

L'évolution des teneurs en carbone des sols français est présentée par le GIS Sol⁴³ dans la base de données Carbone France⁴⁴. On observe ainsi que les stocks de carbone des sols bretons varient entre 50 et plus de 70t de carbone/ha. Par ailleurs, **entre 1980 et 2004, on observe une tendance à la baisse de ces stocks, en particulier dans le Morbihan et le Finistère** (Fig. 29). Ces baisses sont attribuées à des changements de pratiques culturales et d'occupation des sols plutôt qu'au changement climatique, dont les effets restent très incertains et difficilement mesurables sur 20 ans d'observations (GIS Sol, 2011).

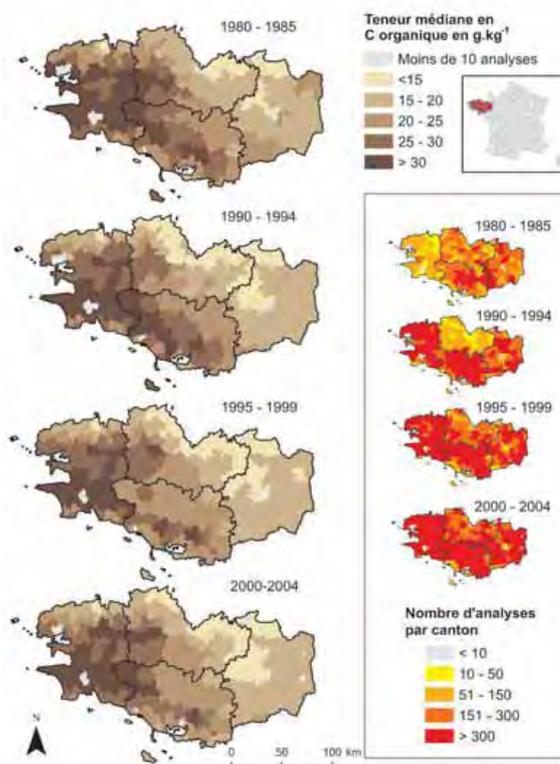


Figure 29 : Evolution des teneurs médianes cantonales en carbone organique des sols bretons, entre les périodes 1980-1985, 1990-1994 et 1995-1999 (Sources : GIS Sol, BDAT, 2011 ; IGN, Geofla®, 2006 cités dans GIS Sol, 2011).

➤ Les projections pour les sols bretons

Le projet Landsoil⁴⁵ (Landscape design for soil conservation under land use and climate change) en cours de 2009 à 2012 et coordonné par l'UMR SAS (INRA-Agrocampus Ouest de Rennes), analyse l'évolution des sols agricoles à moyen terme, à des échelles de temps allant de la décennie au siècle, en anticipant des changements de structure paysagère et de climat. Les résultats attendus ont pour but d'améliorer les connaissances et la méthodologie scientifiques afin de réaliser un outil de simulation de la structure paysagère, définir des indicateurs de vulnérabilité des sols et des stratégies de gestion territoriale.

Dans le cadre des projets Landsoil et CLIMASTER, des travaux ont été effectués afin de modéliser la dynamique du carbone organique dans un contexte de changement climatique, dans l'un des observatoires à long terme, la zone atelier de Pleine-Fougères (35). Ces résultats prochainement publiés dans l'ouvrage CLIMASTER, sont brièvement présentés ci-après.

⁴³ <http://www.gissol.fr/index.php>

⁴⁴ <http://www.gissol.fr/programme/bdcf/bdcf.php>

⁴⁵ Landsoil : structure du paysage et conservation des sols sous des conditions évolutives d'occupation du sol et de climat - Programme ANR VMCS (Vulnérabilité : Environnement, Climat, Sociétés) : <http://www.inra.fr/landsoil>

La dynamique du carbone du sol a ainsi été simulée sur la période 2010-2100 selon le scénario A1B du GIEC, avec le modèle RothC pour deux systèmes de culture (rotation maïs/ blé, prairie de longue durée). Pour cela, Denès et Viaud (CLIMASTER, à paraître) ont utilisé comme entrées du modèle, le stock de carbone initial dans le sol, la teneur en argile, les apports mensuels de carbone et les données climatiques mensuelles (température, pluviométrie, évapotranspiration). Pour les simulations des données climatiques (par le modèle ARPEGE), il a été supposé que le climat sur la période 2010-2100 présentait la même variabilité que le climat observé sur la période 1970-2000. Les résultats concernant les indices climatiques, montrent une diminution des précipitations, essentiellement d'avril à septembre et une augmentation de la température et de l'évapotranspiration. **Les résultats concernant les stocks de carbone tendent à montrer qu'au nord de l'Ille-et-Vilaine, le changement climatique se traduit par un déstockage du carbone du sol, pour l'horizon de surface 0-30 cm, comme pour les horizons organo-minéraux plus profonds et pour les deux systèmes de culture considérés** (Denès et Viaud, CLIMASTER, à paraître).

Des travaux réalisés à l'échelle nationale, dans le cadre du projet CLIMATOR⁴⁶, ont simulé l'évolution du stockage de carbone dans le sol sous changement climatique (scénario A1B du GIEC), selon les systèmes de culture et la localisation (Brisson et Levraut, 2010). Ces résultats ont montré que l'impact du changement climatique sur le stockage/déstockage de carbone des sols variait principalement selon les points suivants :

- un ensemble complexe d'interactions (par exemple, interaction climat/sol/plante ou interaction température/CO₂) ;
- le système de culture, qui intervient au niveau de la quantité de résidus ou amendements apportés (un apport de fumier contribue à augmenter le stockage de carbone), au niveau du degré de recouvrement du sol (un faible recouvrement du sol favorise des températures de sol et des vitesses de minéralisation plus élevées) et au niveau des pratiques culturales (culture irriguée ou pluviale).

Par ailleurs, l'adaptation thermique des microorganismes du sol a démontré que ce mécanisme peut jouer un rôle non négligeable en réduisant les pertes de carbone par minéralisation (Brisson et Levraut, 2010). **Les effets à long terme du changement climatique restent encore très incertains, qui plus est, ils sont sous la dépendance de facteurs pouvant avoir des effets opposés.** L'augmentation de la température, en allongeant la période de croissance des végétaux, pourrait avoir, dans certains cas, des effets positifs sur les flux entrants de carbone dans les sols. Inversement, ce réchauffement devrait favoriser l'activité microbienne et ainsi accélérer la biodégradation des matières organiques. Il serait donc nécessaire de pouvoir approfondir et conforter les résultats obtenus pour la Bretagne, en prenant en compte plus finement dans les simulations les points suivants (Denès et Viaud, CLIMASTER, à paraître) :

- les interactions entre température, humidité, teneur en CO₂, rendements et activités des microorganismes du sol ;
- la question de l'apport de matière organique exogène, par les effluents d'élevage ;
- des scénarios prospectifs d'évolution des systèmes de cultures en lien avec l'adaptation de l'agriculture au changement climatique.

➤ La question du stockage de carbone

Le maintien d'une teneur importante en matières organiques dans les sols est essentiel vis-à-vis d'un grand nombre de propriétés des sols (stabilité de leur structure et limitation de l'érosion, rétention en eau et en certains éléments nutritifs, activité biologique, etc.), ainsi que vis-à-vis des services écosystémiques qu'ils rendent : adaptation au changement climatique des secteurs agricoles

⁴⁶ Programme ANR VMCS (Vulnérabilité : Environnement, Climat, Sociétés) : http://w3.avignon.inra.fr/projet_climator/

et forestiers, limitation des inondations et des coulées boueuses, etc. Différentes actions permettent d'augmenter ces stocks de façon significative à l'échelle du territoire (GIS Sol, 2011) :

- les changements d'usage des sols (afforestation et conversion de cultures en prairies permanentes) ;
- l'adoption de techniques culturales simplifiées ;
- l'implantation de cultures intermédiaires ;
- l'enherbement des vignes et des vergers ;
- les apports de matières organiques exogènes (composts, fumiers, etc.).

Toutefois, l'atténuation du changement climatique par le stockage de carbone organique dans les sols est limitée dans le temps comme dans l'espace. En effet, à climat constant, tout changement d'usage ou de pratique finit par atteindre un nouvel état d'équilibre après quelques décennies et ne génère donc plus de stockage additionnel. **Le stockage de carbone dans les sols ne représente donc pas une solution à long terme, à la lutte contre le changement climatique** (GIS Sol, 2011).

4.1.2. Les émissions de GES par les sols : le méthane et le protoxyde d'azote

Le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote ou oxyde nitreux (N₂O) sont les deux autres principaux gaz, qui avec le CO₂, accentuent l'effet de serre. Entre 1750 et 2005, les concentrations atmosphériques de CH₄ et de N₂O ont augmenté respectivement de 150 % et de 18 % (GIEC, 2007). Pour ces deux gaz à effet de serre, les sols sont une source majeure d'émission, en particulier les sols appauvris en oxygène. En effet dans ces sols, certains microorganismes vont dégrader les matières organiques du sol et les transformer en CO₂ et en CH₄ ; et les populations microbiennes vont modifier leur mode de respiration et consommer les ions nitrate (NO³⁻) et nitrite (NO²⁻) présents dans le sol (dénitrification), ce qui peut amener à produire du N₂O ensuite diffusé dans l'atmosphère (Fig. 2 ; GIS Sol, 2011).

Ces émissions présentent une variabilité spatiale et temporelle importante, principalement due au fait que l'activité des microorganismes est fortement dépendante du climat. En effet, elle est plutôt faible lorsque les températures sont froides et inversement lorsque les températures sont chaudes (jusqu'à un optimum entre 30 et 40°C). De plus, la pluviosité a un effet important puisqu'elle peut générer des engorgements temporaires (qui appauvrissent le sol en oxygène) favorables à l'émission de CH₄ ou de N₂O. Les activités humaines (mode d'occupation des sols et pratiques culturales) ont aussi un rôle important, par exemple, l'irrigation favorise l'émission de ces gaz, en augmentant l'occurrence des situations d'excès d'eau dans le sol à l'inverse du drainage artificiel qui est plutôt défavorable aux émissions. L'utilisation d'engrais organiques (fumiers, lisiers, etc.) peut, selon le type d'engrais, augmenter ou diminuer les émissions. La fertilisation minérale augmente les émissions de CH₄ et de N₂O dans une proportion variable selon le type d'engrais, les quantités appliquées et le mode d'application (GIS Sol, 2011).

Dans le contexte du changement climatique, nous n'avons pas répertorié d'études spécifiques concernant l'évolution observée et projetée de l'émission de ces GES par les sols. Si le changement climatique augmentait l'activité des microorganismes du sol et donc les émissions de CH₄ et de N₂O, il y aurait modification de l'effet tampon⁴⁷ du sol qui entrainerait des rétroactions positives (accentuation de l'effet de serre). Cependant, actuellement, ces flux vers l'atmosphère s'exercent sur de courtes périodes, liées à des fluctuations climatiques ou aux périodes d'épandage des engrais (GIS Sol, 2011). **Ces mécanismes sont complexes et il est extrêmement difficile de faire**

⁴⁷ L'effet tampon correspond à l'absorption des GES atmosphériques qui atténue le changement climatique.

un bilan exact de ces émissions en France. Il serait intéressant d'améliorer les connaissances sur les émissions de ces GES par le sol, afin de mieux prendre en compte les rétroactions du sol sur le climat.

4.1.3. L'érosion des sols

Un autre effet potentiel du changement climatique sur les sols est le phénomène d'érosion. En effet, l'accroissement de phénomènes pluviométriques extrêmes et de tempêtes serait susceptible d'augmenter les pertes en sol et la probabilité d'occurrences de coulées d'eau boueuse. Une érosion hydrique des sols peut provoquer, à long terme, une dégradation irréversible des sols. Par ailleurs, elle peut être accélérée par les activités humaines comme l'artificialisation des sols, certaines pratiques culturales (sol nu en hiver, cultures peu couvrantes, etc.), le surpâturage, la déforestation, etc. (GIS Sol, 2011).

A l'échelle nationale, l'érosion des sols affecte environ 18 % du territoire et elle est particulièrement forte en Bretagne (Fig. 30).

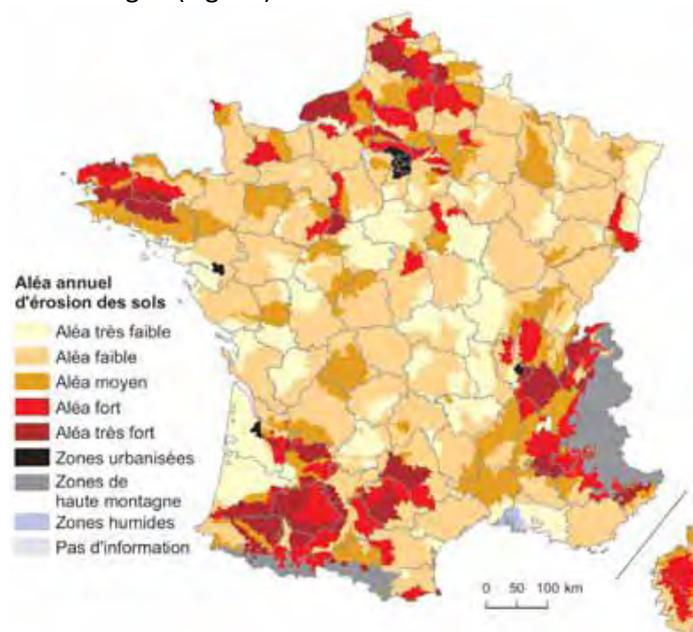


Figure 30 : Aléa d'érosion des sols par petite région agricole (Source : GIS Sol-INRA-SOeS, 2011 cités dans GIS Sol, 2011).

Les phénomènes d'érosion, en plus d'avoir un impact sur les sols, peuvent entraîner des dégâts sur les cultures (arrachement des plants ou des semis, formation de rigoles et de ravines gênant les interventions culturales, déclin de la biodiversité des sols, etc. ; GIS Sol, 2011) ainsi que sur la qualité de l'eau (transfert de matières en suspension, de phosphore particulaire, etc.). Quelques études, comme le projet Landsoil, traitent spécifiquement des effets du changement climatique sur l'érosion des sols. Il est important de surveiller ce type de dégradation afin de prévenir d'une accentuation liée aux pressions humaines d'une part et/ou au changement climatique d'autre part, et de pouvoir définir les zones à risque dans un but d'anticipation.

Dans le cadre du projet CLIMASTER, il a été étudié la variabilité de l'aléa érosif à l'échelle interrégionale en fonction du changement climatique. A partir de deux zones tests situées en Basse-Normandie (Bassin Versant de la Seulles) et en Bretagne (Zone Atelier de Pleine-Fougères), il s'agissait de poser un diagnostic de l'aléa érosion des sols en mobilisant les modèles SCALES (Spatialisation d'éChelle fine de l'ALéa Erosion des Sols ; Le Gouée *et al.*, 2010) et MESALES et de tester la variabilité des résultats de la modélisation de l'aléa érosif en fonction de scénarii d'évolution

climatique. Les résultats seront publiés dans l'ouvrage final de CLIMASTER (B. Lemerrier, P. Le Gouée, D. Delahaye et C. Walter, CLIMASTER, à paraître).

4.1.4. La réserve utile des sols

Le stockage d'eau par les sols permet d'alimenter en eau les plantes et l'ensemble des êtres vivants présents dans le sol. Cependant, la végétation ne peut utiliser qu'une partie de l'eau stockée dans le sol : la valeur maximale de cette eau stockée utilisable est appelée réserve utile en eau (RU). La RU d'un sol dépend de la texture, de la structure et de la profondeur du sol, ainsi que de sa profondeur d'enracinement maximale. Par exemple, un sol limoneux de 1,20 m d'épaisseur peut contenir 380 mm d'eau, avec une RU de 250 mm ; alors que pour un sol sableux de même épaisseur, la teneur en eau totale est de 130 mm et sa RU de 80 mm. Ainsi, les sols dont la RU est importante présentent moins de risque de sécheresse pour les cultures, d'où un recours moindre à l'irrigation sur ces sols (GIS Sol, 2011).

En agriculture, on étudie principalement le bilan hydrique, qui représente la variation du stock d'eau de la réserve en eau des sols entre sa valeur maximale (RU) et sa valeur minimale, sous l'effet des apports d'eau et de sa consommation par les plantes. On distingue deux types d'évapotranspiration : l'évapotranspiration potentielle (ETP) qui est la somme de l'évaporation du sol et de la transpiration de la végétation en alimentation hydrique non limitante et l'évapotranspiration réelle (ETR) qui représente ce qui est réellement transpiré par la plante. Le calcul de l'évapotranspiration potentielle qui évalue les besoins en eau d'une culture sous l'influence du climat, permet de comparer ces besoins avec les possibilités d'alimentation en eau liées à la pluviosité (Mounier *et al.*, 1998). Ainsi, une RU peu remplie, associée à de faibles précipitations, peut engendrer un déficit d'évaporation (DE), défini par une ETR inférieure à l'ETP (noté : $DE = ETP - ETR$).

➤ Exemple de bilan hydrique spatialisé à échelle fine dans le Calvados

Une méthode de spatialisation d'échelle fine des bilans hydriques a été réalisée et appliquée dans le Calvados (Basse-Normandie), afin de mieux connaître la diversité géographique des disponibilités en eau dans le sol (Cantat *et al.*, 2010). Cette méthode permet d'intégrer des données à très fine échelle des conditions de sols (RU) et de relief (pente, exposition), en plus des données climatiques de base. Cette nouvelle lecture des contraintes hydriques, plus en accord avec les réalités du terrain, peut s'avérer utile pour les acteurs en charge de la gestion et de l'aménagement du territoire mais aussi pour l'agriculteur, puisque la fine résolution spatiale permet d'identifier les parcelles les plus affectées par le déficit en eau des sols.

Très récemment, l'établissement d'une carte des sols au 1/25000 sur le Calvados a permis d'accéder à cette connaissance intime des variations spatiales de la réserve utile (Le Gouée, 2008). Cette cartographie des sols s'appuyait sur environ 7000 sondages pédologiques, représentant une épaisseur cumulée de plus de 3500 m et a permis de réaliser une cartographie des RU à l'échelle du département. Ainsi, la valeur généralement retenue par défaut pour la RU de 100 mm a pu être remplacée par des valeurs réelles, comprises entre 10 et 235 mm (Fig. 31 ; Cantat *et al.*, 2010).

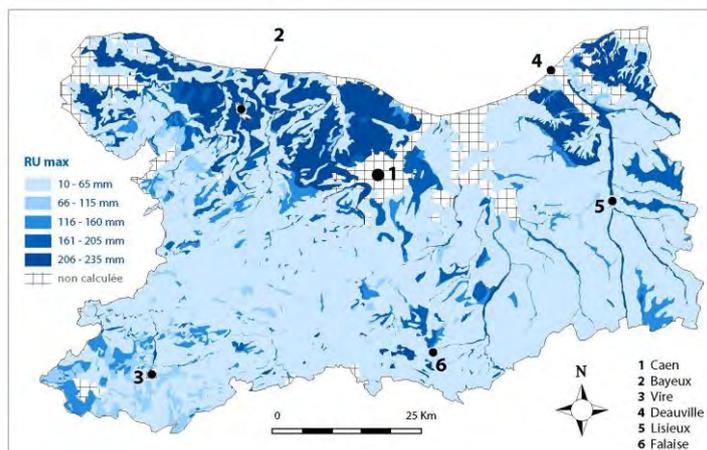


Figure 31 : Réserve utile en eau du sol dans le Calvados (les secteurs représentés par un quadrillage correspondent aux espaces non agricoles : zones urbaines et zones humides des basses vallées) (Cantat *et al.*, 2010).

Il a ensuite été possible de réaliser une cartographie du bilan hydrique dans le Calvados à partir des données réelles de RU, de pluie et d'évapotranspiration. On peut observer que l'utilisation de données réelles de RU pour le calcul du bilan hydrique module la répartition et l'intensité des stress hydriques vécus par les plantes (Fig. 32 ; Cantat *et al.*, 2010). Par ailleurs, ces données sont bien représentatives de la réalité des faits observés par les agriculteurs dans ce département.

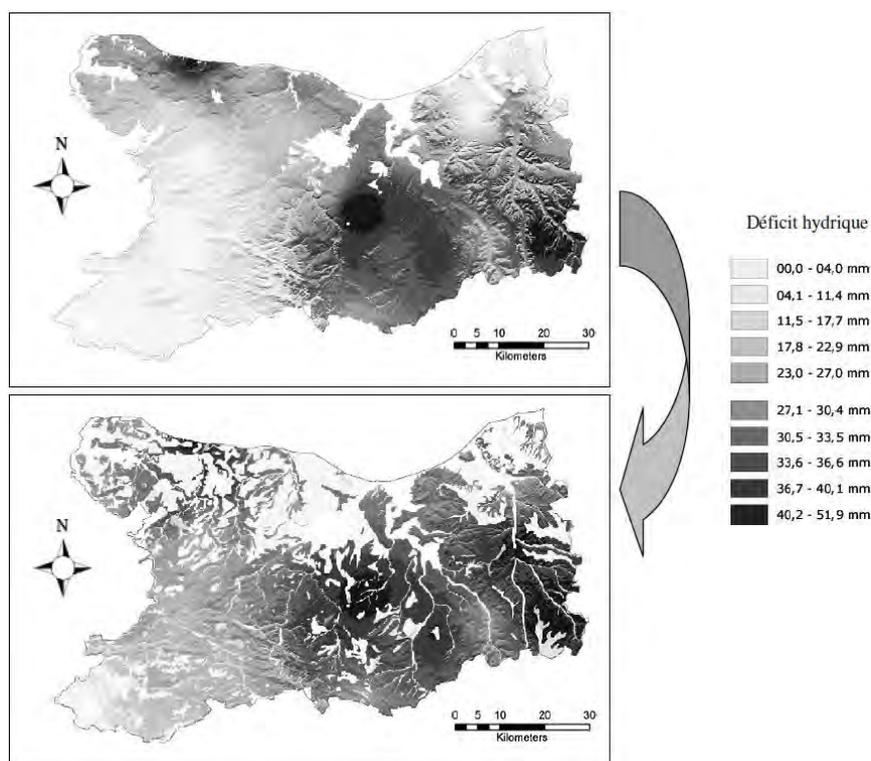


Figure 32 : Déficit hydrique dans le Calvados en juillet (moyenne 2003-2007) : déficit calculé en prenant en compte le relief et une RU fixe de 100 mm (en haut) ou une RU « vraie » (en bas) dont les valeurs varient entre 10 et 235 mm en fonction de la texture, de l'épaisseur et du pourcentage en éléments grossiers des sols (Cantat *et al.*, 2010).

Les résultats de déficit hydrique ont ensuite été projetés pour 2100. Ils témoignent d'un accroissement spectaculaire des surfaces agricoles touchées par une sécheresse des sols de forte intensité. Celles-ci représenteraient près de 2500 km², soit 70 % de la Surface Agricole Utile (SAU) déclarée. Prochainement, ces résultats seront affinés par la création d'une nouvelle couche d'informations (pondération des valeurs de RU en fonction des mouvements gravitaires de l'eau dans

le versant) et par l'intégration d'un module de spatialisation « raisonnée » des précipitations (travaux en cours ; Cantat *et al.*, 2010).

➤ **L'impact des sécheresses sur le bilan hydrique des sols bretons : spatialisation à échelle fine**

Une récente étude a suivi l'impact des sécheresses en Bretagne sur la ressource en eau des sols depuis le 19^{ème} siècle, en utilisant un modèle de bilan hydrique sur 5 sites du territoire breton : Plougonvelin (29) et l'île de Bréhat (22) correspondent aux climats très humides de l'ouest et du nord de la Région, les îles de Groix et Belle-Ile (56) présentent une nuance « méridionale », Rennes et Nantes permettent d'avoir une vision du climat de l'intérieur. **Les suivis annuels montrent en effet des augmentations du déficit des sols en eau depuis les années 1880 plus marquées pour les îles de Bréhat et de Belle-Ile ainsi qu'à Plougonvelin tandis que Rennes et Nantes connaissent une moindre augmentation des phénomènes de sécheresse.** Les mois d'été complètent cette vision en révélant une année sur quatre caractérisée par une forte sécheresse estivale, qui revient assez souvent pour les villes bretonnes. Elle met également en avant des décennies où ce rythme devient plus soutenu comme dans les années 1890-1910 par exemple (Lamy et Dubreuil, 2010).

Alors que les sécheresses sont récurrentes en Bretagne, leurs impacts sont de plus en plus importants sur notre société. On n'observe pas de recrudescence accrue de ces phénomènes liée au changement climatique, mais une augmentation des besoins en eau liés à l'accroissement de la population et des activités économiques (Dubreuil, 2005). En effet, **le changement de l'agriculture en Bretagne depuis 1980, passant d'une polyculture céréalière à une extension de la culture de maïs fourrager, a favorisé la consommation d'eau, rendant cette agriculture plus sensible aux risques de sécheresse** (Dubreuil *et al.*, 1996a ; Mounier *et al.*, 1998). Ces changements d'occupation des sols ont d'ailleurs été étudiés dans le cadre du projet PRIR-CHANTEL⁴⁸ entre 2000 et 2008, afin de définir à l'échelle régionale, les zones présentant un risque face aux sécheresses, tels que les secteurs sans couverture végétale pendant une longue période de l'année et sur plusieurs années.

Une analyse par « types de temps⁴⁹ » a aussi été menée concernant les longues séries de données du bilan de l'eau à Rennes, couplées à celle des types de circulations atmosphériques sur l'Europe (Dubreuil et Planchon, 2009). Cette étude constate bien une tendance à l'accentuation du contraste pluviométrique saisonnier, mais le lien entre fréquence des situations anticycloniques saisonnières et ampleur du déficit hydrique mesuré reste difficile. Il serait nécessaire d'effectuer des études complémentaires sur d'autres stations (plus intérieures) et d'autres pas de temps (mois, décades ; Dubreuil et Planchon, 2009). Cette étude s'inscrit dans le cadre de travaux réalisés au sein du groupe de recherche RICLIM⁵⁰ (Risques liés au CLimat) et des projets financés par la Fondation MAIF (Dynamique des masses d'air et risques climatiques⁵¹), ainsi que du projet CLIMASTER.

Les projections climatiques pour la Bretagne montrent une diminution des pluies et une augmentation générale des températures l'été, pendant la saison végétative. Si pour l'instant, la fréquence des épisodes de sécheresse n'a pas sensiblement augmenté, on peut penser que l'on se dirige vers une hausse des vagues de chaleur, surtout l'été, et que le risque de sécheresse ne diminuera pas (Dandin, 2006).

⁴⁸ Voir thèse de Rémi Lecerf, 2007, laboratoire COSTEL (projet financé par la région Bretagne).

⁴⁹ L'étude par type de temps vis à établir un lien entre le climat observé (« type de temps ») et la situation atmosphérique associée.

⁵⁰ <http://www.univ-rennes2.fr/costel/riclim>

⁵¹ <http://www.fondation-maif.fr/fondation/notre-action/projets-soutenus/risques-naturels/dynamique-masses-air-et-risques-climatiques.html>

A l'échelle de la Bretagne, le projet IPCCSB⁵² (ImPact du Changement Climatique sur l'intensité des Sécheresses en Bretagne) qui s'intègre dans le projet PSDR-GO CLIMASTER et o s'insère la thèse de C. Lamy (COSTEL, 2009-2012), se propose de réaliser des bilans hydriques (plusieurs villes en Bretagne, Pays de la Loire) afin de déterminer les périodes de sécheresse des sols, leur récurrence et leur importance depuis les années 1880-1890. Cette thèse se propose aussi de suivre l'évolution de la réserve en eau de ces sols et de la spatialiser en Bretagne, sous l'influence du changement climatique (scénarios A1B, A2 et B1).

Dans ce cadre, Lamy et Dubreuil (2011) ont réalisé un modèle de bilan hydrique stationnel (station Rennes Saint-Jacques) pour l'horizon 2100 et selon le scénario A1B du GIEC, afin par la suite de le spatialiser à l'échelle de la Bretagne. Pour ce modèle, les données d'entrée ont été les précipitations, les températures, l'humidité relative, la vitesse du vent et le rayonnement. Ces variables ont été fournies par Météo France (modèle ARPEGE) et ont permis de calculer une ETP au pas de temps mensuel. Par ailleurs, la réserve utile (RU) a été fixée à 125 mm, qui est la taille moyenne des RU en Bretagne (intermédiaire entre les fortes réserves des régions granitiques et celles plus faibles des régions argileuses et schisteuses), comme observé par Dubreuil (1997). **Selon le scénario A1B du GIEC, le déficit d'évaporation augmenterait fortement pour atteindre un déficit annuel moyen sur la dernière moitié du 21^{ème} siècle de 410 mm, augmentant ainsi le besoin en irrigation** (Fig. 33). **Cependant, ce modèle présente certains biais**, en particulier pour le mois d'août où il sous-estime toujours la pluie et surestime l'ETP. Par ailleurs, cette étude ne prend pas en compte les effets rétroactifs du CO₂ sur les plantes (voir chapitre 5.1) qui pourrait diminuer la transpiration des plantes et augmenter l'efficience de l'eau.

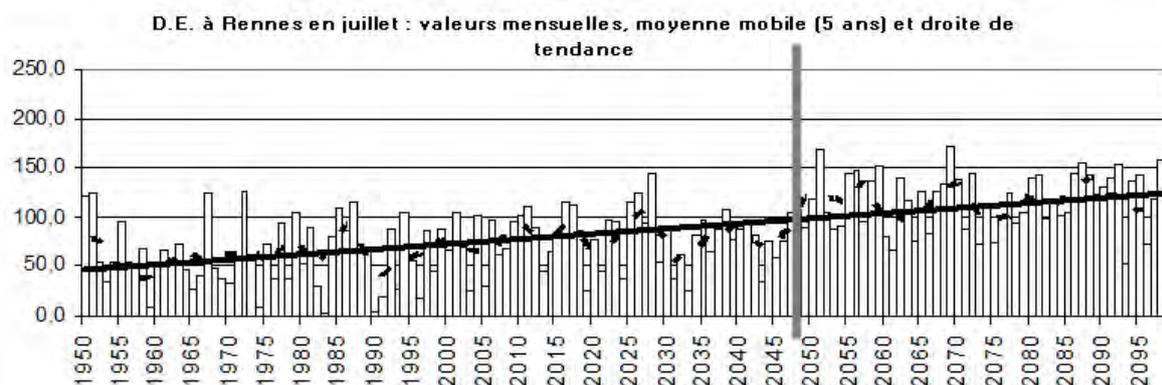


Figure 33 : Evolution du déficit d'évaporation en juillet (DE en mm) au cours du 21^{ème} siècle selon le scénario A1B, date de rupture en 2047 (test de Pettitt) (Lamy et Dubreuil, 2011).

Le bilan hydrique spatialisé a ensuite pour but d'estimer la vulnérabilité des sols bretons, en croisant les données d'occupation du sol avec la taille de la RU et les données climatiques. Il a ainsi pu être émis diverses hypothèses de stress hydrique au cours du 21^{ème} siècle, selon l'occupation du sol et le type de sol (Lamy et Dubreuil, 2011) :

- pour des céréales demandeuses en eau l'été, comme le maïs, le stress hydrique devrait augmenter ;
- pour des cultures d'hiver comme le blé (présent au printemps), le stress hydrique devrait augmenter, mais dans une moindre mesure car au printemps le déficit d'évaporation (DE) augmente moins qu'en été ;
- pour des cultures présentes sur des sols peu profonds, le stress hydrique devrait aussi augmenter, dû principalement à une RU plus faible.

⁵² Financé par la Région Bretagne.

Ainsi, en Bretagne, on observe une vulnérabilité variable face aux sécheresses, du fait de la variabilité de l'occupation du sol et des types de sol. La spatialisation du bilan hydrique au cours de la thèse de C. Lamy, qui s'appuie notamment sur la carte des sols spatialisés dans le cadre du programme Sols de Bretagne, permettra de mieux guider les réflexions sur le type d'adaptation de l'agriculture à mettre en place face au changement climatique.

4.1.5. Conclusion concernant les sols

Les sols évoluent avec la variabilité climatique mais aucune étude n'a démontré le lien avec le changement climatique. Cela nécessiterait en effet de plus longues séries d'observations qui permettraient d'effacer la variabilité naturelle. Les différentes projections réalisées mettent en avant la fragilité des sols face au changement climatique et aux événements extrêmes :

- diminution de la quantité de carbone présent dans les sols nécessaire à la biodiversité ;
- perte du rôle d'atténuation du changement climatique ;
- perte des sols par érosion ;
- augmentation des déficits hydriques face aux sécheresses ;
- dégradation des aquifères côtiers par l'intrusion d'eau salée.

Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires afin d'améliorer les connaissances sur cette ressource très variable et de pouvoir conforter ou infirmer les différentes hypothèses d'évolution émises pour le 21^{ème} siècle.

4.2. L'eau

L'eau de la planète est répartie dans cinq réservoirs interconnectés : les océans, les glaces permanentes, les eaux douces terrestres, la vapeur d'eau atmosphérique et les tissus végétaux. Ces cinq réservoirs subissent des transferts selon un cycle : la phase initiale est l'évaporation des eaux de surface des océans et des continents vers l'atmosphère, puis elles retombent sous forme de précipitation, une partie subit à nouveau les phénomènes d'évapotranspiration (évaporation à la surface des sols et transpiration des plantes), l'autre partie est drainée vers les nappes ou ruisselle vers les cours d'eau, et enfin les océans (Fig. 34 ; Amigues *et al.*, 2006)

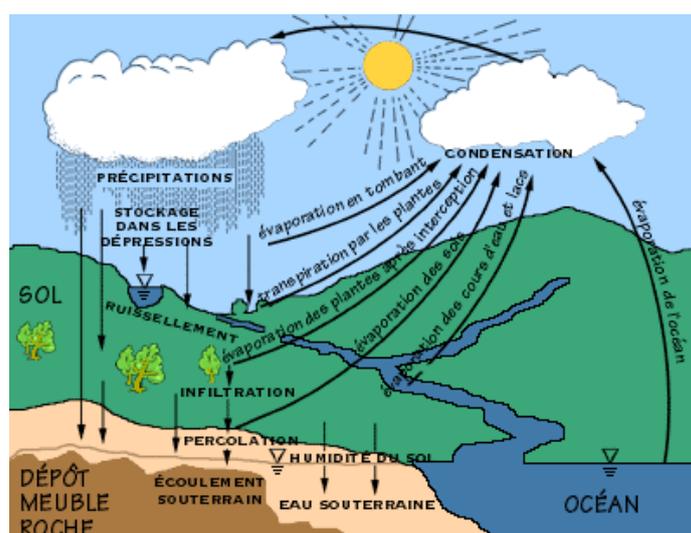


Figure 34 : Représentation schématique du cycle de l'eau à l'échelle globale (d'après le site www.oieau.fr cité dans Amigues *et al.*, 2006).

Le changement climatique devrait modifier le régime des eaux et les ressources en eaux, de part son impact sur les fonctions principales, telles que la fréquence et l'intensité des pluies, la fonte des glaciers, la température, l'état des sols et leur capacité de stockage, etc. **Bien que l'influence du changement climatique sur les chroniques passées ait très rarement été mise en évidence sur les chroniques passées, l'intrusion d'eau salée, le débit des cours d'eau, les zones humides et la qualité des eaux sont susceptibles d'être impactés par le changement climatique.** Pour la Bretagne, ils ont été étudiés dans le cadre du projet CLIMASTER dont nous allons présenter les principaux résultats.

4.2.1. L'intrusion d'eau salée dans les aquifères et les sols côtiers

La zone littorale est le point de rencontre entre deux types d'eau souterraine : l'eau douce des nappes du continent et l'eau salée qui imprègne les terrains au voisinage des côtes ou qui pénètre les cours d'eau au niveau des estuaires et peut ainsi donner lieu à des salinisations des eaux souterraines. Par ailleurs, les prélèvements d'eau pour les différents usages (principalement agriculture et tourisme), de manière saisonnière ou permanente ont aussi un impact important (CGDD, 2011).

L'intrusion d'eau salée par les submersions côtières est l'un des impacts du changement climatique qui pourrait perturber les zones humides et zones de cultures proches du niveau de la mer. En effet, **l'élévation du niveau de la mer et la recrudescence des tempêtes projetées avec le changement climatique, sont les principaux effets susceptibles de conduire à une augmentation des phénomènes de submersion, entraînant une salinisation et une dégradation des aquifères côtiers**⁵³ (Clus-Auby *et al.*, 2004). Les principaux impacts potentiels concerneront d'une part, les marais salés actuels, en particulier sur la façade atlantique (modifications de l'équilibre hydrologique et écologique de ce type de zone d'interface, disparition des marais, modification de la végétation et des écosystèmes associés) et d'autre part, les zones littorales (couplage hausse du niveau de la mer et baisse des débits accentuerait la salinité des eaux souterraines de manière locale, à proximité des embouchures) (CGDD, 2011).

Toutefois, ces effets du changement climatique sur la salinisation des aquifères côtiers restent hypothétiques et des études complémentaires seraient nécessaires afin de mieux comprendre ce phénomène (CGDD, 2011) :

- une synthèse des connaissances actuelles concernant la sensibilité des aquifères à l'intrusion saline accompagnée d'une mise à jour de la carte de France des aquifères littoraux ;
- une modélisation hydrogéologique eau douce/eau salée sur une sélection d'aquifères côtiers emblématiques en intégrant des scénarios contrastés concernant l'augmentation du niveau marin, les précipitations, les débits et la pression démographique ;
- des analyses de sensibilité des différents forçages pour identifier l'origine d'une modification de la salinité des aquifères côtiers : changement climatique ou changements globaux.

4.2.2. Le débit des cours d'eau

La variabilité des débits, encore plus forte que celle des pluies, ainsi que l'influence anthropique sur les débits (barrages, prélèvements d'eau, rejets, irrigation, etc.), rendent ce système

⁵³ Un aquifère est une couche de terrain ou une roche, suffisamment poreuse (qui peut stocker de l'eau) et perméable (où l'eau circule librement), pour contenir une nappe d'eau souterraine. Une nappe d'eau souterraine est un réservoir naturel d'eau douce susceptible d'être exploitée.

complexe à étudier, qui plus est dans un contexte de changement climatique. Hormis en régime nival ou glaciaire, l'influence du changement climatique sur les chroniques de débits a très rarement été mise en évidence. L'étude des débits passés nécessite donc de longues séries d'observation. Toutefois, la simulation des débits par des modèles, sous des hypothèses de changement climatique, permet de dépasser ces difficultés et d'apporter des informations cruciales, même si les conclusions doivent être émises avec prudence du fait de l'incertitude liée aux scénarios et aux modèles. Ici, nous présenterons d'une part, les travaux réalisés dans le cadre du projet REXHYSS (Ducharne *et al.*, 2009 ; 2011) évaluant l'effet du changement climatique sur l'hydrologie du bassin de la Seine et de la Somme, puis d'autre part, les travaux récents réalisés dans le cadre du projet CLIMASTER évaluant les grandes tendances des débits des rivières du Grand Ouest dans les décennies à venir.

➤ **A l'échelle nationale : projet REXHYSS**

Le projet REXHYSS⁵⁴ (2007-2009), porté par l'UMR Sisyphe (Université Pierre et Marie Curie, Paris VI) de 2007 à 2009, visait à estimer l'impact du changement climatique d'origine anthropique sur l'évolution des Ressources en Eau et des Extrêmes Hydrologiques au cours du 21^{ème} siècle, dans les bassins versants de la Seine et de la Somme (Ducharne *et al.*, 2009 ; 2011).

Les auteurs ont effectué une approche multi-scénarios et multi-modèles afin de considérer les incertitudes liées aux modèles et aux méthodes de désagrégation pour ne pas introduire de biais dans l'impact projeté. Ils ont ainsi construit des scénarios du changement climatique pour les bassins de la Seine et de la Somme à partir des projections de plusieurs modèles climatiques de grande échelle. Puis ces scénarios ont été régionalisés selon deux méthodes de désagrégation (méthodes quantile-quantile et des régimes de temps) et interprétés par 6 modèles hydrologiques. Ces scénarios s'accordent sur un réchauffement au cours du 21^{ème} siècle (+1.5 à +3°C en milieu de siècle et +2 à +4°C en fin de siècle) qui s'accompagnerait d'une augmentation des événements secs et de l'évapotranspiration potentielle et d'une diminution des précipitations estivales (Ducharne *et al.*, 2009).

La majorité des scénarios hydrologiques construits indiquent un assèchement prononcé des bassins au cours du 21^{ème} siècle, qui se traduit notamment par une baisse de la recharge annuelle des nappes, puis par une baisse des niveaux piézométriques, qui contribue à la baisse des débits moyens. A l'échelle saisonnière, la baisse des débits se répercute davantage sur les basses eaux que sur les hautes eaux. La différence d'évolution des crues de la Seine à Paris et des crues de la Somme à Abbeville est la conséquence d'une typologie des crues fortes différenciées :

- l'essentiel des crues de la Seine à Paris se forme sur les affluents Yonne, Aube, Marne et Seine en amont, en conséquences de pluies intenses sur le Morvan ;
- les crues de la Somme sont des crues de nappes, c'est l'évolution de ces dernières qui pilote la réponse hydrologique future (Fig. 35 ; Ducharne *et al.*, 2009).

⁵⁴ Programme GICC : <http://www.sisyphe.jussieu.fr/~agnes/rexhyss/index.php>

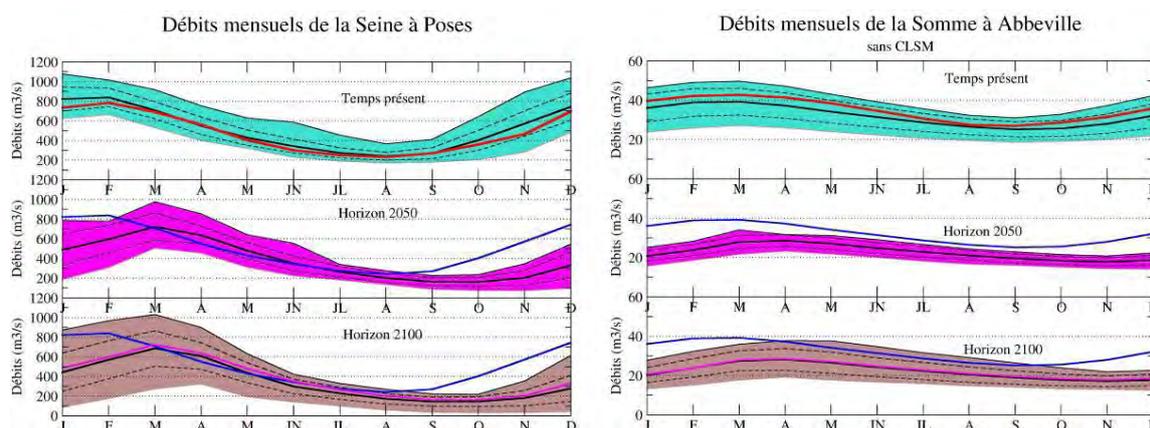


Figure 35 : Evolution des débits mensuels simulés pour la Seine à Poses (gauche) et la Somme à Abbeville (droite) par l'ensemble des modèles hydrologiques et sur l'ensemble des scénarios. L'enveloppe représente les min et max simulés, le trait épais la moyenne de l'ensemble et les pointillés l'enveloppe pour un écart-type. En haut: temps présent, la courbe rouge représente la moyenne mensuelle observée. Au milieu: Horizon 2050, la courbe bleue représente la moyenne temps présent. En bas: Horizon 2100, les courbes bleues et roses représentent les simulations temps présent et milieu de siècle respectivement (Ducharne *et al.*, 2009).

Une baisse des débits au cours du 21^{ème} siècle a aussi été observée pour le bassin de la Loire, dans le cadre du projet ICC-HYDROQUAL (Impact du Changement Climatique sur l'hydrosystème Loire : HYDROlogie, régime thermique, QUALité) porté par l'Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO ; Université de Tours) de 2008 à 2010. Ces simulations ont été réalisées avec différents modèles climatiques et hydrologiques, selon le scénario A1B du GIEC (Moatar *et al.*, 2010).

Dans le projet REXHYSS, les valeurs extrêmes des débits ont aussi été analysées. Les débits caractéristiques des étiages sévères baisseraient fortement. Concernant le bassin de Paris, les résultats peuvent se résumer par des variations probablement modérées du régime des crues, qu'il s'agisse des crues décennales comme des crues centennales. La comparaison avec différentes études suggère aussi que la réponse des débits de crue est étroitement liée aux précipitations hivernales, avec une forte sensibilité (Ducharne *et al.*, 2011).

Cependant, cette étude se limite à l'impact direct du changement climatique anthropique sur le régime hydrologique, et néglige les autres facteurs d'évolution possibles, comme les changements d'occupation des terres, d'aménagement ou gestion des cours d'eau. Par ailleurs, l'évolution des précipitations est certainement l'élément le plus incertain des projections du changement climatique. L'incertitude totale reste donc pour l'instant importante et interdit d'utiliser les projections hydrologiques comme « prévision » (Ducharne *et al.*, 2009 ; 2011).

➤ A l'échelle de la Bretagne : projet CLIMASTER

La particularité des ressources en eau en Bretagne est qu'elles sont endogènes à la région et de régime clairement océanique, avec des débits forts en hiver et faibles en été, sans d'importantes ressources profondes susceptibles d'être mobilisées. Dans le cadre du projet CLIMASTER, l'impact du changement climatique sur le fonctionnement du bassin versant (BV) du Scorff (56) a été étudié (Delahaye *et al.*, CLIMASTER, à paraître). Pour cela, des simulations avec des modèles hydrologiques ont été réalisées en considérant des projections climatiques issues du scénario A1B du GIEC. Afin d'étudier différentes contraintes climatiques sur ce BV, les auteurs ont analysé 3 sites qui diffèrent par leur climat et leur topographie (Montreuil-Bellay, Naizin et Ploudaniel). Afin de gommer la variabilité des données journalières, les résultats ont été moyennés sur des périodes de 30 ans :

- 1971-2000 : passé récent (PR) ;
- 2001- 2030 : période actuelle (ACT) ;
- 2031- 2060 : futur proche (FP) ;

- 2071- 2100 : futur lointain (FL). Pour cette période, il a aussi été considéré un accroissement de 2 ppm de CO₂ par an, lié à l'effet du climat sur la plante (FLCO₂).

Les résultats obtenus pour les prochaines années montrent une diminution des débits moyens pour chaque saison, à partir du futur proche (Fig. 36). Ces résultats montrent aussi un effet rétroactif du CO₂, puisque les débits diminuent moins dans le futur lointain avec la prise en compte de cette variable. L'effet du CO₂ est plus marqué en hiver et au printemps et est plutôt négligeable en été et en automne.

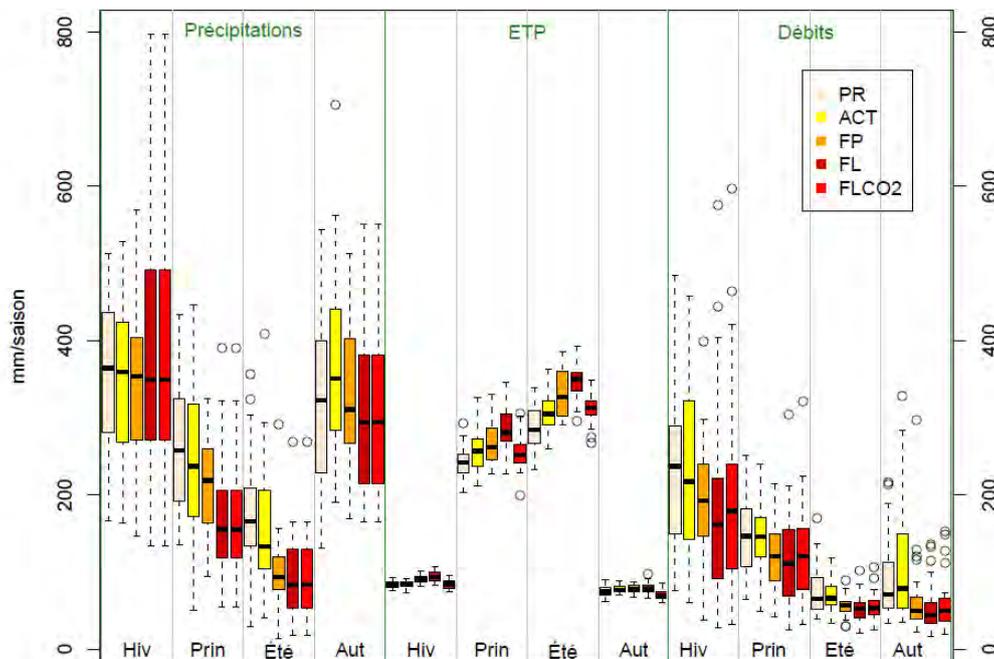


Figure 36 : Evolution des précipitation (gauche), de l'évapotranspiration (ETP, milieu) et des débits (droite) en hiver, printemps, été et automne, pour le passé récent (PR, 1971-2000), la période actuelle (ACT, 2001-2030), le futur proche (FP, 2031-2060) le futur lointain (FL, 2071-2100) et le futur lointain + 2 ppm de CO₂ (FLCO₂, à paraître).

La dynamique des débits moyens au cours de l'année ne montre pas de variation du pic de fort débit qui se situe toujours à la même période (mars), mais montre que la période d'étiage se renforce et s'allonge, avec des reprises d'écoulement plus tardives, en novembre plutôt qu'en septembre (Fig. 37).

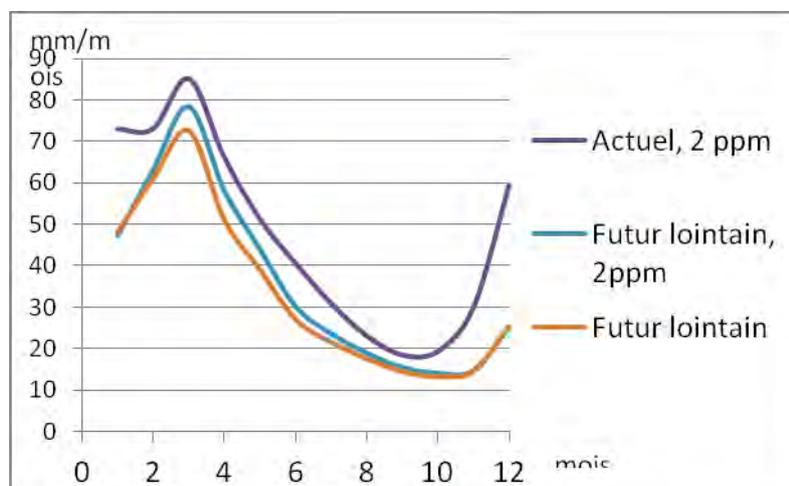


Figure 37 : Evolution du débit moyen annuel pour la période actuelle + 2 ppm de CO₂, le futur lointain et le futur lointain + 2 ppm de CO₂ (Delahaye et al., CLIMASTER, à paraître).

4.2.3. L'extension des zones humides en Bretagne : projet CLIMASTER

Les zones humides (ZH) jouent le rôle de zones tampons en régulant les écoulements hydrologiques. Dans ces zones, les sols ont une nappe d'eau superficielle qui constitue un réservoir d'eau important et qui régule l'eau s'infiltrant dans les sols. Elles diminuent ainsi l'intensité des crues et soutiennent les débits des cours d'eau en période d'étiage (GIS Sol, 2011). La localisation et l'extension des ZH peuvent être prédites sur le terrain mais également par ordinateur, grâce à un logiciel développé en Bretagne et validé à l'échelle européenne (Mérot *et al.*, 2003). Ce logiciel prend en compte les facteurs qui déterminent la localisation des zones humides, à savoir la pente locale, qui contrôle les possibilités d'écoulement ou de stagnation de l'eau et la quantité d'eau reçu par ce point qui dépend de la zone d'alimentation de ce point et de la quantité d'eau disponible (pluie efficace = pluie – évapotranspiration).

Dans le cadre du projet CLIMASTER, l'influence du changement climatique sur le comportement hydrologique des ZH a donc été étudiée en fonction de leur position au sein du bassin versant (amont/aval). Pour cela, des données climatiques (ETP, pluviométrie) de la station météorologique de Ploudaniel (29) ont été simulées selon le scénario A1B du GIEC pour 3 périodes (1960-2010 : actuelle, 2010-2060 : futur proche et 2060-2100 : futur lointain) et appliquées au bassin versant du Scorff (56), qui a un fonctionnement hydrologique proche. Ensuite, il a été distingué le fonctionnement des ZH selon qu'elles étaient drainées par un segment de cours d'eau d'ordre 1, 2, 3, 4, 5 et 0, ce dernier étant associé à une aire drainée trop faible pour former un cours d'eau (Josse, 2010).

Les résultats montrent que face au changement climatique, les ZH auront tendance à diminuer de surface et à être moins souvent à saturation (Tab. 1). **Par ailleurs, on observe aussi une réponse différente en fonction de leur position au sein du bassin versant, les ZH d'amont seront plus sensibles à l'influence du climat et verront leur surface diminuer plus fortement que les ZH situés à l'aval du bassin versant.** De ce fait, dans le cadre d'un programme de gestion environnementale, des actions territorialisées semblent indispensables pour assurer la préservation de ces zones naturelles (Josse, 2010).

Tableau 1 : Diminution moyenne des zones humides tous modèles hydrologiques confondus (Josse, 2010).

ordre	diminution futur proche	diminution futur lointain
ordre 1	10,25%	20,48%
ordre 2	3,23%	7,00%
ordre 3	2,43%	5,05%
ordre 4	1,98%	4,19%
ordre 5	1,69%	3,82%
ordre 6	1,27%	3,30%

4.2.4. La qualité des eaux en Bretagne : projet CLIMASTER

Les trois parties qui suivent, concernant l'évolution de la qualité des eaux face au changement climatique proviennent d'une synthèse rédigée dans le cadre du projet CLIMASTER. Concernant la qualité des eaux, le rôle du climat est plus indirect, donc plus complexe à comprendre

et donc à prédire. Parmi les paramètres analysés, on s'attardera sur deux d'entre eux (Delahaye *et al.*, CLIMASTER, à paraître) :

- les matières en suspension représentant la fraction de l'érosion de sols qui arrive au cours d'eau ;
- la teneur en matière organique, paramètre orientant le choix des filières de traitement pour la production d'eau potable et donc le coût du traitement.

➤ La qualité physique des eaux : turbidité, matières en suspension (MES), flux solides

Les flux solides sont liés d'une part, à la réponse hydrologique des bassins versants au climat, d'autre part, aux processus d'érosion sur le bassin versant liés à de nombreux facteurs dépendants ou non du climat (topographie, occupation et travail du sol, état d'humidité du sol, intensité de la pluie). Ces flux sont très variables dans le temps et dépendent majoritairement des phénomènes extrêmes de pluie dont la fréquence et l'intensité sont susceptibles d'augmenter avec le changement climatique. Dans le cadre du projet CLIMASTER, le débit et les concentrations de MES ont été suivis sur 5-6 ans à l'aide de turbidimètres et de mesures haute fréquence (10 mn) principalement sur 4 petits cours d'eau dont le bassin de Kervidy-Naizin en Bretagne (56).

Cette étude a permis de montrer que les flux solides sont très sensibles aux caractéristiques climatiques dont l'impact peut être différent selon les aménagements, les pratiques agricoles et l'occupation du sol. Les pratiques à risques sont la dégradation des berges par le bétail et les cultures de céréales couvrant peu le sol à certaines périodes. Par ailleurs, à Kervidy-Naizin, les MES proviennent surtout de l'érosion et du ruissellement sur les versants. Ces processus, sensibles à l'état d'humidité et à la couverture végétale du sol, sont favorisés à l'automne et en hiver. **Cependant la courte période d'étude ne permet pas d'observer une quelconque liaison avec le changement climatique. On peut toutefois supposer que les effets du changement climatique sur les précipitations et le cycle hydrologique se répercuteront sur les flux solides dans les cours d'eau.**

La présence de ripisylves⁵⁵, de haies et de prairies permet de rompre la continuité des circulations d'eau dans le bassin versant, d'augmenter la rugosité du sol et l'infiltration de l'eau, et ainsi de limiter efficacement les flux solides vers les rivières. Ces dispositifs sont très efficaces pour les événements de moyenne amplitude. Au-delà d'un certain seuil, ils ont un effet modéré, le ruissellement et l'érosion mettant en jeu des circuits nouveaux (route, fossés, chemins, etc.) ou étant incapables d'un effet barrière.

➤ La qualité organique des eaux superficielles

La qualité organique de l'eau est susceptible d'être impactée par le changement climatique. En effet, la température et l'humidité du sol, deux facteurs importants de l'évolution climatique, peuvent stimuler la production de matière organique (MO) dissoute dans le sol. On la mesure en effectuant des prélèvements (captages) d'eau superficielle. Ainsi, dans le cadre du projet CLIMASTER et du GEPMO (Groupe d'Etude des Matières Organiques en Bretagne), un état des lieux des captages superficiels sur des rivières et retenues de Bretagne et des Pays de la Loire a été réalisé. Pour les matières organiques, la proportion de captages non-conformes, c'est-à-dire dépassant la limite réglementaire de 10 mg/L de Carbone Organique Total (COT) pendant au moins 5 % du temps de leur exploitation, est analysée.

⁵⁵ Les ripisylves sont un ensemble de formations boisées, buissonnantes et herbacées présentes sur les rives d'un cours d'eau, dans les zones humides.

En Bretagne, on observe une grande variabilité spatiale et temporelle (de 1986 à 2009) de la contamination des captages d'eau brute par les MO, certains captages présentant des teneurs à la hausse, d'autres présentant des teneurs stables voire à la baisse (Fig. 38).



Figure 38 : Répartitions des captages superficiels d'eau brute de Bretagne et des Pays de Loire selon l'évolution de leur teneur en matière organique entre 1986 et 2009 (données : ARS Bretagne et ARS Pays de la Loire, dans Delahaye *et al.*, CLIMASTER, à paraître).

Les augmentations de teneur en MO d'environ 20 % des captages d'eau brute superficielle de Bretagne et des Pays de Loire depuis 15-20 ans, témoignent d'une dégradation de la qualité organique de ces eaux. Deux rivières des Côtes d'Armor utilisées pour produire de l'eau potable (le Léguer et le Yar) montrent d'ailleurs un doublement de leur teneur moyenne annuelle en MO en 25 ans.

Cette dégradation de la qualité organique de l'eau n'est cependant actuellement pas reliée au changement climatique. Toutefois, on peut supposer que les modifications climatiques futures dues au changement climatique sont susceptibles d'accentuer cette tendance. L'augmentation de la pluviosité hivernale peut conduire à une interaction plus grande de l'eau avec les horizons organiques du sol, augmentant ainsi les transferts de MO du sol vers les eaux de surface. L'augmentation de la température, accompagnée ou non de phases d'assèchement, peut stimuler la formation dans le sol, d'un stock de MO facilement mobilisable.

Les sols, de par leur variabilité, sont donc susceptibles d'engendrer des variations dans la réponse de la qualité organique des eaux de surface face au changement climatique. Par ailleurs, les activités humaines ont aussi une place importante car elles peuvent accentuer cette réponse.

Les effets des changements climatiques sur la teneur en MO des eaux superficielles du bassin versant de Kervidy-Naizin (56) ont été simulés selon le scénario A1B du GIEC. Deux simulations ont ainsi été réalisées : l'une pour tester l'impact des changements de pluviosité attendus à l'horizon 2100, l'autre pour tester l'impact du facteur « épaisseur des horizons organiques du sol » sur la réponse de la MO aux augmentations de température. Ces simulations révèlent que :

- des changements de régime de précipitations ne peuvent générer à eux seuls des évolutions significatives de la teneur en MO des eaux superficielles du Grand Ouest ;
- des variations dans l'épaisseur des horizons organiques des sols peuvent engendrer des variations dans la réponse temporelle des masses d'eau à une perturbation climatique apparemment identique (Fig. 39).

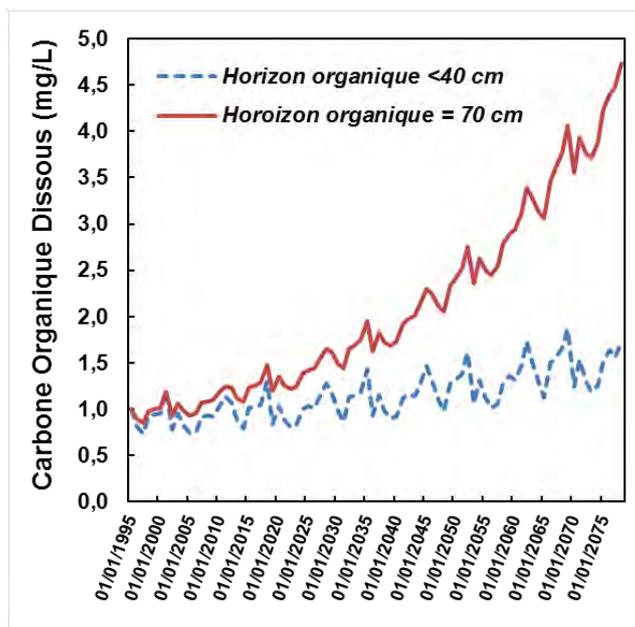


Figure 39 : Simulation de l'impact de l'épaisseur de l'horizon organique des sols sur l'évolution temporelle des concentrations moyennes annuelles en carbone organique dissous (COD) dans les eaux superficielles de Bretagne en supposant une augmentation de 3 % par an de la production de matière organique dissoute par le sol. Les simulations ont été arrêtées en 2077 (Delahaye *et al.*, CLIMASTER, à paraître).

Ces résultats sur l'évolution à long-terme de la teneur en MO des eaux superficielles restent toutefois des hypothèses qui nécessitent d'être vérifiées par la suite grâce à :

- des relevés pédologiques de terrain et des études expérimentales en laboratoire ;
- la quantification précise de l'impact d'une élévation de la température sur l'augmentation de la taille du réservoir de MO mobilisable des sols ;
- une meilleure connaissance sur la capacité des écoulements de l'eau à épuiser ce réservoir.

4.2.5. Conclusion concernant les eaux

La ressource en eau évolue avec la variabilité climatique mais aucune étude n'a démontré le lien avec le changement climatique en Bretagne. Cela nécessiterait en effet de plus longues séries d'observations qui permettraient d'effacer la variabilité naturelle. Les différentes projections réalisées mettent en avant la fragilité de cette ressource face au changement climatique :

- baisse potentielle des débits des cours d'eau ;
- diminution probable des zones humides ;
- possible dégradation de la qualité des eaux.

Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires afin de pouvoir conforter ou infirmer les différentes hypothèses d'évolution émises pour le 21^{ème} siècle.

Chapitre 5. Les impacts du changement climatique sur l'agriculture et la forêt

Dans cette partie, nous présentons les impacts du changement climatique et surtout du réchauffement climatiques sur l'agriculture et la forêt en Bretagne et lorsqu'il n'existe pas de travaux spécifiques, en France. On évoquera les cultures annuelles, l'élevage, le vignoble et la forêt.

De nombreux facteurs physiques autres que le climat, interviennent dans l'agriculture en favorisant ou perturbant la production : l'eau en termes de disponibilité au moment opportun mais aussi en termes de qualité et le sol, support de la production. C'est pourquoi, il est important de garder en tête que les effets du changement climatique sur ces deux entités (voir ci-dessus, chapitre 4.), auront des impacts sur les systèmes agricoles. De plus, le changement climatique interagit avec d'autres changements et d'autres pressions sur les écosystèmes : augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂, ozone, dépôt atmosphérique d'azote, introductions d'espèces, changement d'usage des sols et de pratiques agricoles, expansion démographique, changements des pratiques alimentaires et croissance économique, etc. Cependant, ces facteurs sont rarement tous pris en compte dans les études d'impact et les projections climatiques. **Il ne faut donc pas oublier dans l'analyse qui suit, que tous ces facteurs peuvent modifier la réponse des systèmes agricoles au changement climatique.**

5.1. L'effet rétroactif de l'augmentation en CO₂ atmosphérique	60
5.2. Les impacts du changement climatique sur les grandes cultures végétales en Bretagne	60
5.2.1. Présentation des différentes cultures étudiées dans CLIMATOR (Brisson et Levraut, 2010).....	61
5.2.2. Les observations des grandes cultures végétales à l'échelle du Grand Ouest : CLIMASTER.....	63
5.2.3. Les projections des grandes cultures végétales en Bretagne : CLIMATOR (Brisson et Levraut, 2010)	64
5.2.4. Conclusion concernant les grandes cultures végétales.....	72
5.3. Les impacts du changement climatique sur les vignes.....	73
5.3.2. Les observations des vignobles face au changement climatique.....	74
5.3.3. Les projections des vignobles.....	76
5.3.4. L'importance de la régionalisation spatiale à échelle fine en viticulture	78
5.3.5. Conclusion concernant les vignobles	78
5.3.6. Perspectives de recherche : projet TERADCLIM.....	79
5.4. Les impacts du changement climatique sur les forêts à l'échelle nationale	79
5.4.1. Les observations des forêts face au changement climatique	80
5.4.2. Les projections des forêts.....	88
5.4.3. Focus sur l'évolution du risque de feux de forêts avec le changement climatique.....	97
5.4.4. Conclusion concernant les forêts face au changement climatique.....	100
5.4.5. Perspectives de recherche sur les forêts face au changement climatique : les projets en cours	101

5.1. L'effet rétroactif de l'augmentation en CO₂ atmosphérique

L'augmentation continue de CO₂ dans l'atmosphère a un impact direct sur les conditions climatiques, le sol et l'eau, mais aussi sur la physiologie des plantes (Seguin, 2010) :

- stimulation de l'activité photosynthétique⁵⁶ de l'ordre de 20 à 30 % en général ;
- fermeture relative des stomates qui entraîne une baisse de la transpiration des plantes à leur potentiel, ce qui augmente l'efficacité de l'eau (même production de biomasse pour moins d'eau consommée) et les rendements potentiels pour les plantes d'intérêt agricole. L'augmentation du CO₂ pourrait ainsi conduire paradoxalement à une augmentation (ou à une diminution plus faible) de l'eau stockée dans les sols.

Toutefois, cette réponse des plantes dépend de différents facteurs : le type de métabolisme carboné (C3, C4)⁵⁷, la température et la disponibilité en eau. Par exemple, les plantes en C3 (blé, tournesol, colza, vigne, fétuque, arbres, etc.) qui constituent l'essentiel des plantes cultivées en région tempérée, répondent fortement à une augmentation de la teneur en carbone. À l'inverse les plantes en C4 (maïs, sorgho, etc.), dont la photosynthèse est déjà optimisée sont moins réactives à l'augmentation du CO₂, mais valorisent mieux l'utilisation de l'eau (Brisson et Levrault, 2010).

Quel que soit le scénario, il est prévu que les teneurs en CO₂ atmosphérique continuent d'augmenter, ce qui devrait favoriser les processus de photosynthèse, plutôt chez les cultures de type C3 que chez les cultures de type C4. De plus, à demande évaporative de l'atmosphère égale, les besoins en eau des cultures en C3 devraient diminuer, l'augmentation du CO₂ atmosphérique provoquant dans leur cas, une diminution de l'ouverture stomatique (effet anti-transpirant).

5.2. Les impacts du changement climatique sur les grandes cultures végétales en Bretagne

L'ensemble des facteurs climatiques est susceptible de jouer sur le rendement final d'une culture et en particulier, la teneur en CO₂ de l'atmosphère, le bilan hydrique⁵⁸ et la température. Comme il a été vu, le CO₂ joue un rôle majeur (surtout pour les cultures en C3) sur le rendement. La sécheresse a un rôle négatif sur le rendement des cultures, mais son ampleur varie en fonction du type de culture, de leur capacité d'adaptation et de leur sensibilité au CO₂ (rôle anti-transpirant). L'augmentation des températures peut entraîner pour certaines cultures, l'extension vers de nouveaux milieux plus favorables, une moindre incidence des dégâts de gel (en hiver) et une augmentation des risques d'échaudage thermique⁵⁹ (en été). De plus, la vitesse de développement des plantes dépend de la température et surtout d'un « zéro de végétation », qui correspond à la température minimale à partir de laquelle le développement se manifeste (par exemple, à 0°C pour le blé, 4.8°C pour le tournesol, 6°C pour le maïs et 10°C pour la vigne) (Brisson et Levrault, 2010). Ainsi, raisonner en termes de typologie de cultures selon leur réponse à ces paramètres (hiver/été,

⁵⁶ Processus biochimique permettant aux plantes de fixer le CO₂ atmosphérique grâce à l'énergie lumineuse et aboutissant à l'élaboration de biomasse.

⁵⁷ Il existe, dans le processus de photosynthèse des plantes, deux types de fixation du CO₂ : C4 et C3 qui reflètent le nombre d'atomes de carbone de la première molécule organique formée. Ces mécanismes sont associés à des comportements écophysologiques différents.

⁵⁸ Pour rappel, le bilan hydrique correspond à la variation du stock d'eau dans la réserve utile (part d'eau mobilisable par les plantes) du sol. La mesure du bilan hydrique permet d'évaluer les besoins en eau de la végétation imposés par le climat et de comparer ces nécessités aux possibilités d'alimentation liées à la pluviométrie.

⁵⁹ Notion englobant l'ensemble des phénomènes ayant un impact négatif sur le remplissage des grains lorsque les températures durant cette phase s'élèvent.

adaptée ou non à la sécheresse, adaptée ou non au froid) permettrait d'aider la réflexion sur les impacts du changement climatique.

Les travaux présentés concernant les impacts du changement climatique proviennent du projet CLIMATOR⁶⁰ (2007-2010) coordonné par N. Brisson de l'unité AGROCLIM de l'INRA (Avignon). Ce programme visait à fournir des méthodes et des résultats sur l'impact du changement climatique sur des systèmes cultivés variés, à l'échelle de la parcelle, et dans des climats contrastés français (13 sites, dont Rennes pour la zone Ouest). **Le travail réalisé dans ce projet repose sur des projections climatiques prospectives qui permettent d'analyser les impacts possibles et non pas prévisionnels, du changement climatique, selon diverses hypothèses pour le climat futur.** Les auteurs ont ainsi croisé modèles climatologiques et des modèles agronomiques pour le futur proche (FP : 2020-2049) et le futur lointain (FL : 2070-2099), en référence au passé récent (PR : 1970-1999). Ils ont ensuite réalisé une première approche des incertitudes liées aux modèles, à la variabilité du milieu (sols) et aux choix techniques des agriculteurs (variétés, modes de conduite), en combinant :

- 3 scénarios du GIEC (A1B, A2 et B1) ;
- 5 modèles climatiques dont le modèle français ARPEGE et 4 autres modèles du GIEC ;
- 3 méthodes de régionalisation du climat (quantile-quantile, types de temps, anomalies) ;
- 2 ou 3 modèles agronomiques par système de cultures ;
- 2 ou 3 variétés ou cépages par espèce cultivée, afin d'étudier l'effet de la longueur de cycle (pour la plupart des cultures, pour faire face à la précocité phénologique) et de la morphologie du système foliaire et racinaire (pour les prairies, pour faire face à la sécheresse) ;
 - 3 types de sol (variant par leur réserve utile, teneur en matière organique, profondeur, pierrosité, etc.) ;
 - des modes de conduite en termes d'irrigation ou de densité de plantation.

Par ailleurs, le projet CLIMATOR prend en compte dans ses modèles agronomiques, l'effet du CO₂ sur la croissance des plantes et le bilan hydrique du sol. Pour plus d'informations, le livre vert du projet CLIMATOR (Changement climatique, agriculture et forêt : simulations d'impacts sur les principales espèces est disponible en ligne sur le site de l'ADEME⁶¹).

5.2.1. Présentation des différentes cultures étudiées dans CLIMATOR (Brisson et Levrault, 2010)

Au sein de ce projet trois grands types d'espèces ont été étudiés :

- des espèces d'hiver, semées à l'automne et dont le cycle s'étale jusqu'à l'été (juin à mi-août pour le blé, fin août pour le colza) ;
- des espèces de printemps semées selon les régions, entre avril et mai avec des récoltes de fin septembre à fin octobre ;
- des espèces pérennes⁶² comme la vigne dont la période entre floraison et maturité est positionnée de façon intermédiaire entre les deux types précédents.

Dans ce chapitre, nous ne présentons que les résultats pour le blé tendre d'hiver, le maïs, le sorgho, le tournesol et le colza, qui selon la statistique Agricole Annuelle 2010 (Agreste, 2011), sont observées en Bretagne, avec une majorité de blé tendre et de maïs fourrage et ensilage, même si toutefois, il n'a pas été observé de sorgho en 2010 (seulement 200 ha en 2009).

⁶⁰ Programme ANR Vulnérabilité, Milieu, Climat : http://w3.avignon.inra.fr/projet_climator/

⁶¹ <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=70992&p1=30&ref=12441>

⁶² Une culture pérenne est une culture dont la durée de vie peut s'étaler sur plusieurs années, à l'inverse d'une plante annuelle qu'il faut ressemer chaque année.

➤ - Le blé tendre d'hiver

Le blé tendre est principalement cultivé dans le Centre Nord et peu cultivé en région Sud Est où il est généralement remplacé par du blé dur. Le blé est une culture majeure des rotations de grandes cultures. Son cycle long, d'octobre à juillet, sa large gamme de date de semis et sa relative tolérance aux milieux dégradés, en font une culture facile à implanter. Toutefois, il est sensible aux stress hydriques et thermiques estivaux, ce qui limite son extension vers le sud. De plus le blé tendre a de forts besoins en vernalisation⁶³, il lui faut entre 40 et 80 jours où la température moyenne ne dépasse pas 10°C au maximum, selon les variétés et le climat. Par ailleurs, pour fleurir, un blé vernalisé doit être soumis à une photopériode⁶⁴ longue. Le blé est une espèce en C3 qui valorise bien l'augmentation en CO₂ atmosphérique.

Au plan phytosanitaire, le blé est sujet à de nombreuses maladies fongiques telluriques (dont l'agent provient du sol) et foliaires (principalement septoriose, rouilles et fusarioses) qui affectent fréquemment le rendement des récoltes.

➤ - Le maïs et le sorgho

En France, le maïs est la seconde production végétale après le blé tendre. Le maïs grain est très cultivé dans l'Ouest et le Sud Ouest, alors que le sorgho grain, une culture moins importante est principalement cultivé dans le Sud Ouest. Ces deux espèces ont un cycle de développement similaire estival, qui les rend très sensibles au réchauffement climatique. De plus, le maïs est une culture demandeuse en eau, 50 % de la sole irriguée (surface totale irriguée en France) est consacrée au maïs. A l'inverse, le sorgho est mieux adapté à la sécheresse, tant au niveau de son système racinaire plus profond que de son feuillage moins exubérant. Maïs et sorgho sont des plantes en C4 qui valorisent mal l'augmentation en CO₂ atmosphérique.

➤ - Les prairies

Les prairies sont cultivées partout en France en tant que système fourragers pour les activités d'élevage. Les prairies jouent également un rôle de protection de l'environnement (limitation du lessivage) et de la biodiversité, de puits de carbone et de détoxification des polluants du sol. La prairie semée peut être constituée de fétuque élevée ou de ray-grass anglais. Ces deux graminées fourragères ont un cycle hivernal similaire (semis début septembre suivi en général de 4 fauches par an). Elles se différencient principalement par leur fonctionnement physiologique et leur capacité à faire face à la sécheresse (évitement, adaptation, tolérance) : la fétuque est adaptée aux milieux secs (grâce à un système racinaire plus profond, et une sénescence foliaire et racinaire peu sensibles à la sécheresse), le ray-grass anglais est adapté aux milieux humides. De plus, ce sont deux plantes en C3 qui valorisent bien l'augmentation en CO₂ atmosphérique

➤ - Le colza

Le colza est une culture majeure des rotations céréalières, principalement cultivée dans le Centre Nord et le Nord Est. Il a un cycle long hivernal (de septembre à juin) qui lui permet d'éviter le manque d'eau estival et qui grâce à un système racinaire profond, résiste bien aux sécheresses. De

⁶³ La vernalisation correspond aux besoins quantitatifs en froid nécessaires aux apex végétatifs pour leur passage au développement reproducteur. Ces besoins sont comptés en nombre de jours ayant des températures moyennes inférieures à un seuil dépendant de l'espèce.

⁶⁴ La photopériode est le rapport entre la durée du jour et la durée de la nuit.

plus, le colza a de forts besoins en vernalisation et doit être soumis à une longue photopériode. C'est aussi une plante en C3 qui valorise bien l'augmentation en CO₂ atmosphérique.

Au plan phytosanitaire, le colza souffre de nombreux pathogènes (par exemple phoma, sclerotinia, oïdium, charançon, etc.) qui nécessitent un contrôle assidu.

➤ - Le tournesol

Le tournesol est à l'origine de la 2^{ème} huile produite et consommée en France après l'huile de colza et est particulièrement présent dans la zone Sud Ouest. C'est une culture à cycle estival qui sera donc fortement soumise aux effets du réchauffement climatique marqué en été. Par contre, elle est bien adaptée à la sécheresse grâce à plusieurs mécanismes : capacité à garder les stomates ouverts plus longtemps lors de stress hydriques (ce qui prolonge la croissance) ; réduction de sa surface foliaire en (pénalise le rendement pendant le stress mais lui confère une grande plasticité dès le retour à des conditions favorables). Le tournesol est aussi une plante en C3 qui valorise bien l'augmentation en CO₂ atmosphérique.

La réponse au changement climatique de ces cultures va se traduire par des différences de comportement entre les espèces, principalement selon leur cycle calendaire (cultures d'hiver, de printemps, pérennes). En effet, les espèces de printemps (tournesol, maïs, sorgho) devraient subir une plus forte anticipation des stades et un raccourcissement de la phase de remplissage du grain, à l'inverse des espèces d'hiver (Fig. 40).

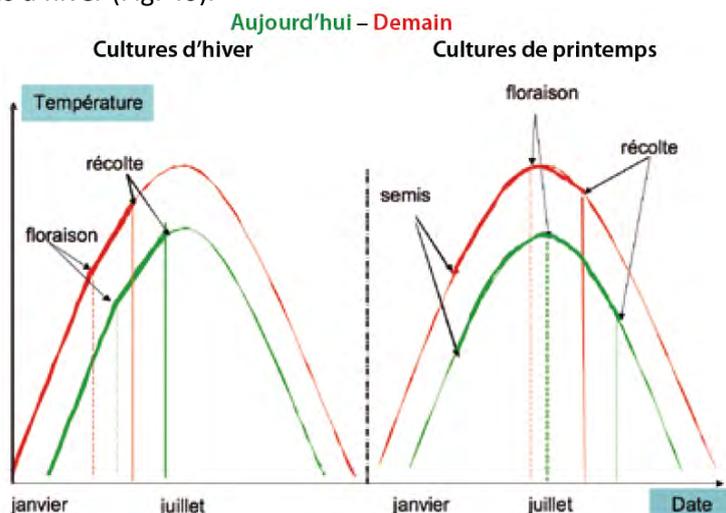


Figure 40 : Schéma du principe de la différence d'impact du réchauffement climatique sur les cultures d'hiver et les cultures de printemps, à date de semis fixe (Brisson et Levrault, 2010).

5.2.2. Les observations des grandes cultures végétales à l'échelle du Grand Ouest : CLIMASTER

Dans cette partie, nous reprenons les résultats d'une synthèse rédigée par *Corgne et al.* (2012, à paraître) dans le cadre du projet PSDR-GO CLIMASTER⁶⁵ qui devrait être publié au premier semestre 2012.

A l'échelle nationale, les agriculteurs et les éleveurs font état d'une modification des calendriers culturaux qui pourrait être liée au réchauffement climatique, d'ailleurs confirmée par des analyses récentes sur les dispositifs expérimentaux de l'INRA. En effet, ils ont observé pratiquement

⁶⁵ Programme Pour et Sur le Développement Régional dans le Grand Ouest : <http://www.rennes.inra.fr/climaster>

un mois d'avance depuis 1970 sur les dates de semis du maïs pour quatre sites couvrant l'ensemble du territoire (Seguin, 2010).

Il n'existe pas d'étude mettant en relation l'évolution des cultures céréalières, fourragères, etc. en Bretagne avec le changement climatique en cours. En effet, les nombreux changements de pratiques agricoles empêchent d'observer un impact du changement climatique sur ces plantes à cycle annuel. De plus, dans le cadre du projet CLIMASTER, une enquête a été réalisée chez des éleveurs laitiers du Grand Ouest (Bretagne, Basse-Normandie, Pays de la Loire et Poitou-Charentes) afin de déterminer la part des changements climatiques dans leurs raisonnements et leurs changements de pratiques. Il en résulte les mêmes observations qu'à l'échelle nationale : les changements climatiques sont mis en évidence par une avancée des dates de semis et de récolte et le passage à des variétés plus précoces. Au final, les changements de pratiques liés aux changements climatiques sont peu nombreux : les principales raisons évoquées par les agriculteurs pour justifier les changements de pratiques sont la recherche d'une simplification de leur travail, l'augmentation de technicité, le respect de l'environnement ou le changement de système.

Plusieurs études récentes ont montré les relations complexes existant entre le changement climatique et ces changements d'occupation des sols (Fisher *et al.*, 2005). Elles mettent en évidence que ces changements apparaissent tour à tour comme un des facteurs explicatifs du changement climatique et comme une conséquence de ce dernier (Lobell et Field, 2007). Ainsi, dans le cadre du projet CLIMASTER, les changements d'occupation et d'utilisation des sols ont été étudiés avec des séries temporelles d'images à moyenne et haute (télédétection) résolution spatiale, à l'échelle du Grand Ouest pendant ces dix dernières années. **Cette courte période de données existantes et d'investigation ne permet pas d'observer un impact du changement climatique, mais plutôt l'influence de la variabilité climatique.**

Ces séries temporelles ont ainsi mis en évidence des dynamiques inter- et intra-annuelles de la végétation à l'échelle du Grand Ouest et à l'échelle locale sur six sites tests, dont le bassin versant du Yar (22). Ces dynamiques ont été appréhendées à travers l'analyse d'une des variables biophysiques (fCOVER) qui définit l'évolution du recouvrement du sol par la végétation (au travers de la date de fin de croissance).

A l'échelle du Grand Ouest, les résultats montrent clairement l'impact de la variabilité climatique sur les changements d'occupation des sols. En effet, entre 2001 et 2010, les scientifiques observent un gradient relativement marqué entre la frange océanique Nord Ouest (Ouest Bretagne et Basse Normandie), caractérisée par une date de fin de croissance prolongée et les régions du sud-est (bassin de Rennes, Pays de la Loire et Poitou-Charentes) pour lesquelles cette dernière est raccourcie. A l'échelle locale, en plus de la variabilité climatique, d'autres facteurs tels que les politiques environnementales, le changement de système d'exploitation agricole ou le contexte économique, sont à prendre en compte pour expliquer des changements d'occupation et d'utilisation des sols.

L'application de l'approche développée ici sur de plus longues séries temporelles permettrait d'étudier les relations entre les changements d'occupation des sols et le climat en termes de changements climatiques, et non plus seulement en termes de variabilité climatique.

5.2.3. Les projections des grandes cultures végétales en Bretagne : CLIMATOR (Brisson et Levrault, 2010)

Selon les projections, le climat de l'Ouest se réchauffe en toutes saisons, entraînant des hivers plus doux et des étés de plus en plus chauds ainsi que des périodes de sécheresse plus

fréquentes en été. Ici, nous présentons les résultats des simulations réalisées en considérant les projections climatiques de la station de Rennes (scénario A1B).

➤ L'anticipation des stades phénologiques

L'anticipation de la date de récolte (à date de semis fixe) pour la station de Rennes, est très variable entre les cultures (Tab. 2) et dépend principalement de leur cycle calendaire :

- les cultures d'hiver vernalisantes et photosensibles (blé et colza) subissent l'anticipation la plus modeste avec un ordre de grandeur de 8 jours pour le futur proche (FP) et de 16 jours pour le futur lointain (FL) ;
- les cultures de printemps (tournesol, sorgho et surtout le maïs) subissent la plus forte anticipation (entre 13 et 26 jours en FP et entre 27 et 44 jours en FL).

Tableau 2 : Evolution de la date de récolte de 5 cultures (à date de semis fixe) dans le cadre de leur conduite actuelle (variétés à cycle long à Toulouse, Bordeaux et Avignon et court ailleurs). La significativité de l'évolution par rapport à la variabilité interannuelle est notée de la façon suivante : Gras ($p < 0.01$), Italique ($p < 0.05$). Le blé est simulé avec le modèle CERES et les autres cultures avec le modèle STICS, la méthode de régionalisation est TT.

Rennes	Blé	Colza	Maïs	Tournesol	Sorgho
FP	-9.1	-8.5	-26.6	-13.4	-16.2
FL	-17.0	-15.1	-44.6	-27.5	-33.3

Par ailleurs, à l'échelle nationale, quels que soient les sites, les cultures, les modèles agronomiques et les méthodes de régionalisation, l'anticipation des stades phénologiques est significative.

- L'effet des variétés

De façon générale, pour les espèces de printemps, l'anticipation est plus forte pour les variétés à cycle long, à l'inverse des cultures d'hiver où l'anticipation est légèrement plus élevée pour les variétés précoces. Cette distinction de comportement peut s'expliquer par le fait qu'une variété tardive, semée au printemps, rencontre dans le futur un plus grand nombre de jours avec des températures élevées.

Ces tendances, si elles se confirment, se répercuteront sur les choix techniques de l'agriculteur, y compris pour ses calendriers de travaux et sur le comportement écophysologique des cultures qui vont connaître un décalage entre leurs phases de développement et les contraintes du milieu. En effet, cette anticipation des stades va permettre aux cultures de moins souffrir des fortes températures et du manque d'eau en période estivale. Cependant, ces simulations ont considéré des dates de semis fixes. On peut s'attendre à des modifications de ces tendances (en termes de valeurs possibles) en ajustant les combinaisons entre la date de semis et la précocité variétale.

➤ Impacts sur le rendement

L'effet du changement climatique pour la station de Rennes sur le rendement des 6 cultures a été résumé par la différence de la moyenne observée entre la période FP et la période de référence PR, et entre les périodes FL et PR (Tab. 3). **On observe ainsi, que le sens d'évolution est conservé entre le FP et le FL (sauf pour la fétuque) ainsi qu'une relative stabilité du rendement pour chaque culture, avec toutefois une forte augmentation du rendement du sorgho pour le futur lointain et une diminution du rendement de la fétuque.** Il faut également souligner que les effets constatés peuvent dépendre du modèle agronomique choisi.

Tableau 3 : différence des rendements moyens entre les périodes futures (FP et FL) et le passé récent (PR) pour 12 sites et 8 cultures. Gras : $p < 0.01$; Italique : $p < 0.05$; Normal $p < 0.10$; Barré : non significatif.

Rennes	Blé	Maïs	Colza	Tournesol	Sorgho	Féтуque
Période FP / Période PR	-0,149	0,161	0,059	1,013	2,161	-0,68
Période FL / Période PR	-0,305	-0,224	0,562	1,576	4,001	-0,43

- Le blé tendre d'hiver

Le rendement du blé tendre d'hiver ne sera pas affecté significativement par le changement climatique, malgré une forte diminution du confort hydrique et une augmentation du nombre de jours échaudants (Fig. 41). Ce résultat s'explique par l'effet compensateur de l'augmentation de l'efficacité de l'eau avec la teneur en CO₂ atmosphérique.

Par contre, la comparaison entre des blés malades et des blés traités montre une nette augmentation des rendements dans le FP et le FL, due aux conditions hydriques moins favorables à des maladies comme la rouille. En retardant la date de semis, cette tendance est favorisée. Toutefois, la variation de la date de semis du 20 septembre au 1^{er} décembre se traduit par des baisses de rendement qui s'expliquent par l'augmentation des stress thermiques et hydriques de fin de cycle. Jouer sur la date de semis n'est donc pas la meilleure solution pour minimiser les impacts du changement climatique.

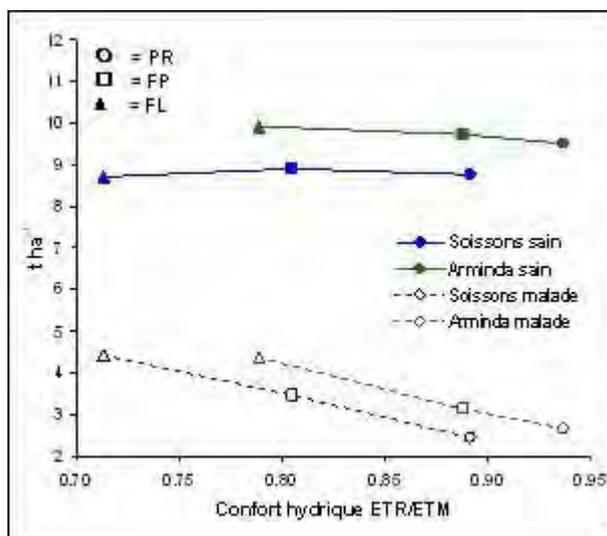


Figure 41 : Evolution du rendement de peuplements sains et malades (rouille brune) simulée par le modèle CERES (sol 1, méthode de régionalisation TT, semis le 10/10).

- Le maïs grain et le sorgho

Les projections de rendement pour une monoculture de maïs irriguée et une culture pluviale de sorgho en rotation, montrent une tendance à la diminution pour le maïs et une stabilité pour le sorgho dans leurs zones de production actuelles (Fig. 42). Par contre à la station climatique de Rennes, située plus au nord, on observe peu de variation pour le maïs et une augmentation pour le sorgho, malgré une détérioration de son confort hydrique. Ainsi, on peut supposer une extension de la faisabilité de culture de ces deux espèces vers le nord.

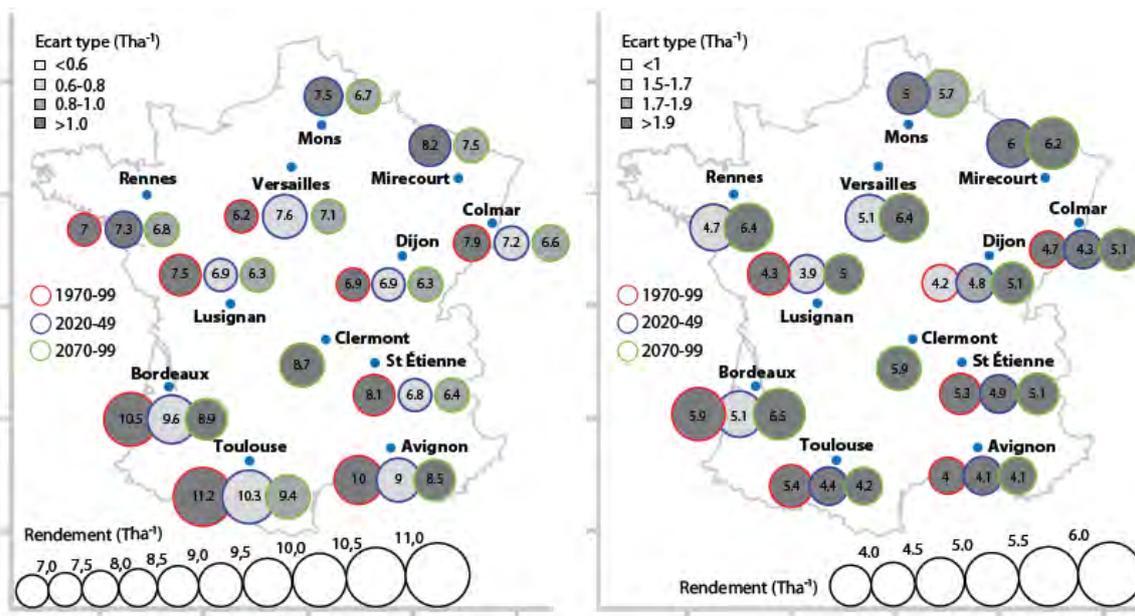


Figure 42 : Evolution du rendement de la monoculture de maïs irriguée (gauche) et de sorgho pluvial (droite) quand celles-ci sont réalisables (faisabilité* > 80 %) avec la méthode de régionalisation TT et le sol 1.

De plus, dans le futur lointain, l'implantation de variétés de colza à cycle long (par exemple *Fulgus sp.*) permettra un gain substantiel de rendement (Fig. 43). **Sans changement variétal, la meilleure résistance au manque d'eau du sorgho l'avantage par rapport au maïs dans un contexte de réchauffement climatique, qui exposera ces deux variétés à cycle estival court, à des stress hydriques et des échaudages thermiques.** Ainsi, dans le futur, le sorgho pourrait être envisagé en remplacement des cultures de maïs dans les zones où un fort déficit hydrique est projeté.

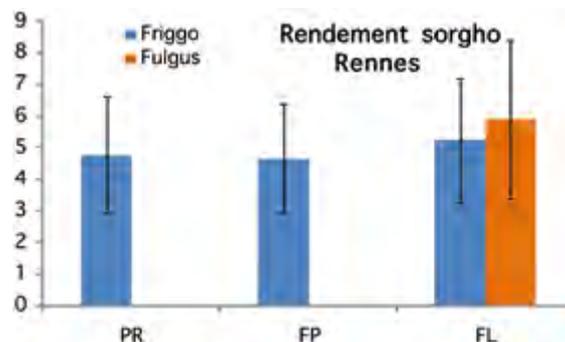


Figure 43 : Evolution du rendement du sorgho grain à Rennes, pour le sol 1 de limon profond avec les variétés *Friggo* et *Fulgus* (quand elle est réalisable). La variabilité indiquée intègre l'interannuelle et la variabilité entre méthodes de régionalisation du climat.

- Les prairies (fétuque élevée)

A Rennes, pour le futur proche, la production journalière annuelle devrait rester constante. Par contre, pour le futur lointain, les prairies devraient voir une augmentation de la production journalière au printemps et en hiver, avec toutefois une diminution de la production journalière estivale (Fig. 44). Ainsi, la variabilité interannuelle du rendement fourrager s'accroîtrait en tendance, du fait de la variabilité accrue des précipitations estivales.

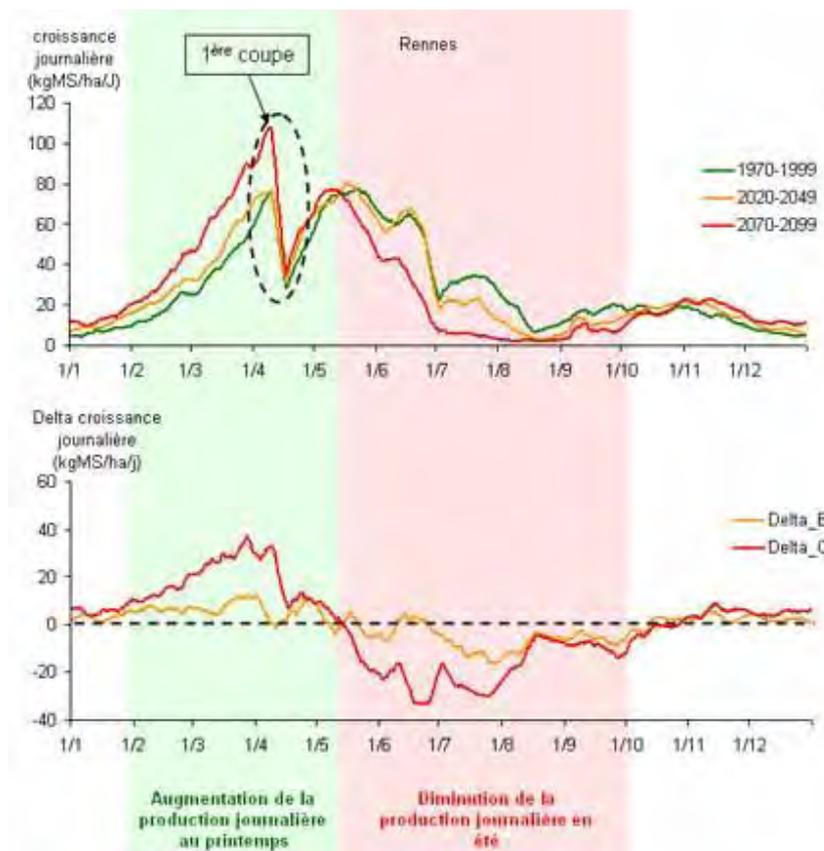


Figure 44 : Production journalière (moyenne sur 30 ans) de fourrage à Rennes pour la fétuque élevée, pour les trois périodes étudiées. Scénario A1B. Méthode de régionalisation QQ.

- Le colza

Le rendement du colza à Rennes ne présente pas de tendance significative dans le futur.

Cependant, on peut observer une détérioration de l'alimentation azotée du colza pour cette station, liée à une diminution du flux transpiratoire lors de sécheresses édaphiques pendant les premières phases du cycle, et ce quelque soit la RU du sol (Fig. 45). Sans changement de pratiques durant ces années sèches (par exemple, une irrigation « starter »), la culture de colza subira une diminution de rendement, qui l'empêchera de profiter de l'augmentation de la teneur en CO₂ atmosphérique.

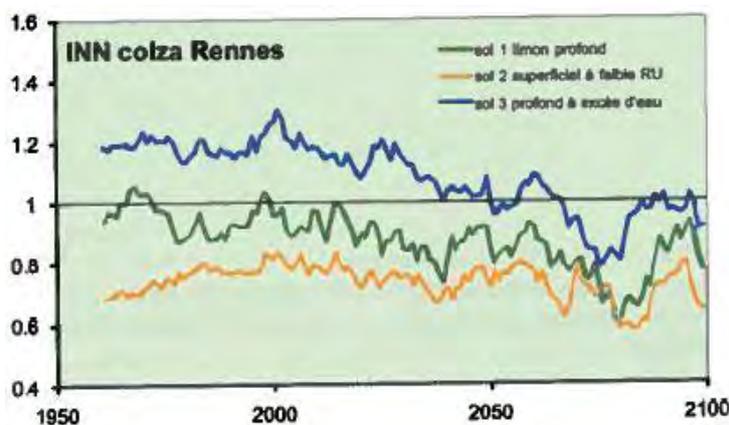


Figure 45 : Evolution de l'indice de nutrition azotée pendant la floraison du colza à Rennes, pour les 3 types de sol et la méthode de régionalisation climatique TT. Les courbes représentent des moyennes glissantes sur 10 ans.

- Le tournesol

Alors que dans les zones actuelles de production (principalement le Sud Ouest), le rendement évolue peu en moyenne, **on observe une forte extension de la zone de faisabilité de culture du tournesol entre le passé récent et le futur proche pour des stations situées au nord de la France, comme Rennes ou des stations plus en altitude.**

➤ **Impacts des stress thermiques et hydriques dommageables pour les récoltes**

L'occurrence et la variabilité d'événements extrêmes (canicules, gels et sécheresses) pourraient conduire à des impacts différents du réchauffement climatique moyen par le dépassement de valeurs-seuils encore mal cernées. **Dans ce cadre, le projet CLIMATOR a porté son attention sur deux espèces : le blé et le tournesol.**

- Les températures gélives

Les projections concernant le blé, montrent que le risque de gel hivernal et de gel d'apex (température minimale inférieure à -4°C, après le stade épi à 1 cm) diminuent dans le futur, avec une fréquence d'apparition devenant souvent inférieure à 2 années sur 10, dès le futur proche, même en cas de semis plus précoce. Concernant le tournesol, le risque de températures gélives printanières à des phases sensibles (température minimale inférieure à 8°C pendant la phase végétative ou inférieure à 15°C entre les stades « bouton floral » et « floraison ») diminue pour le futur lointain, mais augmente cependant pour le futur proche en cas de semis plus précoce. Ainsi, il sera difficile de mettre en place des stratégies d'esquive via des semis ou des variétés plus précoces.

- Les températures échaudantes

La fréquence de températures élevées pendant le remplissage des grains ou la floraison présente un risque au niveau physiologique, qui s'accroît très fortement en dépit de l'anticipation des stades. Ainsi pour le blé, le nombre de jours échaudants (nombre de jours où la température maximale > 25°C entre l'épiaison et la maturité physiologique) augmente dans le futur (Fig. 46). Il en est de même pour le tournesol et de manière plus prononcée. Deux voies d'adaptation apparaissent alors : l'avancement des dates de semis (qui n'atténue que faiblement ce risque) et l'amélioration variétale orientée vers le raccourcissement des cycles et la tolérance aux températures élevées.

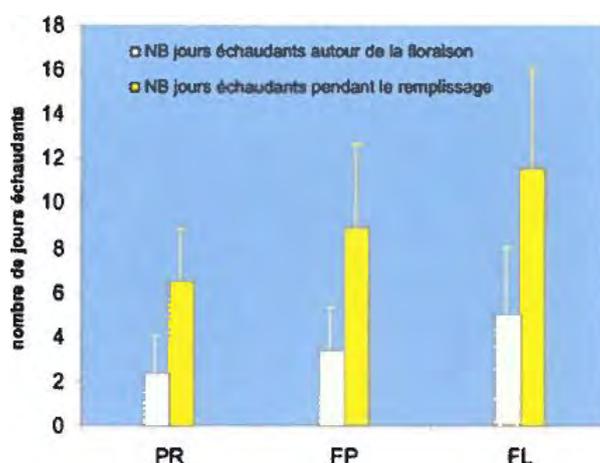


Figure 46 : Evolution des stress thermiques simulée par le modèle PANORAMIX (sol 1, méthode de régionalisation TT, semis le 10/10).

- Les sécheresses

Ces phénomènes extrêmes auront tendance à être plus fréquents dans le futur, surtout en période estivale. Combinées à l'accroissement de l'évapotranspiration potentielle, ils vont entraîner une hausse des besoins en irrigation pour les cultures de printemps, mais pas pour les cultures d'hiver. L'anticipation des dates de semis pourrait avoir un effet modérateur, mais cela nécessite d'être étudié de façon approfondie pour avoir une vision plus complète de l'évolution des besoins en irrigation.

- L'augmentation du recours à l'irrigation pour les cultures consommatrices d'eau

A l'échelle nationale, un enjeu emblématique est celui du maïs irrigué, mais aujourd'hui d'autres cultures sont aussi irriguées (blé, tournesol, sorgho, etc.) qu'il ne faut pas oublier. Dans le cadre du projet CLIMATOR, les scientifiques se sont aussi interrogés sur l'intérêt de l'irrigation pour des cultures actuellement non irriguées (vigne, prairie, colza) et dans des zones où elle est peu pratiquée, comme en Bretagne ou très pratiquée, comme dans le sud-est et le sud-ouest de la France.

Concernant le maïs à Rennes, on peut constater une augmentation du besoin en irrigation (pour couvrir 80 % des besoins en eau de la culture) entre le passé récent et le futur proche, suivie par une diminution entre le futur proche et le futur lointain. Ce résultat peut s'expliquer par un raccourcissement du cycle phénologique à la fin du siècle. La plante éviterait ainsi de croître en période de déficit hydrique, mais cependant ce raccourcissement aurait un impact négatif sur le rendement, s'il n'y a pas de changement variétal.

Concernant le blé à Rennes, on n'observe pas d'évolution du besoin en irrigation (pour couvrir 70 % des besoins en eau de la culture), l'anticipation des stades de développement ne s'accompagnant pas, comme chez le blé, d'une réduction de la phase soumise au déficit hydrique.

Concernant les prairies de fétuque à Rennes, qui ne sont actuellement pas des cultures irriguées en France (sauf Avignon), on observe qu'avec l'augmentation du déficit hydrique dans le futur, les besoins en irrigation pour des sols à faible réserve utile pour la station de Rennes, augmenteront, dans l'hypothèse où l'on cherche à assurer 80 % des besoins en eau de la production fourragère, et cela pour tous les sites étudiés.

➤ L'évolution des « jours disponibles » pour les travaux dans les exploitations agricoles

Ici, nous reprenons les résultats d'une synthèse rédigée par Joannon *et al.* dans le cadre du projet PSDR-GO CLIMASTER⁶⁶ (à paraître).

Les choix de productions végétales de l'agriculteur dépendent en partie de sa capacité à réaliser dans de bonnes conditions agronomiques les différentes opérations culturales nécessaires à la conduite de ces productions végétales. On détermine ainsi les « jours disponibles » par type d'opération culturale, c'est à dire les jours permettant d'intervenir dans de bonnes conditions agronomiques. Ces jours disponibles sont fortement dépendants du type de sol et du climat.

Avec le changement climatique, la diminution générale des précipitations aura des répercussions sur l'état de surface des sols cultivés. Ainsi, on devrait assister à une augmentation du

⁶⁶ Programme Pour et Sur le Développement Régional dans le Grand Ouest : <http://www.rennes.inra.fr/climaster>

nombre de jours disponibles où l'humidité des sols est suffisamment faible pour permettre l'intervention des engins agricoles dans les parcelles.

Dans le projet CLIMASTER, il a été étudié l'impact du changement climatique sur l'organisation du travail pour l'implantation et la récolte de cultures de maïs (grain et ensilage), l'implantation de cultures de blé et la récolte de prairies et dans le cas de sols limoneux sains. **Le cas d'étude est situé au nord de l'Ille- et-Vilaine, au sein du dispositif de recherche de la Zone Atelier d'Armorique : zone où la production laitière domine.** Pour cela, les jours disponibles ont été simulés (modèle Jdispo développé par Arvalis) de 1970 à 2059 avec le scénario A1B du GIEC, en fonction de l'humidité du sol et des données météorologiques simulées. **Il a ainsi été montré :**

- **concernant l'implantation et la récolte du maïs** (grain et ensilage), les conditions devraient nettement s'améliorer au futur lointain (+13 à 24 jours disponibles) ;
- **concernant l'implantation du blé**, les conditions devraient faiblement s'améliorer dans le futur lointain (+ 4 jours disponibles) mais avec une légère dégradation dans le futur proche (- 4 jours disponibles). Cette tendance est observée pour un semis précoce et tardif ;
- **concernant la récolte du blé**, la diminution des précipitations et l'augmentation des températures en été, vont créer des conditions plus sèches et entraîner une augmentation des jours disponibles pour cette opération culturale ;
- **concernant la récolte des prairies**, on observe une évolution des jours disponibles qui ne suivraient pas la même logique que l'évolution de la productivité. Pour une récolte en mars, il y aurait une forte augmentation de la productivité et une stabilité des jours disponibles. Pour une récolte estivale, il y aurait une forte diminution de la productivité mais une augmentation des jours disponibles.

Ainsi, le changement climatique devrait donc faciliter les chantiers d'automne, mais pas ceux de printemps. Ces résultats sont à mettre en regard des autres impacts du changement climatique sur l'agriculture et aussi en regard de l'évolution des structures des exploitations, en particulier l'augmentation de la charge en travail.

➤ L'évolution de quelques pathosystèmes du blé

Les bioagresseurs (organismes pathogènes, adventices) des plantes sont connus pour avoir des impacts variables sur les cultures en fonction des variations de conditions climatiques interannuelles : cela a amené de nombreuses études à se pencher sur les relations entre bioagresseurs et climat, à des fins d'ajustement en cours d'année des pratiques de contrôle phytosanitaire (Brisson et Levraut, 2010).

Dans le projet CLIMATOR, une étude a été menée sur certains champignons phytopathogènes du blé : la septoriose et la rouille brune, dont l'installation peut être limitée par le gel hivernal ou par l'absence de pluies. **Les résultats des simulations réalisées pour la station climatique de Rennes et selon le scénario A1B montrent** (Brisson et Levraut, 2010) :

- **pour la septoriose**, la constitution de l'inoculum est favorisée par le réchauffement climatique qui entraîne une baisse du nombre de jours de gel hivernal, mais la progression épidémique est défavorisée par la hausse des phénomènes de sécheresse avec le changement climatique. Sa nuisibilité sera donc diminuée dans le futur par les sécheresses ;
- **pour la rouille brune**, on observe une stagnation des pertes de rendement dans le futur lointain pour la variété précoce (*Soissons*) et une diminution marquée pour la variété tardive (*Armindia*).

Le confort hydrique printanier-estival pendant leur phase de développement est donc la principale variable qui influencera négativement ces deux pathogènes dans le climat futur de

Rennes. L'impact du changement climatique sur une technique de lutte non chimique qu'est le retard de la date de semis a aussi été analysé. En effet, les semis tardifs sont connus pour limiter la pression d'inoculum en sortie d'hiver de ces deux maladies, qui ont ainsi moins de temps pour se multiplier durant cette phase. Pour les deux maladies, on remarque un effet de réduction de la nuisibilité avec les semis tardifs (Brisson et Levrault, 2010).

Au niveau des insectes, il apparaît encore peu de signes indiscutables dans le domaine des cultures végétales, seule l'extension vers le nord de la chenille processionnaire est bien documentée mais elle concerne la forêt. Les ravageurs sont surtout sensibles aux sécheresses qui risquent d'être plus fréquentes avec le changement climatique et devraient donc nuire à la survie des œufs et des larves. Concernant les adventices⁶⁷, leur impact sur les cultures devrait être plus marqué en raison de la forte compétition pour l'eau, notamment en culture d'été. De plus, les plantes affaiblies par la sécheresse pourraient aussi être plus sensibles aux attaques de pathogènes ou de certains insectes et à la compétition avec les adventices (Amigues *et al.*, 2006)

Par ailleurs, il faut également prendre en compte la possibilité de mouvements géographiques rapides qui amènent certaines maladies ou ravageurs, véhiculés par les moyens modernes de transport, à s'installer dans des régions où les conditions climatiques le leur permettraient.

➤ Les incertitudes des projections

Les principales incertitudes sont inhérentes aux modèles climatiques, aux méthodes de régionalisation choisies et aux modèles phénologiques appliqués. Pour réduire les incertitudes sur les impacts régionaux du changement climatique, les modèles agronomiques et zootechniques doivent être améliorés, comparés à des séries longues de données obtenues dans des sites climatiques contrastés, ainsi qu'à des expériences manipulant pour un ensemble de cultures les facteurs du microclimat et de la composition de l'atmosphère (CO₂, ozone).

5.2.4. Conclusion concernant les grandes cultures végétales

Le changement climatique, tel qu'il est prévu par les modèles climatiques, ne provoquera ni dégradation ni amélioration générale des possibilités de culture. Il faut plutôt s'attendre à ce qu'un ensemble de facteurs, dont dépendent ces possibilités, soit modifié. Concernant les projections effectuées avec les données climatiques de la station de Rennes, on peut retenir :

- **une avancée des stades phénologiques et donc de la date de récolte** pour toutes les cultures, celle-ci étant plus importante pour les cultures de printemps ;
- **une relative stabilité des rendements** pour les cultures actuellement présentes en Bretagne (blé, maïs, colza), une augmentation du rendement des cultures peu présentes (tournesol et sorgho) et une diminution pour la fétuque ;
- **une réduction des accidents liés au gel automnal** pour les cultures d'hiver (blé) **et du gel printanier** pour les cultures de printemps (tournesol) mais qu'à partir du futur lointain ;
- **une augmentation des risques liés aux jours échaudants estivaux** pour les cultures de printemps (tournesol), mais qui pourrait être atténué par l'avancée des stades phénologiques ;
- **une augmentation des stress hydriques** pour les cultures de printemps avec une augmentation des besoins en irrigation pour les cultures d'été (maïs, mais aussi pour la fétuque) ;
- **une moindre humidité des sols à l'automne** qui conduira à davantage de jours disponibles pour les travaux d'automne.

⁶⁷ Ce terme désigne une plante herbacée ou ligneuse indésirable à l'endroit où elle se trouve, désignée dans le langage courant par l'expression « mauvaise herbe ».

De plus, à l'échelle nationale, les maladies fongiques tendent à diminuer dans le futur proche et lointain. En effet, la diminution globale des pluies et des durées d'humectation va dans le sens d'une diminution du potentiel d'infection et de la dispersion des principales maladies actuelles, et ce malgré l'augmentation de température.

Par ailleurs, si les effets néfastes du climat futur sont souvent compensés par l'augmentation du CO₂, l'augmentation de la variabilité interannuelle invite plutôt à la prudence et à la recherche de solutions alternatives. **Il faut cependant rester prudent quant à l'analyse des résultats concernant la station de Rennes, car la forte variabilité climatique spatiale observée à l'échelle de la région empêche de généraliser ces simulations à d'autres zones plus centrales ou côtières.** La spatialisation du bilan hydrique, en cours dans le cadre de la thèse de C. Lamy (COSTEL), permettra de mieux guider les réflexions sur le type d'adaptation de l'agriculture à mettre en place face au changement climatique.

5.3. Les impacts du changement climatique sur les vignes

Nous avons développé ce chapitre sur les vignes, bien que ce ne soit pas une culture prépondérante en Bretagne, pour deux raisons :

1. l'éventualité de conditions favorables en Bretagne pour sa culture au futur proche ou futur lointain ;
2. l'existence d'un réel potentiel de recherche sur le sujet en Bretagne (COSTEL).

La géographie des vignobles mondiaux est étroitement liée au zonage climatique. En effet, le climat et en particulier les températures influencent fortement le cycle de développement de la vigne et définissent les caractéristiques du vin produit (« effet millésime », « effet terroir ») :

- en hiver, les températures froides plongent la vigne dans une phase de dormance jusqu'à des températures plus douces au printemps où commence le débourrement⁶⁸ ;
- il faut ensuite une dizaine de jours avec une température moyenne d'au moins 10°C afin que la vigne commence son cycle saisonnier ;
- les températures plus chaudes estivales entraînent ensuite la véraison⁶⁹.

Bien évaluer l'impact du changement climatique est important car les vignes sont des plantes pérennes et les plantations actuelles seront encore là dans 50 ans. Le changement climatique n'étant pas homogène partout et les climats viticoles étant tributaires des conditions de surface, une investigation à échelle régionale et locale doit être menée afin de répondre aux interrogations des professionnels mais aussi anticiper les futurs impacts sur les vignobles.

Cette démarche prospective est réalisée au sein du projet international TERVICLIM⁷⁰ (Observation et modélisation spatiale du climat à l'échelle des terroirs viticoles dans un contexte de changement climatique), coordonné par le laboratoire COSTEL de 2008 à 2012 et qui a pour objectif de mettre en place une méthodologie de mesures (météorologiques et agronomiques) et de modélisation spatiale du climat adaptée aux échelles fines. Cette démarche, réalisée dans une dizaine de pays permettra d'une part, de définir le climat actuel des vignobles et d'autre part, d'apporter des réponses aux conséquences futures du changement climatique.

En Bretagne, il y a plusieurs siècles, les vignes étaient présentes dans les pays de Quimper, Morlaix, St-Brieuc, Redon, la presqu'île de Rhuys et sur les bords de Rance. A partir des 15^{ème}-16^{ème}

⁶⁸ Le débourrement est le moment de l'année où les bourgeons végétatifs et floraux des arbres se développent.

⁶⁹ La véraison est le moment de l'année où le grain de raisin gonfle et devient rouge vif ou jaune translucide ; il commence à prendre la couleur qu'il aura à maturité.

⁷⁰ Programme ANR : <http://terviclim.in2p3.fr/spip.php?rubrique1>

siècles, le rafraîchissement du climat et les changements de consommation (remplacement du vin par le cidre) ont causé la disparition de ces vignobles dans l'ouest de la France, aux profits des vins d'Anjou et du pays nantais (Marchand *et al.*, 2011). **Le réchauffement climatique en cours peut suggérer un retour à un climat plus favorable pour le développement de la vigne en Bretagne dans les décennies à venir.** A titre anecdotique, on a relevé une centaine d'amateurs qui développent aujourd'hui quelques pieds dans des jardins. Il est donc intéressant de savoir comment la vigne réagit au changement climatique actuel dans les régions où elle est implantée et quels peuvent être les impacts futurs.

Ainsi, nous allons présenter les résultats de quelques études réalisées sur des vignobles de la moitié Nord de la France : le vignoble du Val de Loire (Pays de la Loire et Centre), le vignoble champenois et le vignoble alsacien, où un réchauffement climatique est déjà observé.

5.3.2. Les observations des vignobles face au changement climatique

➤ Les impacts sur la phénologie (débourrement, floraison, véraison) et les dates de vendange des vignes

Certains indices bioclimatiques sont de très bons indicateurs des variations phénologiques de la vigne et permettent de comprendre les relations entre le climat et la plante :

- **L'indice de Huglin** permet la classification des vignobles dans différentes catégories de climats du type frais au type chaud et il peut être mis en relation avec les différents stades phénologiques. Chaque catégorie de climat correspond à des types de cépages pouvant être plantés afin d'optimiser la récolte (par exemple, si l'augmentation de température moyenne d'une région dépasse 3°C, le viticulteur devra envisager le passage à un cépage plus tolérant à la chaleur, ou changer ses pratiques culturales). Cet indice ne prend en compte que les températures « actives » efficaces supérieures à 10°C (qui contribuent au développement de la plante). Sa valeur pour une station correspond à la valeur cumulée de l'indice à la date du 30 septembre, le cumul se faisant depuis le 1er avril ;

- **L'indice des degrés jours de Winkler** se calcule sur la saison phénologique de la vigne (avril à octobre) et permet de connaître les besoins en chaleur de la plante pour le développement de ses différents stades phénologiques (débourrement, floraison, véraison et maturité). Il correspond à la somme des températures moyennes journalières à partir de la base de 10°C qui est effectuée du 1er avril au 31 octobre.

Depuis la fin des années 1980, différents auteurs observent une hausse de ces indices dans les vignobles du val de Loire (Bonney *et al.*, 2010b), de Champagne (Beltrando et Briche, 2010) et d'Alsace (Duchêne et Schneider, 2004), en lien avec le réchauffement climatique. La hausse de ces indices bioclimatiques a eu des conséquences sur la phénologie de la vigne. Ainsi, les viticulteurs observent déjà une plus grande précocité des stades phénologiques dans toutes les grandes régions viticoles françaises. Par exemple, dans le sud-est de la France, on observe une avancée des dates de vendanges (environ 1 mois en 50 ans) et de la maturité des fruits (de 1 à 2 semaines en 30 ans ; Hebert *et al.*, 2011) et dans le val de Loire, cette avance est de l'ordre de 10 à 20 jours selon les cépages (CLIMASTER, à paraître).

Egalement dans le val de Loire, en Champagne et en Alsace, les écarts entre la date moyenne du débourrement et celle du début de la vendange se sont réduits depuis le début des années 1990 (CLIMASTER, à paraître ; Fig. 47). Il faut aussi noter que la date de vendange est décidée par les viticulteurs, qui actuellement l'avancent le plus possible pour atteindre une maturité optimale.

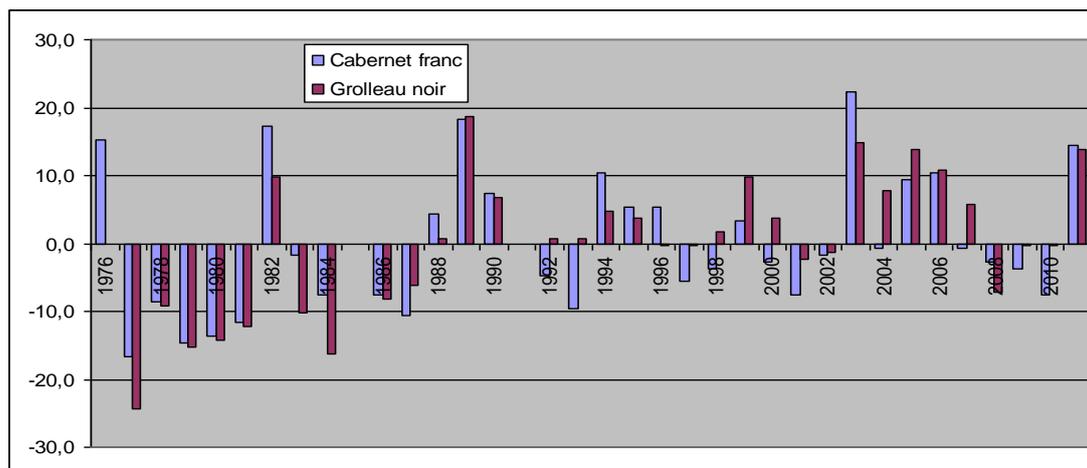


Figure 47 : Ecart en jours à la moyenne 1976-2011 des dates de vendanges du Grolleau noir (cépage précoce) et du Cabernet franc (cépage plus tardif) à la station expérimentale INRA de Montreuil-Bellay (49) au sud de Saumur (CLIMASTER, à paraître).

Ces précocités phénologiques, observées à partir de la fin des années 1980 dans la plupart des vignobles et accompagnées d'un réchauffement du climat viticole dans ces régions, peuvent aussi avoir des impacts sur les caractéristiques du raisin récolté, notamment la quantité de sucre et l'acidité et donc sur la typicité des vins produits (Bonnefoy *et al.*, 2010b).

➤ Les impacts sur la typicité des vins

La qualité du raisin est fortement dépendante des conditions de température pendant la période de maturation. En effet, la température influence la répartition des acides et la coloration des baies et semble affecter le contenu de métabolites secondaires du raisin. De plus, des conditions fraîches sont souvent préférables pour le développement des caractères aromatiques (Duchêne et Schneider, 2004).

Le réchauffement climatique observé ces dernières décennies s'est traduit par des conditions globalement plus favorables, avec moins de variabilité interannuelle pour tous les vignobles français. Ainsi, dans le val de Loire, en Alsace et en Champagne, il a été observé une augmentation de la teneur en sucre du raisin et une augmentation du degré d'alcool potentiel (taux de concentration de sucre des moûts de raisin qui est converti en degré d'alcool) ainsi qu'une diminution de l'acidité (CLIMASTER, à paraître ; Tab. 4). Ces changements de qualité des vins peuvent amener à poser le problème de conservation de la typicité des vins régionaux qui fait leur réputation.

Tableau 4 : Evolution de la qualité des raisins de 5 cépages cultivés en Pays de Loire (Source données : CA 44 ; ATV 49). * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ et *** $P < 0.001$ respectivement. Note : 1° d'alcool équivaut à 16.83g/L de sucre (CLIMASTER, à paraître).

Bassin viticole (N°département)	Cépage (nombre de parcelles)	Série temporelle	Teneur en sucre (g/L)	Degré d'alcool potentiel	Acidité Totale (g H ₂ SO ₄ /L)
Muscadet (44)	Melon de Bourgogne (20)	1986–2009	+24.1 *	+1.4°	-0.7
Anjou (49)	Grolleau noir (5)	1981–2010	+36.5 ***	+2.2°	-2.0 *
Anjou (49)	Gamay (6)	1981–2010	+25.0 *	+1.5°	-1.2 *
Anjou (49)	Cabernet franc (10)	1981–2010	+46.6 ***	+2.8°	-2.2 *
Anjou (49)	Chenin (8)	1981–2010	+38.2 **	+2.2°	-2.0 *
Anjou (49)	Sauvignon blanc (2)	1981–2010	+38.9 ***	+2.3°	-1.0
Saumurois (49)	Chenin blanc (2)	1981–2010	+38.0**	+2.3°	-3.0**
Saumurois (49)	Cabernet franc (4)	1981–2010	+54.4 ***	+3.2°	-2.0 **

➤ **Les extrêmes thermiques dommageables pour la récolte**

Les plantes subissent aussi les effets des aléas extrêmes qui jouent un rôle dans le développement annuel de la plante.

- Le gel printanier

Au printemps, la vigne est sensible aux basses températures. L'exposition des bourgeons à des températures négatives peut engendrer la destruction de ceux-ci. Le réchauffement climatique induit deux effets contraires sur le gel : d'une part, il diminue le nombre moyen de jours de gel et d'autre part, il avance les dates de floraison. La probabilité d'observer un gel pendant une période critique du cycle de la vigne est donc plus forte.

- Les températures estivales

En été, des températures supérieures à 35-40°C peuvent parfois griller ou dessécher les baies, provoquer un ralentissement ou un blocage de l'activité végétative et bloquer l'accumulation des sucres, ce qui perturbe la synthèse des tanins⁷¹.

Les viticulteurs se sont adaptés progressivement à ces aléas. Par exemple, depuis quelques décennies, certains viticulteurs utilisent divers moyens de lutte passive (taille tardive de la plante pour reculer le débourrement, etc.) ou active (chaufferette, tour à vent, aspersion d'eau, etc.), sur les parcelles réputées gélives (Beltrando et Briche, 2010). Toutefois, si ces phénomènes extrêmes deviennent plus fréquents et plus intenses avec le changement climatique à venir, les viticulteurs auront de plus en plus de mal à s'adapter rapidement.

5.3.3. Les projections des vignobles

Dans le cadre du projet CLIMATOR, des projections ont été réalisées concernant l'impact du changement climatique sur les vignes et leur fonctionnement, à l'échelle nationale et selon le modèle ARPEGE (scénario A1B et 3 méthodes de régionalisation).

➤ **- Impacts sur la productivité**

La vigne est réactive à l'augmentation de la concentration en CO₂. Ainsi, l'augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique devrait favoriser l'activité photosynthétique post-vendanges et améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE) en cas de sécheresse (Brisson et Levraut, 2010).

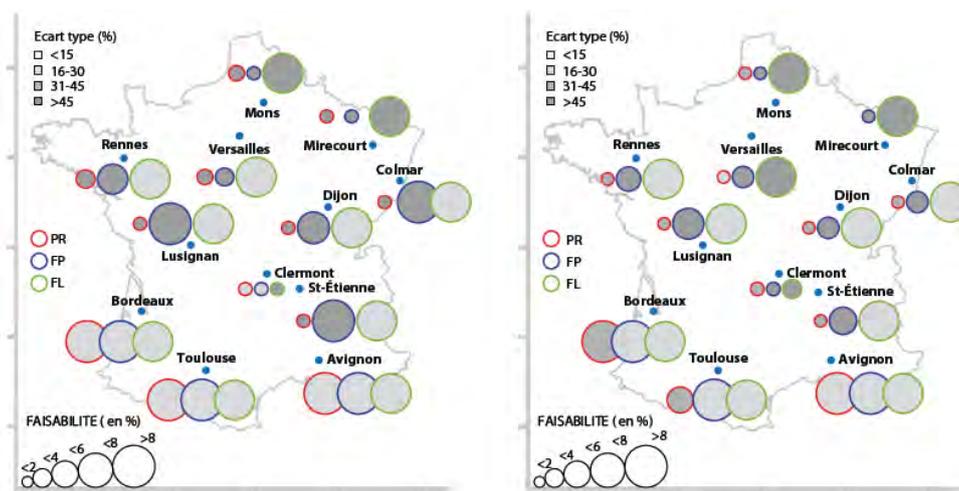
➤ **- Impacts sur la phénologie**

Le changement climatique devrait se traduire par une avancée de tous les stades phénologiques et ce quelles que soient la variété et la méthode de régionalisation choisies, ainsi que par une maturation dans des conditions beaucoup plus chaudes et sèches, ce qui pourrait perturber les équilibres traditionnels du vin. Pour les sites déjà viticoles, l'ensemble du cycle de culture serait avancé de 20 à 40 jours entre le passé récent (1971-2000) et le futur lointain (2070-2100). De façon générale, l'anticipation est plus forte pour les variétés de raisin à cycle long : le grenache, cépage le plus tardif, anticipe un peu plus que le chardonnay et le merlot (Brisson et Levraut, 2010).

⁷¹ Les tanins sont des substances naturelles qui interviennent dans la couleur du vin.

➤ - Impacts sur la faisabilité de culture

L'évolution de la faisabilité de la culture en différents lieux pour différentes variétés traduit simplement l'avancée de la phénologie et donc l'extension vers le nord de la zone de production potentielle. **Le changement climatique permettra dans le futur lointain, pour des sites comme Versailles ou Rennes d'envisager la culture du merlot sans plus de risques qu'à Bordeaux dans la période actuelle** (Fig. 48 ; Brisson et Levraut, 2010). Cette évolution peut être envisagée pour d'autres types de cépages et mériterait d'être approfondie.



➤ - Les stress thermiques

Le réchauffement climatique, en provoquant une précocité du débourrement au printemps (devenu en moyenne plus chaud), peut entraîner le risque de gel dommageable sur les bourgeons en avance par rapport à la période actuelle, avec les températures extrêmes minimales du mois de mars (Beltrando et Briche, 2010).

L'avancée des stades phénologiques avec le changement climatique avance la période de maturation plus tôt en été, donc dans des conditions généralement plus chaudes et plus sèches, ce qui pourrait entraîner des dommages tels que l'échaudage des baies et la perturbation de la synthèse des tanins (Beltrando et Briche, 2010). Par ailleurs, des études ont montré la pertinence d'un indicateur dit de « fraîcheur de nuits » pour la qualité de la vendange, en particulier du point de vue aromatique. L'évolution prévisible de cet indicateur montre un changement drastique des conditions de maturation allant vers une dégradation générale de la qualité du raisin (Brisson et Levraut, 2010).

Concernant le confort hydrique, les auteurs constatent que, malgré l'augmentation du déficit hydrique climatique, le confort hydrique de la vigne ne subit pas une détérioration générale à l'échelle de la France : seuls quelques sites du Sud sont fortement impactés. Cela est principalement dû au fait que la vigne est plutôt tolérante au manque d'eau (Brisson et Levraut, 2010).

➤ - Les incertitudes de ces projections

Les incertitudes attachées à ces projections sont principalement inhérentes à la modélisation climatique. Par ailleurs, certains aspects du fonctionnement et de la réponse de la vigne au

changement climatique n'ont pas été abordés, essentiellement par manque de modèle disponible simulant ces effets (Brisson et Levraut, 2010) :

- les effets des hautes températures sur la photosynthèse, la croissance et le développement ;
- les effets de relation entre la vigueur végétative, le rendement et la qualité ;
- l'adaptation dynamique de l'enracinement ;
- l'exposition aux risques de gel ;
- l'augmentation de la croissance post-vendanges et donc de la mise en réserve.

5.3.4. L'importance de la régionalisation spatiale à échelle fine en viticulture

A l'échelle régionale, les nuances climatiques entre des stations peuvent être marquées et expliquent, en partie, la diversité des vins produits dans une région. Les études d'impact du changement climatique sur la vigne nécessitent donc de descendre à des échelles très fines car les facteurs climatiques sont tributaires de la topographie, la végétation, l'exposition, etc., qui sont mal représentés par les modèles de circulation générale, lesquels *in fine* apportent des résultats trop approximatifs. Ce type d'étude est primordiale dans l'optique de la mise en place d'une politique raisonnée d'adaptation aux modifications du climat (Bonnefoy *et al.*, 2010b)

Dans le cadre du projet TERVICLIM, un réseau de stations météorologiques complètes de type Campbell a été installé en 2008 dans l'Anjou et le Saumurois afin de compléter le réseau de Météo France. De même, 22 capteurs (type Tinytag) ont été installés à partir de l'année 2008 dans les vignobles des Coteaux du Layon, en fonction des caractéristiques topographiques (altitude, pente, exposition) et de la nature de l'occupation du sol (type de sol, distance à la rivière « le Layon », etc.) et avec une densité suffisamment importante pour caractériser certaines différences climatiques à l'échelle d'une parcelle (Bonnefoy *et al.*, 2010b).

L'analyse des températures enregistrées par ces capteurs montre de fortes disparités entre des capteurs situés parfois sur les mêmes parcelles ou sur des parcelles voisines. Il a ainsi été possible de déterminer à l'échelle des Coteaux du Layon, les différents climats auxquels sont soumis les vignes (Bonnefoy *et al.*, 2010a) :

- les zones plus « chaudes » correspondent en général aux mi-coteaux ;
- les températures minimales descendent de façon plus conséquente en bas de coteau et près de la rivière, notamment lors de nuits à inversion thermique ;
- les plateaux connaissent des températures maximales plus faibles ;
- les amplitudes thermiques journalières sont plus élevées dans le bas des parcelles, près du Layon, ce qui est favorable au développement de la « pourriture noble » à l'origine des vins liquoreux produits dans ce secteur.

Enfin, prochainement des simulations climatiques avec le modèle RAMS (de 25 km à 200 m de résolution spatiale) seront réalisées et permettront d'évaluer les futurs effets du réchauffement climatique sur le climat actuel des coteaux du Layon (voir chapitre 2.2.3.).

5.3.5. Conclusion concernant les vignobles

Pour la vigne, les effets du changement climatique les plus nettement observés et projetés sont ceux sur l'avancée des stades phénologiques et donc aussi sur la faisabilité de la culture, dont l'aire de répartition devrait s'étendre vers le nord. Cette avancée phénologique aurait également des

impacts très importants et négatifs sur les conditions de maturation du raisin et donc sur la qualité, surtout en termes d'arômes et de polyphénols (vin blanc / vin rouge). Le choix de la date de vendange devient de plus en plus difficile car les viticulteurs doivent sélectionner le meilleur moment qui correspond à un équilibre sucres / acides / composés phénoliques / arômes qui va déterminer le mode de vinification et le type de vin à élaborer (CLIMASTER, à paraître).

Ces études n'abordent qu'un aspect du changement climatique observé et simulé, celui des températures, qui sont certes essentielles mais pas exclusives pour le bon déroulement du cycle végétatif de la vigne. Il serait donc intéressant de mieux prendre en compte l'effet du déficit hydrique (surtout pour les sols à faible réserve utile) et de l'augmentation en CO₂ atmosphérique dans les études prospectives sur la vigne. De même, les aspects socio-économiques : cadre réglementaire très contraint, poids des traditions (notions de « terroirs » et de « typicité ») et forte segmentation du marché, devraient être pris en compte. Ainsi, le raccourcissement du cycle végétatif de la vigne pourrait à terme, imposer de nouveaux choix agronomiques afin d'éviter notamment une vendange trop précoce durant la saison chaude.

5.3.6. Perspectives de recherche : projet TERADCLIM

Le projet TERADCLIM⁷² (Adaptation au changement climatique à l'échelle des terroirs viticoles), coordonné par le laboratoire COSTEL de 2011 à 2013, a pour objectif de mettre en place une méthodologie de modélisation spatiale du climat adaptée aux échelles fines afin d'apporter des réponses aux conséquences futures du changement climatique en procédant à une simulation adaptée. Ce projet utilisera les projections climatiques à fine échelle qui sont réalisées dans le cadre du projet TERVICLIM et développera des scénarios d'adaptation des vins de terroir au changement climatique à une échelle de temps de 15-30 ans. Ces scénarios seront effectués en collaboration avec les professionnels viticoles par l'intermédiaire de syndicats, d'association de viticulteurs et des exploitations viticoles dans 3 vignobles : les vignobles français des Coteaux du Layon et de la Montagne Sainte-Victoire car des collaborations scientifiques/acteurs sont déjà en place.

5.4. Les impacts du changement climatique sur les forêts à l'échelle nationale

2011 a été déclarée « année internationale des forêts » par l'assemblée générale de l'ONU. Si les forêts sont ainsi mises à l'honneur, c'est en raison des nombreux biens et services qu'elles rendent à la société : stockage du CO₂, production d'eau de qualité, action sur le microclimat, grand réservoir de biodiversité, protection des sols contre l'érosion ou tout simplement accueil du public ; leur apport est loin de se cantonner à la production de bois. De plus, durant leur croissance, les plantes, et principalement les arbres, agissent comme un puits de carbone, en absorbant du CO₂ atmosphérique qu'ils stockent dans leur biomasse. Cela leur confère un rôle atténuateur de l'effet de serre nécessaire face au changement climatique en cours.

Les forêts, par leur longévité, sont inévitablement exposées à la variabilité et aux évolutions naturelles du climat, leur diversité génétique leur permettant de s'adapter à des conditions très variées et durant de longues périodes. Les études sur le changement climatique s'accordent sur une augmentation de la variabilité du climat et des événements climatiques extrêmes (canicules et sécheresses estivales, précipitations hivernales intenses, tempêtes) dont les impacts s'accroîtront au cours des prochaines décennies. On peut supposer que ces impacts seront perceptibles sur les

⁷² Programme GICC : <http://terviclim.in2p3.fr/spip.php?rubrique85>

forêts étant donné que les échéances auxquelles sont envisagées des changements majeurs (2050-2100) sont aussi celles auxquelles les jeunes arbres d'aujourd'hui seront devenus adultes. De plus, la capacité de dispersion des arbres étant très faible, il faut donc s'attendre à ce que leur dynamique ne suive celle du climat qu'avec un temps de latence plus ou moins long (ONF, 2007). **C'est pourquoi la gestion forestière (sylviculture) doit prendre en compte le changement climatique dès aujourd'hui.**

Cette prise en compte passe tout d'abord par l'étude de l'évolution des forêts au cours du dernier siècle, laquelle se heurte au manque de données de référence. En effet, jusqu'à il y a quelques décennies, les relevés n'étaient pas réalisés dans l'optique d'un échantillonnage ultérieur : ils n'étaient pas localisés avec précision et la végétation n'était pas relevée de façon exhaustive. Les premières observations floristiques systématiques de l'Inventaire Forestier National (IFN), du réseau de surveillance de l'état de santé des forêts et du REseau National de suivi à long terme des ECosystèmes FORestiers (RENECOFOR⁷³) datent respectivement de 1985, 1993 et 1995 (ONF, 2007).

A l'échelle du Grand Ouest, le Centre National de Biodiversité Forestière (CNBF) basé à la pépinière de Guéméné-Penfao (44) assure des missions de reproduction, de conservation et de réintroduction d'arbres dans les milieux naturels. Sur ce site, des études sont menées en lien avec les instituts techniques et de recherches forestières, afin de déterminer les essences forestières qui pourront résister au changement climatique. **Concernant la Bretagne, il existe peu d'études ou de projets de recherche impliqués sur les impacts du changement climatique en forêt.** Toutefois, le Centre Régional de Propriété Forestière (CRPF⁷⁴) s'est récemment impliqué dans des projets à long terme dont les résultats devraient permettre d'apporter de nouvelles réponses à cette question (voir chapitre 5.4.5.).

Ainsi, étant donné le peu d'informations et de programmes de recherche à l'échelle de la Bretagne, nous présentons ici les résultats de quelques programmes effectués à l'échelle nationale concernant l'impact du changement climatique sur la forêt.

5.4.1. Les observations des forêts face au changement climatique

La forêt française est très diversifiée, principalement car elle est située au carrefour de quatre régions biogéographiques : atlantique, alpine, continentale et méditerranéenne (Landmann *et al.*, 2011). A l'intérieur de ces régions climatiques, la répartition des espèces forestières est sous la dépendance de facteurs édaphiques⁷⁵ et climatiques (températures, précipitations, etc. ; Fig. 49 ; Beltrando, 2011.).

⁷³ <http://www.onf.fr/renecofor/@index.html>

⁷⁴ <http://www.crfp.fr/Bretagne/index.htm>

⁷⁵ Le terme édaphique renvoie à l'influence du sol (pH, humidité, etc.) sur la croissance des végétaux.

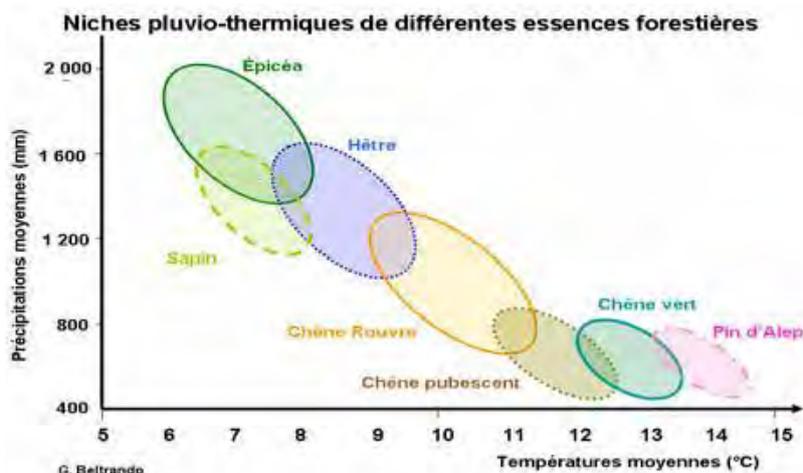


Figure 49 : Niches pluvio-thermiques de différentes essences forestières françaises (valeurs moyennes annuelles) (Beltrando, 2011).

La Bretagne est caractérisée par une grande diversité d'espèces (environ 60 essences) avec une majorité de feuillus, dont les chênes pédonculé et rouvre (Fig. 50).

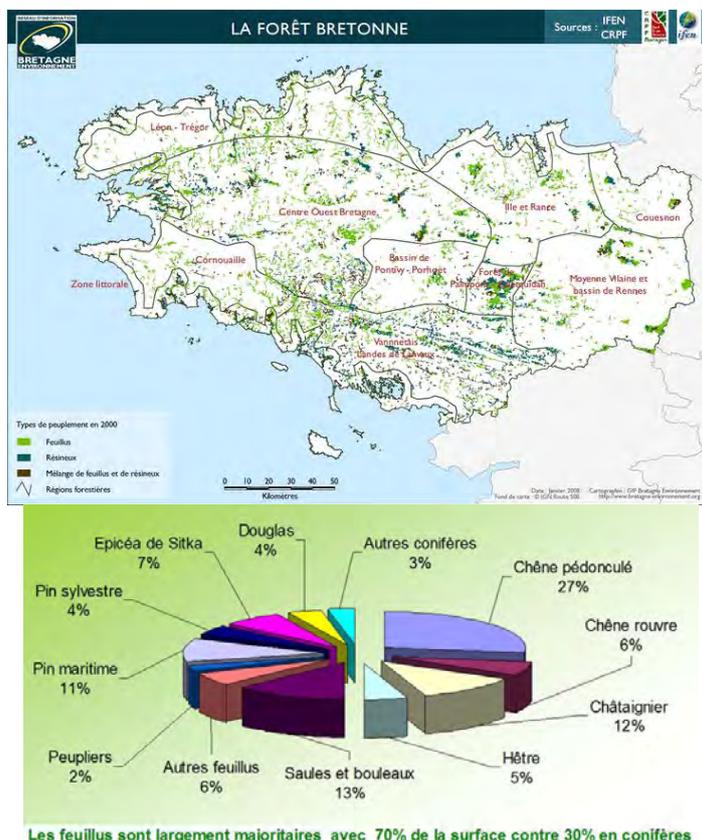


Figure 50 : Cartographie de la forêt bretonne (haut, source : IFEN, CRPF dans Bretagne Environnement⁷⁶) et surface couverte par les essences de la forêt privée bretonne (bas, CRPF Bretagne⁷⁷).

A l'échelle nationale, on constate d'ores et déjà les premiers effets du réchauffement climatique sur les peuplements forestiers : modifications de la phénologie, des aires naturelles de répartition des essences, dépérissements, etc.

⁷⁶ <http://www.bretagne-environnement.org/Media/Atlas/Cartes/La-foret-bretonne>

⁷⁷ <http://www.crfp.fr/bretagne/foret-bretonne/chiffres.html>

➤ Impacts sur la phénologie⁷⁸ des arbres

Les relevés phénologiques réalisés depuis 1997 au sein du réseau RENECOFOR constituent la base la plus complète en milieu forestier à l'échelle nationale. Ils ont permis de mettre en évidence des variations de phénologie des principales essences de la forêt française : toutefois, ils sont trop récents pour en déduire un changement de long terme.

A l'échelle européenne, des travaux ont montré une évolution très significative des dates de début et de fin de végétation au cours des dernières décennies (sources : Menzel et Fabian, 1999 ; Menzel *et al.*, 2006 cités dans Landmann *et al.*, 2011), l'allongement significatif de la durée de végétation (en moyenne 2,9 jours par décennie depuis 1950 chez les espèces de la zone tempérée) étant plus marqué au printemps (plus précoce), qu'à l'automne (plus tardif). Parmi les données phénologiques plus anciennes mais hors conditions forestières ordinaires, on trouve celles relevées par les généticiens sur la phénologie des vergers à graines, qui tendent à montrer une nette avancée des dates de floraison, notamment chez le Douglas pour le site d'Orléans (Fig. 51 ; Landmann *et al.*, 2011).

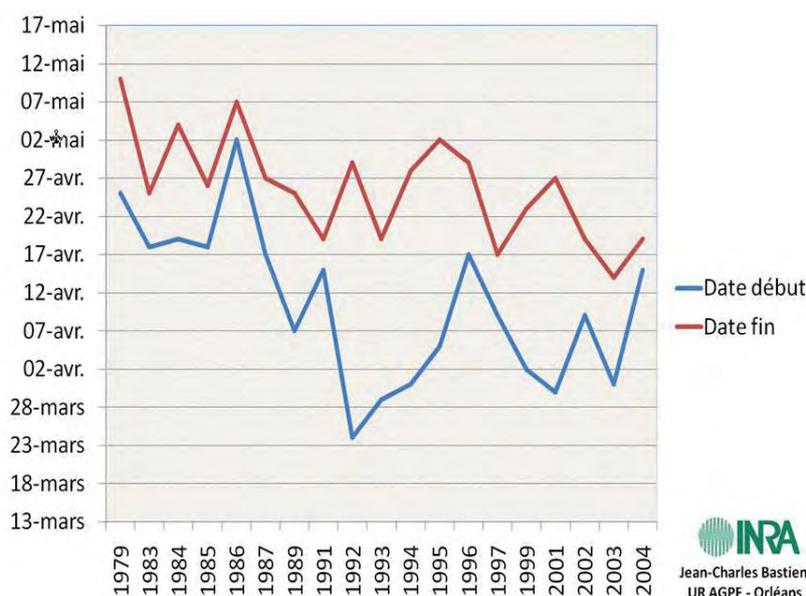


Figure 51 : Date de début et de fin des croisements contrôlés de Douglas à Orléans (source : J.-C. Bastien, INRA cité dans Landmann *et al.*, 2011).

➤ Impacts sur la productivité / croissance des arbres

Une hausse de la productivité depuis le milieu du 19^{ème} siècle a principalement été observée pour des essences feuillues comme le chêne ou le hêtre dans la moitié Nord de la France (Fig. 52). La majeure partie de l'accélération s'est produite entre 1950 et 1980, avec quelques accidents (1940, 1990, etc.) qui coïncident avec des répétitions de sécheresses estivales, auxquelles le hêtre est très sensible. **En moyenne, on peut estimer que la vitesse de croissance du hêtre en 2004 est supérieure de 25 % (pour le Nord Ouest) et de 50 % (pour le Nord Est) à celle de 1870** (ONF, 2007). Cette augmentation de productivité varie en longitude : elle est plus forte concernant le hêtre dans le Nord Est que dans le Nord Ouest. On peut aussi supposer qu'elle varie en latitude mais les données manquent pour faire une description des principales variations à l'échelle de l'hexagone (Landmann *et al.*, 2011).

⁷⁸ Le terme phénologie est utilisé pour parler des événements périodiques du cycle annuel de développement des arbres, tels que le débourrement, la floraison, la maturation des fruits, la sénescence des feuilles, etc.

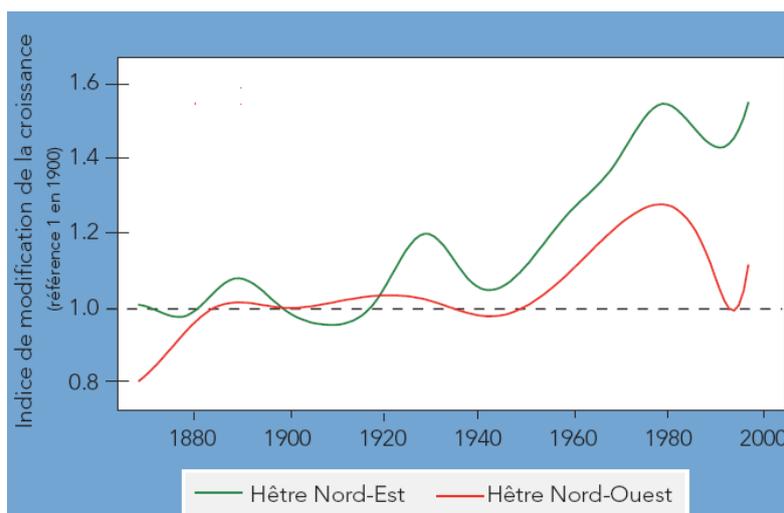


Figure 52 : Courbes de dérive de la croissance en hauteur dominante dans les hêtraies (Nord Est et Nord Ouest) de la France entre 1870 et 2000 (ONF, 2007).

Toutefois, le lien avec le changement climatique n'est pas démontré. En effet, même si l'augmentation en CO₂ atmosphérique stimule la photosynthèse des arbres, plusieurs travaux suggèrent que l'azote serait un facteur déterminant de cette augmentation de productivité (Landmann *et al.*, 2011). Les dépôts azotés (liés aux émissions anthropiques) ont augmenté très rapidement en Europe depuis 1950 : on observe couramment des valeurs de dépôts supérieures à 15 kg/ha/an en forêt. Ces dépôts peuvent fertiliser le sol et donc accélérer la croissance (site INRA⁷⁹).

➤ Modification des aires naturelles de répartition des essences forestières

Peu d'études ont actuellement observé un déplacement de la répartition des aires effectives des arbres en lien avec le changement climatique en cours. En effet, une augmentation des températures de 0,6°C représente en plaine au moins 100 km de migration vers le nord et en montagne au moins 100 m de migration en altitude (ONF, 2007). Les arbres ne pouvant se déplacer à cette vitesse, on observe surtout le recul ou la disparition de quelques espèces au sud de leur aire de répartition, notamment le hêtre dans le sud-ouest de la France, qui présente un état de santé et une régénération naturelle dégradés à la limite Sud de son aire de répartition (source : Silva, 2010 cité dans Landmann *et al.*, 2011).

Par ailleurs, en limite d'aire de répartition, la progression ou la régression des arbres peuvent aussi être étudiées par dendrochronologie⁸⁰, en caractérisant les structures d'âge des populations (cf. O. Planchon, COSTEL).

➤ Le dépérissement des arbres

La littérature rapporte des dépérissements de diverses essences (sapin pectiné au début des années 1980, chêne pédonculé à plusieurs reprises, divers feuillus, etc.) suite à des phénomènes de sécheresses marquants (1949, 1976, 2003, etc.) (Landmann *et al.*, 2011). Concernant la zone atlantique, les signalements de dépérissements des chênaies sont de plus en plus fréquents cette dernière décennie, particulièrement dans les forêts privées des régions Pays de la Loire et Poitou-Charentes. **Depuis quelques années, le CRPF-Bretagne observe une baisse du bocage forestier ainsi**

⁷⁹ <http://www.inra.fr/internet/Directions/DIC/ACTUALITES/NATURE/pdf/foretproduc.pdf>

⁸⁰ La dendrochronologie s'appuie sur l'étude de la variation des largeurs de cernes annuels représentatifs des conditions climatiques auxquelles les arbres ont été soumis au cours de leur croissance.

qu'une tendance au dépérissement du chêne pédonculé dans certaines zones, sans toutefois que cela soit alarmant (M. Colombet, com. pers.). Toutefois ce dépérissement peut être causé par plusieurs facteurs : le changement climatique peut y participer, mais les activités humaines et les maladies ont aussi pu affaiblir les arbres les moins résistants.

➤ Impacts des événements climatiques extrêmes

Les mortalités provoquées par des événements climatiques extrêmes (canicules, phénomènes de gel-dégel, sécheresses, tempêtes) sont à prendre en compte car certaines espèces y sont très sensibles et ils sont susceptibles d'être aggravés avec le changement climatique.

- Les canicules

Les effets des canicules sont variables selon les essences : les feuillus réagissent de façon spectaculaire mais les effets ne sont pas durables tandis que dans les forêts de résineux, les effets sont moins visibles, moins fréquents mais souvent irréversibles (Landmann *et al.*, 2011). Les projections concernant les canicules tendent vers une augmentation de leur fréquence au 21^{ème} siècle. Il est donc important de caractériser la réponse de chaque essence à un épisode de canicule pour en tenir compte dans la sylviculture actuelle et future.

- Le gel

En 2010, le gel de printemps a causé des dégâts conséquents au niveau régional sur les peuplements et les jeunes plantations, surtout dans le Morbihan et les Côtes-d'Armor (CRPF Bretagne). Les gelées printanières tardives impactent durement les arbres, surtout pendant la période de débourrement⁸¹ et avec l'avancement de la phénologie des arbres, leur impact est susceptible de s'accroître à l'avenir. Toutefois, le lien entre les phénomènes de gel et le changement climatique n'est pas établi.

- Les sécheresses

La vulnérabilité de la croissance à un phénomène climatique extrême peut être appréhendée soit par analyse du cerne produit lors d'un phénomène de sécheresse (dendrochronologie) et mesuré largement en France par l'Inventaire Forestier National. Grâce à cela, il a pu être observé que les phénomènes de sécheresse impactent durement les arbres (perte de croissance, dégradation de l'état de santé, vulnérabilité accrue aux bio-agresseurs, mortalité, etc.) et que ces impacts s'étalent dans le temps : ainsi, on a pu observer que la sécheresse de 1976 a eu des conséquences sur la dizaine d'années qui a suivi.

Le programme Dryade⁸² coordonné par l'UMR Inra-Université Henri Poincaré « Écologie et écophysiologie forestières » (Nancy) de 2007 à 2010 avait pour objectif de comprendre les vulnérabilités de la croissance, de l'état sanitaire, de la présence ou des mortalités des principales essences forestières, aux conséquences d'interactions entre aléas climatiques et biotiques. Ce projet a permis de démontrer que c'est la récurrence des sécheresses, plus que leur intensité, qui aurait provoqué le plus de dégâts. Les chercheurs ont aussi constaté que pour un peuplement, les facteurs de vulnérabilité étaient les contraintes édaphiques à l'enracinement, les faibles réserves utiles en eau des sols, une sylviculture peu dynamique (forte densité, éclaircie tardive et faible), l'âge des arbres et parfois la richesse trophique. Au niveau de l'arbre lui-même, les facteurs décisifs sont

⁸¹ Le débourrement est le moment de l'année où les bourgeons végétatifs et floraux des arbres se développent, lesquels sont très sensibles aux gelées printanières tardives.

⁸² Programme ANR Vulnérabilité, Milieux et Climat : <http://www.inra.fr/dryade>

l'espèce, le lieu d'origine, mais aussi une forte croissance au jeune âge ou juste avant l'aléa. Ainsi, les arbres les plus performants en termes de croissance seraient les plus fragiles en cas de sécheresse

En Bretagne, les sécheresses de 1976 et 1988-89 auraient causé la disparition du sapin géant de Vancouver et du tsuga hétérophile. Il en est de même pour les peuplements de sapins pectinés (espèces plutôt de basses montagnes) et de hêtres (pourtant une essence autochtone) qui ont connu des pertes importantes suite à la sécheresse de 1976 (Bretagne Environnement⁸³). Dans le cadre du projet français « Chênaies atlantiques », en cours de 2009 à 2014 et coordonné par l'Institut pour le Développement Forestier (IDF), plusieurs équipes étudient les peuplements de chênes dans les forêts privées des régions Bretagne, Pays de la Loire et Poitou-Charentes. **Le chêne pédonculé, majoritairement présent en Bretagne, est une espèce sensible aux phénomènes de sécheresse.** Les observations ont permis de mettre en relation le risque de dépérissement élevé et les facteurs du milieu agissant sur le bilan hydrique afin de dresser des cartes des zones à risque en cas de sécheresse pour cette espèce.

De façon générale, les peuplements forestiers déploient diverses stratégies qui les rendent tolérants au manque d'eau : système racinaire profond, capacité d'extraction meilleure que les plantes annuelles, forte régulation stomatique. Pour certaines essences comme le chêne, peut s'ajouter un effet anti-transpirant du CO₂ qui permet une meilleure résistance à la sécheresse (Brisson et Levraut, 2010). La réserve en eau des sols et les conditions climatiques conditionnant principalement les réponses des forêts au niveau local, il devient donc urgent de comprendre leur évolution avec le changement climatique et la vulnérabilité de chaque essence au manque d'eau.

- Les tempêtes

Le lien entre le changement climatique et les phénomènes de tempêtes n'est pour l'instant pas clairement établi. Les tempêtes ayant de fortes répercussions sur les forêts (comme ont pu le montrer les épisodes de 1999 et de 2008 en France), il faudrait pouvoir mieux évaluer s'il y aura une véritable recrudescence de ces phénomènes avec le changement climatique, afin d'adapter la sylviculture.

- Perspectives de recherche sur les événements climatiques extrêmes et les forêts

Alors que les simulations climatiques futures prédisent que de tels événements deviendront plus fréquents au cours du siècle, ces résultats soulèvent d'importantes questions sur l'aptitude de nos écosystèmes à résister au changement climatique ainsi que sur les mesures à prendre pour faciliter cette adaptation.

Le programme Dryade a permis de créer un guide de gestion des forêts en crise. Ce guide, élaboré au sein de l'ONF et applicable à l'ensemble de la forêt française, a pour objectif de fournir des recommandations opérationnelles de gestion, de communication et d'organisation ainsi que de rappeler les protocoles standardisés de suivis de l'état sanitaire. Le périmètre couvert comprend les crises sanitaires liées aux agents biotiques (insectes, pathogènes), aux facteurs climatiques (par exemple sécheresse) et aux dépérissements complexes (multi-facteurs). Les crises issues de perturbations instantanées telles que les incendies et les tempêtes n'ont pas été traitées. Concernant les tempêtes, il existe deux autres documents : (i) Le guide de reconstitution des forêts après tempêtes et (ii) le guide gérer la crise « Chablis », qui comprend un dossier « Santé des forêts – protection des bois » (dégâts liés au développement épidémique d'insectes sous-corticaux, les scolytes).

⁸³ <http://www.bretagne-environnement.org/Eau/Les-pollutions-et-menaces/Aleas-climatiques/Les-secheresses/L-impact-des-secheresses-reste-moderne-en-Bretagne>

➤ Prolifération de certains pathogènes

Les agents pathogènes représentent des facteurs limitants notables de la productivité forestière et ont souvent une profonde influence sur la structure des communautés végétales. Il est donc important d'essayer de prédire leur comportement dans un contexte de changement climatique, lequel favoriserait l'accroissement des agents pathogènes qui présentent (ONF, 2007) :

- de fortes capacités d'adaptation (par exemple, les champignons sont capables de résister à des déficits hydriques beaucoup plus élevés que ceux affectant leurs hôtes) ;
- des potentiels de reproduction très importants, entraînant des capacités d'adaptation nettement plus rapides que celles de leurs hôtes ;
- des capacités de dissémination très fortes, renforcées par les activités humaines.

L'état de santé des forêts bretonnes réalisé en 2010 a montré une extension des dégâts dus au dendroctone (scolyte = coléoptère xylophage) dans de nombreux peuplements d'épicéas de Sitka, des dessèchements de pousses ou des mortalités de jeunes plants occasionnés par une succession d'accidents climatiques, enfin des problèmes récurrents sur le châtaignier (maladie de l'encre) et des cas d'oïdium du chêne (site du CRPF-Bretagne). **A l'échelle de la Bretagne, aucune étude ne montre l'évolution de ces pathogènes avec le changement climatique en cours.**

A l'échelle nationale, il existe des travaux sur la prolifération d'insectes-hôtes et de champignons pathogènes des essences forestières, dont nous allons présenter quelques principales informations.

- Les insectes forestiers pathogènes : exemple de la chenille processionnaire

Sous l'influence du réchauffement climatique mais aussi des changements globaux, la répartition des insectes a évolué en France depuis 30 ans. On observe aussi bien des invasions par de nouvelles populations d'insectes que des régressions d'espèces implantées depuis longtemps. Les hivers plus doux et humides permettent à des insectes originaires de régions plus chaudes de s'installer en France et les vagues de chaleur plus fréquentes entraînent des cycles de développement plus courts qui provoquent la prolifération de certaines espèces. De plus, ces nouveaux insectes n'ont pas de prédateurs ni de parasites indigènes dans leur nouvelle région d'installation, ce qui favorise leur prolifération (Landmann *et al.*, 2011).

Peu d'études montrent cependant un lien entre le changement climatique et l'évolution de ces insectes, sauf pour la chenille processionnaire du pin⁸⁴. Depuis les années 1970, cet insecte d'origine méditerranéenne a fortement progressé vers le nord entre la Loire et la Seine, ainsi qu'en altitude dans les Alpes, les Pyrénées et le Massif Central. Cette chenille a franchi la Loire au début des années 1990 et depuis, elle progresse de manière continue vers Paris (Fig. 53). Son extension est fortement corrélée à l'augmentation des températures depuis plusieurs décennies, qui entraîne une augmentation des jours favorables à son alimentation entre octobre et mars (ONF, 2007).

Les travaux récents ont établi que la progression de l'insecte à sa limite Nord de distribution n'est plus limitée par les conditions climatiques défavorables à la nutrition des larves en hiver, mais qu'elle est à présent pilotée par les capacités de dispersion de l'insecte et la distribution de ses hôtes, les pins. Si les impacts sur la production forestière restent modestes sur le front Nord de l'aire de l'insecte (pins présents à l'état dispersé surtout), sa propagation engendre d'importants problèmes économiques et sanitaires, les poils des chenilles étant hautement urticants (Landmann *et al.*, 2011).

⁸⁴ Les chenilles processionnaires du pin (*Thaumetopoea pityocampa*) sont des insectes défoliateurs (qualifie un organisme qui se nourrit du feuillage des végétaux) qui s'attaquent aux pins et aux cèdres dont elles consomment les aiguilles, affaiblissant ainsi les arbres et retardant leur croissance.

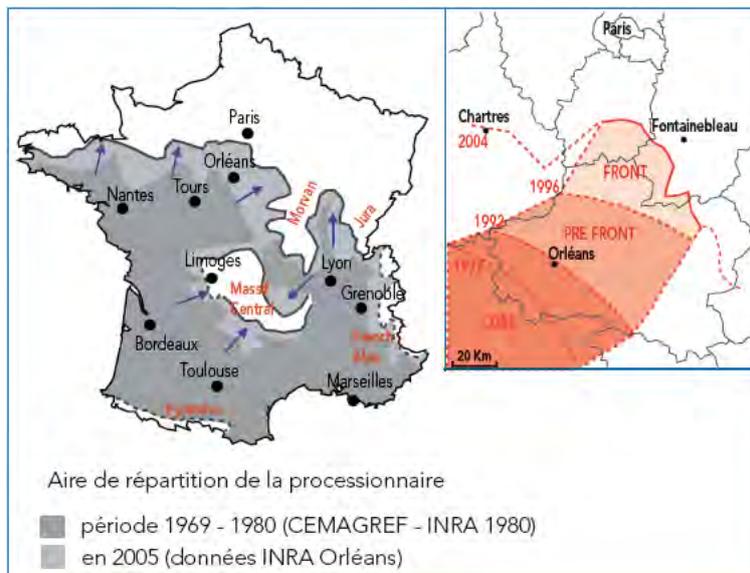


Figure 53 : Progression récente de la chenille processionnaire du pin en France (modifié d'après Robinet, 2006 cité dans ONF, 2007).

- Les principaux champignons forestiers pathogènes

En Bretagne, les différents champignons pathogènes affectant les arbres sont (CRPF, 2005) :

- l'**oïdium**, champignon favorisé par les étés chauds et humides est un agent de défeuillaison très répandu ;

- le **chancre du châtaignier**, originaire du sud de la France, progresse vers le nord, sa présence en Bretagne est récente ;

- depuis 1999, une nouvelle race de **rouille à Melampsora** très virulente affecte les peupliers interaméricains et provoque des défeuillaisons sévères qui entraînent des pertes de croissance notables et un affaiblissement des arbres ;

- la **graphiose de l'orme**, présente depuis plusieurs décennies est toujours virulente ;

- depuis une dizaine d'années, les épicéas de Sitka sont attaqués par deux champignons responsables de la pourriture du tronc : le **phaéole de Schweinitz** et le **fomès**.

Cependant, il est difficile de mettre en évidence des modifications concernant les maladies forestières car cela requiert de longues séries chronologiques et en France, les données qui permettent ce type d'analyse, proviennent du Département de la Santé des Forêts (DSF) qui n'existe que depuis 1989. Toutefois, une analyse globale sur ces données montre une augmentation de maladies forestières qui n'existaient pas dans les années 1970 en France et qui pourrait en partie s'expliquer par le réchauffement en cours. En effet, la plupart des agents de ces maladies émergentes sont thermophiles⁸⁵. Par exemple, la maladie des bandes rouges du pin (*Scirrhia pini*) a émergé dans des zones caractérisées par des températures hivernales douces, telles que le massif armoricain ou le piémont pyrénéen (ONF, 2007).

Le réchauffement peut aussi se traduire par un allongement de la saison de végétation qui peut être favorable aux maladies connaissant une forte multiplication au cours de la saison. Par exemple, depuis quelques années, la rouille des peupliers apparaît plus tôt : une augmentation de 1°C de la température moyenne en mars-avril se traduit par une avancée des infections de 11 jours, qui pourrait conduire à une sévérité accrue de la maladie en fin de saison de végétation. En contrepartie, d'autres parasites pourraient voir leur aire de répartition diminuer en France, tel que le

⁸⁵ Favorisés par des températures élevées.

chancre bactérien du peuplier (*Xanthomonas populi*) présent uniquement dans le nord de la France (ONF, 2007).

➤ **Résumé sur les observations des forêts**

L'écologie historique est face à deux difficultés majeures : disposer de données anciennes fiables et adéquates d'une part et séparer le signal climatique des autres facteurs de pression (apports azotés de l'agriculture, intensification de la sylviculture, introduction d'espèces, densité du réseau routier, etc.) dans les évolutions observées. En effet, ces facteurs réunis ont très certainement joué, jusqu'à maintenant, un plus grand rôle que le changement climatique dans la dynamique de la végétation. Il est donc important de maintenir à long terme des réseaux de suivi de la diversité forestière ainsi que des espèces en limite de leur aire de répartition, pour mesurer et mieux comprendre les effets réels du changement climatique sur les forêts.

Malgré les incertitudes sur le changement climatique à venir, on sait que l'on se dirige vers une augmentation de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère, une hausse des températures et une modification du régime pluviométrique, auxquels s'ajoutent des épisodes extrêmes (sécheresses, canicules, tempêtes) potentiellement plus fréquents et la progression de pathogènes (insectes, champignons). **L'impact du réchauffement climatique serait ainsi considérable sur les forêts, celles-ci ne s'adaptant en effet que très lentement à leurs nouvelles conditions environnementales.** Il est donc utile de pouvoir connaître les conséquences, positives ou négatives suivant les régions et les périodes, que pourrait avoir le changement climatique en tentant d'évaluer les niches futures des essences arbustives.

5.4.2. Les projections des forêts

La quantification des effets du changement climatique sur des systèmes agricoles ou forestiers est contrainte par les nombreuses sources d'incertitude et de variabilité, liées au climat futur, aux systèmes agronomiques, à la complexité de leur représentation par un modèle, à la localisation géographique des sites étudiés, aux propriétés des sols, aux itinéraires techniques, etc. Ces nombreuses incertitudes réduisent notre capacité à prévoir l'évolution de ces systèmes (Landmann *et al.*, 2011). A l'échelle nationale, un seul projet a tenté d'estimer l'évolution des forêts françaises face au changement climatique, nous en présenterons les principaux résultats.

Le projet CARBOFOR⁸⁶ coordonné par l'unité de recherche INRA EPHYSE (Ecologie fonctionnelle et PHYSique de l'Environnement) entre 2002 et 2005, avait pour but d'étudier et de quantifier les effets futurs du climat sur le cycle du carbone, la productivité et la vulnérabilité aux stress abiotiques et aux pathogènes fongiques des forêts françaises. L'approche suivie consistait à initialiser, avec les bases de données nationales des peuplements forestiers et sols, des modèles de fonctionnement primaire d'écosystèmes pour un scénario décrivant les variations locales (50 x 50 km) du changement climatique (scénario B2 du GIEC et modèle ARPEGE) sur le territoire national. L'objectif de cette étude était ainsi de définir les aires potentielles pour chacune des essences forestières en tenant compte des contraintes climatiques futures afin d'apporter une aide aux forestiers pour le choix à venir des meilleures essences de reboisements. Toutefois, cette étude n'intègre pas le rôle futur de l'homme, ce qui constitue une limite majeure à sa validation comme l'indique les auteurs (Lousteau *et al.*, 2004).

➤ **Impacts potentiels sur la phénologie des arbres**

⁸⁶ Programme GICC : <http://www.pierroton.inra.fr/carbofor/>

La modélisation simple de la phénologie (dates de débourrement) a permis de proposer une quantification spatialisée des effets climatiques à l'échelle nationale. Cependant, la forte régionalisation des tendances observées confirme la nécessité d'utiliser un scénario à plus haute résolution spatiale (Lousteau *et al.*, 2004).

Le modèle a montré en moyenne sur un siècle un gain général de précocité du débourrement de 6 à 10 jours pour les feuillus et de 10 à 30 jours en moyenne pour le pin maritime. Il existe cependant des différences géographiques importantes : pour l'épicéa et le pin sylvestre, qui ont des besoins en froid plus élevés, le modèle suggère un débourrement retardé en plaine mais une avancée sur les reliefs. Le modèle prédit aussi une baisse du risque gélif pour les espèces étudiées, signifiant que la précocité du débourrement n'augmente pas la probabilité de gels tardifs (Lousteau *et al.*, 2004). De plus, certaines espèces, requérant une exposition au froid, pourraient être à l'inverse retardées par un climat plus chaud.

Ces décalages phénologiques prévus devraient avoir des impacts importants sur les relations interspécifiques, trophiques ou autres, les communautés seraient ainsi profondément impactées (Landmann *et al.*, 2011).

➤ Impacts potentiels sur la productivité / croissance des arbres

L'évolution dans le temps et la répartition géographique des changements de production dépendent de l'importance respective des effets du CO₂, du réchauffement et de l'aggravation des stress hydriques.

Dans le cadre du projet CARBOFOR, les chercheurs ont montré que les effets combinés du CO₂ et de la température sur les forêts se caractériseraient par une légère augmentation de la production forestière dans un premier temps (2030-2050), suivie par un plateau ou un déclin dans les années 2070-2100. **De façon générale, il apparaît que l'augmentation de la production sera plus importante pour les régions du nord (où le régime hydrique est moins affecté par le scénario) que celles du sud de la France.** Ils prédisent aussi une réponse décroissante de la productivité de l'Est vers l'Ouest en raison, dans la zone Ouest, de l'évolution plus marquée du contraste été/hiver du régime pluviométrique. Par ailleurs, les effets cumulés des sécheresses et la baisse annoncée des précipitations à plus long terme devraient entraîner une baisse de la productivité générale (Lousteau *et al.*, 2004).

Dans le cas du pin maritime, les modélisations prospectives réalisées dans le cadre du projet CLIMATOR (scénario A1B du GIEC) montrent que la productivité du pin maritime pourrait diminuer de l'ordre de -5 % à l'horizon 2050 et -10 % vers 2100 dans les 12 stations de référence; l'augmentation prévue des déficits hydriques n'étant pas compensée par l'augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique (Brisson et Levraut, 2010).

Dans le cas du hêtre, les projections montrent aussi une diminution de la productivité des peuplements actuels qui s'accroîtrait en 2100, en particulier dans la partie Sud et le long de la façade atlantique, avec toutefois une légère augmentation de productivité pour le Nord Ouest (Fig. 54).

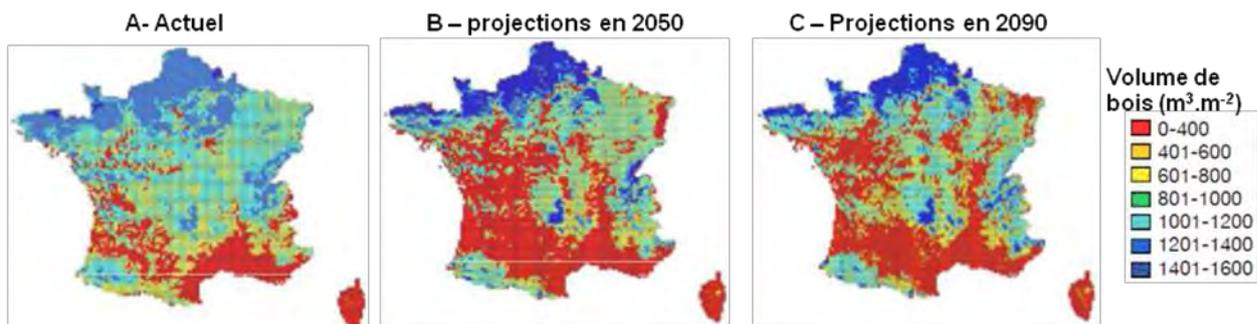


Figure 54 : Productivité du hêtre actuel et projections en 2050 et en 2090, grâce au modèle mécaniste CASTANEA (scénario B2). Code couleurs : productivité basse > rouge, productivité importante > bleu. (source : Davi *et al.*, 2008 cités dans Landmann *et al.*, 2011).

➤ Evolution potentielle des aires de répartition des essences forestières

Dans le cadre du projet CARBOFOR, les scientifiques ont analysé à l'échelle nationale les effets des contraintes climatiques sur l'aire potentielle des principales essences forestières, puis ont modélisé l'effet des changements climatiques sur ces aires géographiques en fonction du scénario B2 du GIEC. Pour cela, ils ont utilisé les données de l'IFN qui permettent une cartographie précise (environ 1 point de relevé pour 130 ha de forêt) de la plupart des espèces forestières (67 essences ligneuses) en France et les données climatiques de base fournies par Météo France. Ils ont ensuite mis en corrélation la présence / absence des espèces et les paramètres climatiques afin de classer les essences en grandes familles de réactions vis-à-vis des contraintes climatiques (par exemple le hêtre est très négativement corrélé avec les températures, à l'inverse du chêne vert). Les cartes individuelles de répartition des espèces sont ainsi regroupées en plusieurs groupes biogéographiques (Badeau *et al.*, 2004):

- le **groupe 1** correspond à des essences de l'étage subalpin. Il est essentiellement représenté par des espèces des Alpes internes auxquelles s'ajoutent des espèces que l'on trouve jusque dans le Massif-central et les Pyrénées orientales ;
- le **groupe 2** rassemble des espèces essentiellement présentes à l'étage montagnard dans les Alpes (à des altitudes inférieures aux espèces du groupe 1), les Pyrénées orientales, la bordure Sud Ouest du Massif-central et le Jura ;
- le **groupe 3** correspond à des espèces communes à l'ensemble des régions de montagne et pouvant s'étendre à l'étage collinéen dans le quart Nord Est de la France ou ayant été introduites dans le Nord Ouest (sapin et épicéa en particulier) ;
- le **groupe 4** est une extension du groupe 3 ; il correspond à des espèces communes en montagne (jusqu'à l'étage montagnard) et très présentes en plaine dans la moitié Nord de la France ;
- le **groupe 6** est un groupe intermédiaire entre les groupes 5 et 7. Il regroupe des espèces de l'étage collinéen, fréquentes dans le Sud et l'Ouest et plus rares dans le Nord et le Nord Est ;
- le **sous-groupe 7a** correspond à l'ensemble des espèces de la moitié Ouest (principalement les Landes de Gascogne, le Massif armoricain, la Sologne) et pouvant s'étendre jusque dans le midi ;
- le **groupe 8** rassemble l'ensemble des espèces méditerranéennes.

Ils ont ensuite remplacé les variables climatiques actuelles par leurs valeurs moyennes futures calculées pour les périodes 2020-2049 et 2070-2099, à partir des sorties du modèle ARPEGE de Météo France et du scénario B2 du GIEC. Les simulations réalisées montrent une forte évolution de la distribution potentielle des essences. **On observe ainsi une progression vers le nord des composantes climatiques méditerranéenne et aquitaine (l'ensemble passe de environ 26 % à environ 74 %), au détriment des influences océaniques, continentales et montagnardes (l'ensemble passe de environ 74 % à environ 26 % ; Figs. 55 et 56).**

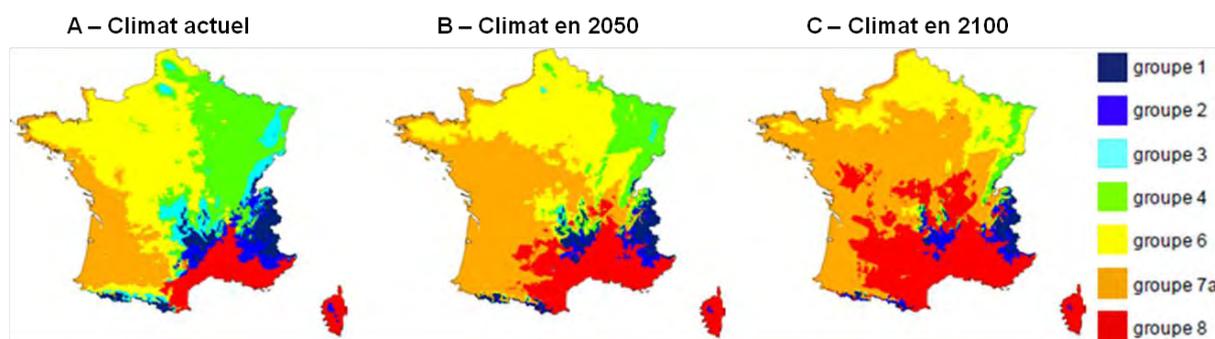


Figure 55 : Répartition géographique de 7 groupes biogéographiques en fonction des climats actuel (A) et futurs (B et C) (Badeau *et al.*, 2004).

		% actuel	% 2100 B2	% 2100 A2
Montagnard	Groupe 1 (Pin cembro)	5.2	2.3	1.0
	Groupe 2 (Aulne incana)	4.1	3.0	2.4
	Groupe 3 (Sapin blanc)	6.3	0.1	0.3
Plus continental	Groupe 4 (Hêtre)	22.4	3.2	1.2
Atlantique nord	Groupe 6 (Châtaignier)	35.6	17.4	16.4
Atlantique sud	Groupe 7a (Pin maritime)	17.2	45.9	30.8
Méditerranée	Groupe 8 (Chêne vert)	9.1	28.1	47.9

Figure 56 : Proportion du territoire couvert par les aires biogéographiques actuellement et selon les deux scénarios : A2 et B2 (communication personnelle du 4 septembre 2007, V. Badeau et J.-L. Dupouey, cités dans Roman-Amat, 2007).

Ces tendances modifient le contour des aires potentielles de distribution de chaque essence. Ainsi, le hêtre (essence de plaine du Nord ou de montagne) tend à régresser, alors qu'à l'inverse, le chêne vert (essence méditerranéenne) se développe jusqu'à dépasser la latitude de la Loire (Fig. 57). Toutefois, des résultats suggèrent que des mécanismes physiologiques de compensation pourraient permettre au hêtre de surmonter, dans certains cas, le stress du changement climatique (source : Leadley et Chedadi, en prep., cités dans Landmann *et al.*, 2011).

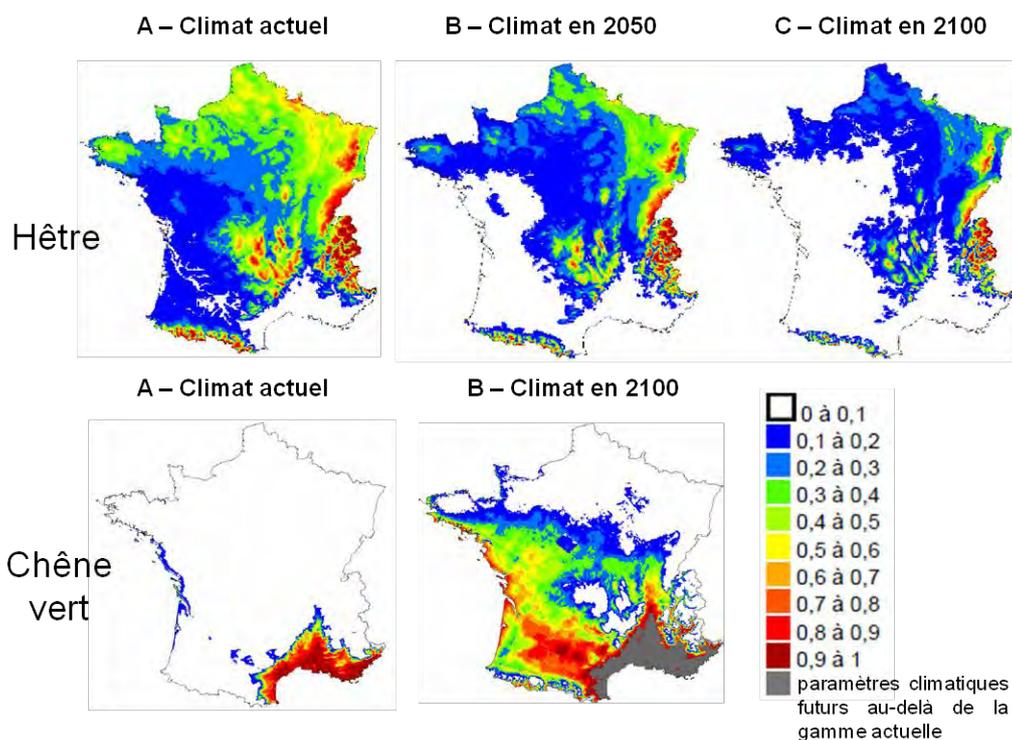


Figure 57 : Analyse logistique de la présence du hêtre (haut) et du chêne vert (bas) pour la période actuelle, et le futur (Badeau *et al.*, 2004).

L'exemple du hêtre pourrait être transposé aux espèces montagnardes : mélèze, sapin, épicéa, etc. et celui du chêne vert aux espèces méditerranéennes : l'olivier, le pin d'Alep, le pin parasol, le cyprès toujours vert, etc. Ainsi, les espèces vulnérables sont pour la plupart celles qui se trouvent actuellement en limite Sud de leur aire de répartition (telles que le hêtre) et celles supportant mal les sécheresses édaphiques (Badeau *et al.*, 2004).

Par ailleurs, l'extension de la forêt méditerranéenne, de productivité faible, au détriment des forêts de production atlantique (les landes de Gascogne) et des forêts de feuillus sociaux de plaine, aurait à terme des conséquences importantes sur la production de bois des forêts françaises (Badeau *et al.*, 2004).

Ces simulations d'évolution spatiale des essences forestières comportent des incertitudes inhérentes à la modélisation climatique et il est nécessaire de les nuancer :

- le scénario B2 est un scénario relativement optimiste ;
- certains facteurs importants comme le CO₂ atmosphérique, l'adéquation locale entre sols et végétaux, l'évolution génétique et les modes de gestion sylvicole ne sont pas encore correctement intégrés dans les modèles ;
- grâce à leur plasticité individuelle⁸⁷ et à la diversité génétique intra-spécifique⁸⁸, les espèces sont capables de vivre sous une gamme assez large de conditions climatiques ;
- le déplacement de l'aire des essences forestières sera également influencé par la concurrence des essences en place et par la fragmentation des paysages à coloniser.

De plus, les vitesses de migrations simulées se situant dans un laps de temps correspondant à la durée de révolution de la plupart des espèces forestières concernées, il est primordial de se demander si les espèces forestières sont capables d'un tel déplacement dans un si court délai.

⁸⁷ Un même individu peut survivre sous une certaine gamme de conditions climatiques.

⁸⁸ Chaque espèce est composée de nombreuses populations dont chacune s'est adaptée à ses conditions de milieu.

A l'échelle du Grand Ouest et dans le cadre du projet CLIMASTER, des projections sont en train d'être réalisées par le CNBF sur l'évolution potentielle de 66 essences ligneuses aux horizons 2020, 2050 et 2080. Ils ont pu réaliser des projections de distribution potentielle des essences forestières dans le Grand Ouest à partir : (1) des projections de température et de précipitations du site Worldclim (IPCC 3), régionalisées sur une maille de 1 km² par la méthode statistique (trois modèles climatiques : CCMA, CSIRO, HADCM3 et selon deux scénarios : B2 et A2) ; (2) des données floristiques et de sol (bilan hydrique, pH, etc.) de l'inventaire IFN réalisé en 2005-2009. **Les premiers résultats ne dramatisent pas la situation en Bretagne, les forêts feuillues atlantiques ne seront pas totalement remplacées par des forêts de type méditerranéen, mais quelques changements se feront toutefois ressentir. On observe aussi un gradient Est-Ouest qui se dessinera, les forêts à l'Ouest subissant peu d'impacts (le climat restant suffisamment humide l'été pour satisfaire les besoins des arbres), à l'inverse des forêts situées à l'Est de la région, qui se trouveront dans une situation de plus en plus sèche** (H. Le Boulter, com. pers.).

➤ Impacts potentiels des événements climatiques extrêmes

- Les canicules

Les épisodes de fortes températures estivales ont probablement une incidence limitée sur la physiologie des arbres, ne provoquant des effets irréversibles sur le fonctionnement foliaire qu'à partir de seuils supérieurs à 40-45°C, lesquels sont rarement observés. Par contre la combinaison de fortes chaleurs avec un épisode de sécheresse risquerait de provoquer de sérieux dommages : réduction voire arrêt de la transpiration foliaire et donc diminution du refroidissement par le processus d'évaporation de l'eau (ONF, 2007).

- Les sécheresses

La sécheresse affecte le fonctionnement et la croissance des arbres de manière plus importante que les fortes températures. Le potentiel hydrique du sol détermine directement le potentiel hydrique dans l'arbre, celui-ci influençant la plupart des fonctions physiologiques majeures (conductance stomatique, assimilation photosynthétique, respiration, etc.). Dans le cadre du projet CLIMATOR, les scientifiques ont projeté l'intensité du déficit hydrique chez les feuillus décidus⁸⁹ et les conifères, à l'échelle nationale et pour le futur proche (2050) et le futur lointain (2090). Ils observent ainsi, que le déficit hydrique augmente au cours du temps, quels que soient le sol, la projection climatique et le site, celui-ci étant particulièrement marqué pour les forêts de conifères dès le futur proche (Brisson et Levrault, 2010). **Non loin de la Bretagne, dans le Calvados, les scientifiques impliqués dans CLIMASTER montrent qu'à l'horizon 2100 et selon le scénario A1B du GIEC, on observerait une accentuation spectaculaire de la situation : ainsi, 79 % des principaux massifs forestiers seraient affectés par un manque d'eau prononcé** (Le Gouée *et al.*, 2010).

Par ailleurs, il a aussi été montré que les flux d'eau et l'assimilation photosynthétique du CO₂ se réduisaient lorsque la réserve en eau du sol descendait au-dessous de 40 % de la réserve utile, affectant ainsi la respiration et la croissance des arbres (ONF, 2007). Si les changements globaux entraînent une augmentation de la fréquence ou de la durée des sécheresses dans certaines régions, le nombre d'arbres affaiblis, stressés, ou carrément dépérissants (ceux en limite d'aire de répartition), risque donc d'augmenter fortement.

- Les tempêtes

⁸⁹ Qui perdent leurs feuilles en automne.

Les projections climatiques concernant les phénomènes de tempêtes tendent vers une augmentation de leur fréquence, bien que le lien avec le changement climatique ne soit pas clairement établi. Si à l'avenir, les tempêtes sont plus fréquentes, voire plus intenses, leurs impacts sur les forêts seront donc plus importants. On peut supposer que ceci affaiblira les peuplements forestiers face à un autre stress.

➤ Prolifération potentielle de certains pathogènes

Les modifications à long terme du climat (températures et précipitations) sont susceptibles d'avoir des conséquences directes sur de nombreux agents pathogènes, dont le développement épidémique (dissémination, infection, multiplication) est fortement influencé par ces paramètres (ONF, 2007). Il est toutefois encore difficile de prévoir quelles seraient les maladies favorisées ou défavorisées. De façon générale, une accentuation des événements climatiques extrêmes avec le changement climatique induirait un stress sur les arbres forestiers, les rendant plus sensibles aux attaques des ravageurs et des parasites.

Compte tenu du potentiel de dissémination très élevé de nombreux champignons, la colonisation de nouvelles zones climatiquement favorables pourrait s'effectuer de façon beaucoup plus rapide que les migrations de leurs hôtes. De ce fait, les agents pathogènes pourraient se retrouver en contact avec de nouveaux hôtes sans co-évolution ou co-adaptation préalable, se caractérisant souvent par une forte sensibilité de l'hôte qui, n'ayant pas co-évolué avec le parasite, n'a pas développé de résistance (Badeau *et al.*, 2004)..

Par ailleurs, l'évolution phénologique des arbres dans le futur pourrait modifier l'importance de certaines maladies en perturbant la synchronisation entre l'hôte et son parasite, certains agents pathogènes n'étant capables d'attaquer leur plante hôte qu'à un stade précis de son développement (en général au cours du débourrement) (ONF, 2007). Cela pourrait donc entraîner dans certains cas des modifications très fortes de l'impact des maladies, certaines voyant leur importance diminuer tandis que d'autres pourraient émerger.

- Les insectes forestiers pathogènes : exemple de la chenille processionnaire

Nous avons vu que l'extension de la chenille processionnaire du pin est favorisée vers le nord de la France par le changement climatique. Les chercheurs de l'INRA d'Orléans ont modélisé la progression de cet insecte selon le scénario B2 et montrent que Paris intra-muros pourrait être atteint dès 2025. Cependant, les événements extrêmes qui risquent de s'accroître avec le changement climatique, sont susceptibles de ralentir cette progression (ONF, 2007).

En plus des changements d'aire de distribution, on peut craindre des changements d'hôtes (observation d'attaques sur le sapin de Douglas dans le Massif Central) et des décalages phénologiques comme au Portugal où des chenilles se développent en été en pleine saison touristique. Afin de ralentir la progression de cet insecte allergène pour l'homme, des méthodes de lutte font l'objet d'investigations : confusion sexuelle, répulsifs naturels, implantation favorisée d'ennemis naturels, etc. De plus, dans les zones ouvertes telles que les espaces verts et les jardins, il faut éviter de planter des pins (son hôte principal). On peut aussi favoriser l'implantation d'autres espèces d'arbres non-hôtes parmi les peuplements qu'elle colonise, afin que leurs substances olfactives perturbent la reconnaissance de ses principaux hôtes (site INRA⁹⁰).

⁹⁰ http://www.inra.fr/presse/processionnaire_du_pin_et_changement_climatique

- Les principaux champignons forestiers pathogènes

Dans le cadre du projet CARBOFOR, les effets du changement climatique ont été étudiés sur plusieurs parasites forestiers couramment signalés en France et observés en Bretagne. Il est ainsi observé que le réchauffement climatique serait favorable à l'extension des aires potentielles de la plupart des espèces étudiées et en particulier celles dont la survie hivernale est limitée par les températures basses comme l'encre du chêne et la rouille du peuplier (Badeau *et al.*, 2004).

Concernant la maladie de l'encre du chêne (*P. cinnamomi*), les simulations réalisées pour le chêne rouge et le chêne pédonculé, font apparaître une expansion des zones à fort risque, de l'ordre de 100 km à l'échelle du siècle et une augmentation générale du risque dans la plupart des régions. Ce risque d'extension est surtout marqué pour 3 zones, caractérisées par des hivers doux : le pourtour méditerranéen, le Sud Ouest et l'ensemble Bretagne-Cotentin (Fig. 58 ; Badeau *et al.*, 2004).

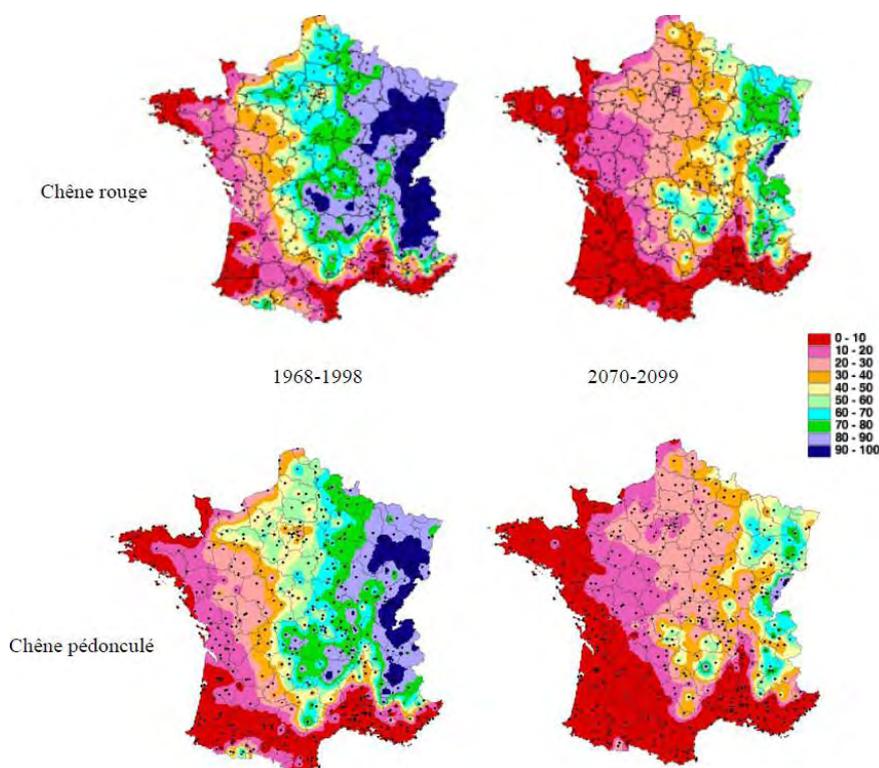


Figure 58 : Zonage des risques d'encre sur chênes : cartographie de l'indice $F_{0.5}$ = fréquence d'années pour lesquelles le taux annuel de survie estimé de *P. cinnamomi* (ASR) est inférieur ou égal à 0.5 ($F_{0.5} < 10\%$: risque fort ; $10\% < F_{0.5} < 40\%$: risque modéré ; $F_{0.5} > 40\%$: risque très faible) (source : Bergot *et al.*, 2004 cités dans Badeau *et al.*, 2004).

Des mesures de prévention doivent être prises dans les régions encore indemnes pour l'instant. Cette précaution est d'autant plus nécessaire qu'il n'existe pas, à l'heure actuelle, de méthode de lutte curative contre l'encre du chêne, applicable en forêt.

Concernant la rouille du Peuplier (*Melampsora allii populina*), un réchauffement de 1°C conduirait à un avancement de 11 jours la date des premières infections, se traduisant potentiellement en fin de saison par une augmentation de 30 % de la proportion de tissus malades (Fig. 59 ; Badeau *et al.*, 2004)

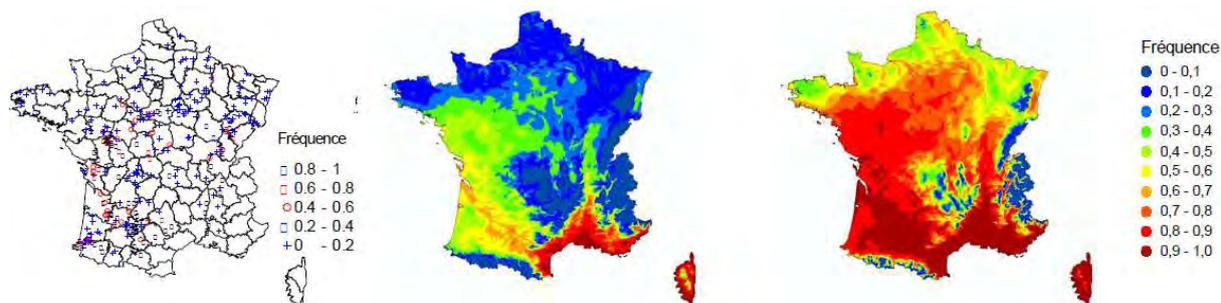


Figure 59 : Carte de répartition de *M. allii-populina* (à gauche) en % de clones de peuplier infectés par une espèce de *Melampsora sp.* dans chaque site toutes années confondues (enquête SPV 1993-2003), et distribution simulée avec un modèle logistique, pour la période 1961-1990 (au centre) et 2070-2099 (à droite) (Badeau *et al.*, 2004).

Dans le cas de l'oidium, le réchauffement se traduirait par une augmentation très importante du risque en terme de fréquence, passant de 10 % à 50-70 % dans le Sud Ouest (Badeau *et al.*, 2004).

L'évolution des sécheresses telles qu'elle est prédite par les modèles climatiques risque d'affaiblir les arbres et de conduire à une baisse de leurs capacités de résistance. Or un certain nombre de parasites sont connus pour être plus agressifs sur les arbres affaiblis par des sécheresses, tel que l'encre du chêne (ONF, 2007). Par contre, l'évolution des précipitations (contraste saisonnier) affectera différemment les espèces selon leur biologie. Certaines espèces, telles que le chancre du châtaignier et la maladie des bandes rouges, préalablement favorisées par le réchauffement risquent d'être défavorisées par la baisse des précipitations estivales, conduisant à une stabilisation voire une régression de leurs impacts pour la fin du 21^{ème} siècle. D'autres espèces actuellement associées à des stress hydriques, telles que la maladie du pin (Fig. 60 ; *Sphaeropsis sapinea*), pourraient voir leur impact augmenter dans le futur (Badeau *et al.*, 2004).

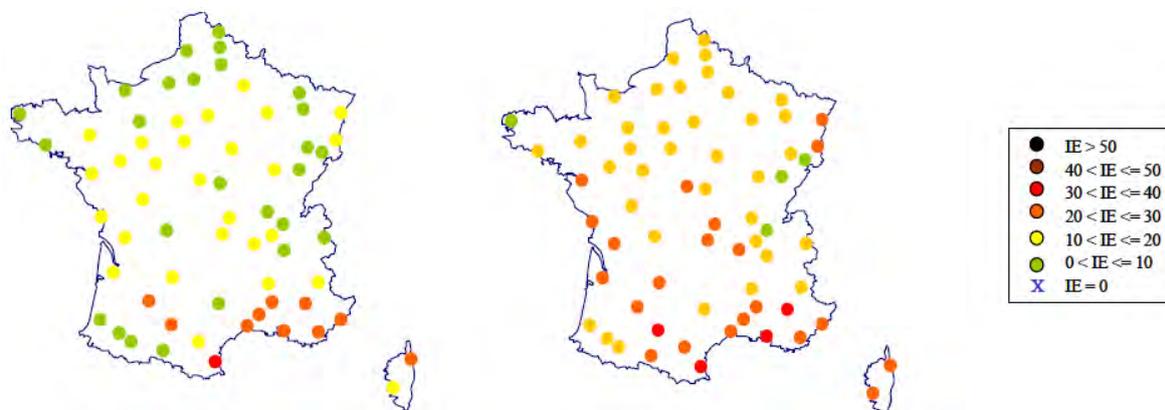


Figure 60 : Indices écoclimatiques (IE) simulés avec Climex pour *Sphaeropsis sapinea*, sous le climat actuel (1961-1990) (A) et pour la période 2070-2099 selon le scénario ARPEGE-Climat (B). Les indices éco-climatiques tiennent compte à la fois des données climatologiques et écologiques favorables au développement du parasite, ainsi plus IE est important, plus le risque est fort (Badeau *et al.*, 2004).

Ainsi, il est très difficile de prévoir quelles seront les conséquences du changement climatique à venir sur les agents pathogènes forestiers, en partie du fait de la forte capacité d'adaptation de ces organismes. La complexité des changements prévus eux-mêmes rend toute prédiction hasardeuse, car les différents effets attendus sur les maladies sont souvent antagonistes. Dans ce contexte, une meilleure compréhension des causes d'émergence de nouvelles maladies forestières est particulièrement importante. Pour quelques parasites connus, en particulier ceux qui ont leur limite d'aire de répartition en France ou ceux qui profitent des sécheresses, une évolution peut déjà être proposée en réponse aux scénarios de changement climatique. Cependant, certains parasites qui ne posent pas de problème dans leur environnement actuel risquent de devenir

beaucoup plus gênants dans un environnement modifié par le changement climatique. Il faut donc rester particulièrement vigilant face à l'émergence de nouveaux problèmes phytosanitaires.

➤ Incertitudes sur les projections climatiques des forêts

Les conclusions issues des études d'impact du projet CARBOFOR (scénario B2) correspondent à une vision modérée, voire optimiste du scénario climatique national en France métropolitaine (Lousteau et al., 2004). Ainsi, l'ensemble des résultats présentés doit être considéré avec prudence, et seulement en termes de tendances. Les incertitudes principales tiennent dans l'évolution de l'effet de serre selon le développement des activités humaines, les modèles climatiques utilisés et les méthodes de régionalisation. Au-delà de ces marges d'incertitudes liées à la complexité de la modélisation climatique, s'ajoutent d'autres facteurs plus difficiles à prendre en compte dans les modèles (Beltrando, 2011) :

- Quel sera le comportement des sols sous l'effet d'un changement durable du climat ?
- Quel sera celui des apports anthropiques d'azote par l'atmosphère ?
- Comment vont se déplacer les ravageurs (insectes) et autres parasites de l'arbre (champignons) ?
- Quelles seront les interactions entre arbres et autres organismes vivants ?
- Comment vont se comporter les forestiers qui, en prise à des problèmes de rentabilité économique, pourraient avoir du mal à prendre des mesures préventives devant autant de questions sans réponse ?
- Quel sera l'effet réel des mesures d'adaptation ainsi mises en œuvre ?

5.4.3. Focus sur l'évolution du risque de feux de forêts avec le changement climatique

Les incendies engendrent des conséquences néfastes sur les écosystèmes et présentent des risques importants pour les enjeux construits à proximité des zones à risque. La présence diffuse et croissante de l'homme et des activités humaines dans les massifs forestiers et en parallèle l'absence de débroussaillage autour des constructions concourent à augmenter les risques de départs de feux.

Généralement, la période de l'année la plus propice aux feux de forêt est l'été, principalement lié aux effets conjugués de la sécheresse, d'une faible teneur en eau des végétaux (qui accroît le risque de combustibilité) et d'une forte fréquentation des espaces. Ainsi, la baisse des précipitations estivales et l'augmentation générale des températures prévues avec le changement climatique risquent d'avoir un impact direct sur l'augmentation du risque de feux de forêts (Roman-Amat, 2007).

La Bretagne est classée « à risque moyen » (règlement communautaire n°2158/92 du 23/07/1992) ou « à risque moyen à important » (source Ministère de l'intérieur - Direction de la sécurité civile) vis-à-vis des incendies. Ces classements sont répartis différemment à l'échelle de la Bretagne, en fonction du climat (les périodes sèches sont critiques), de la nature des formations végétales (par exemple, les peuplements de pin maritime sont particulièrement combustibles) et de la sylviculture mise en place (par exemple, un manque d'entretien aggrave le risque d'incendie) (CRPF, 2005).

Le CRPF Bretagne a réalisé une carte à l'échelle de la Bretagne et par région forestière, en croisant les deux principaux facteurs du risque d'incendie : le climat (sécheresse, vent, etc.) et la nature des peuplements (inflammabilité – combustibilité) (Fig. 61 ; CRPF, 2005). On peut ainsi voir que les régions forestières les plus sensibles au risque d'incendie sont le département du Morbihan

avec ses peuplements de pins maritimes, le quart sud-ouest de l'Ille et Vilaine et les landes du Finistère.

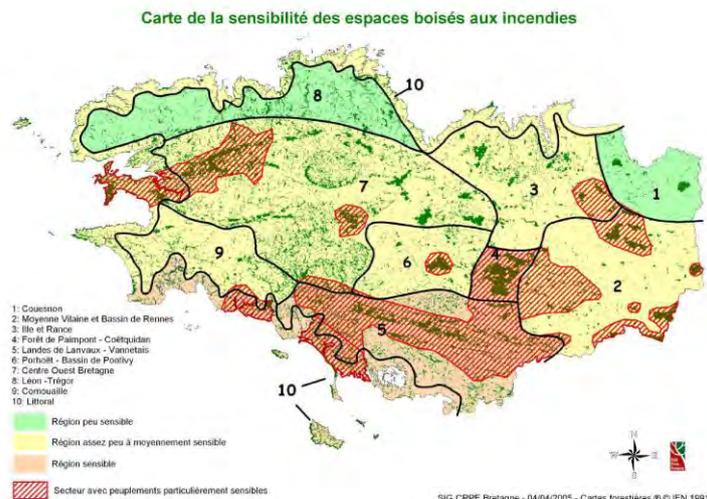


Figure 61 : Carte de sensibilité des espaces boisés aux incendies (source : SIG CRPF Bretagne - Cartes forestières © IFN, 1991 cité dans CRPF, 2005).

Afin d'évaluer si le risque d'incendie a augmenté ces dernières années, Météo France a calculé l'Indice Forêt Météo (IFM) qui est une estimation du risque d'occurrence d'un feu de forêt à partir de données climatiques, pour deux périodes passées (1961-1980 et 1989-2008) et sur l'ensemble du territoire français. Le nombre annuel moyen de jours avec risque d'incendie (IFM > 20) est en augmentation sur l'ensemble du territoire français (+ 22 %) entre les périodes 1961-1980 et 1989-2008 (Fig. 62). **La probabilité d'occurrence de feux de forêts a nettement augmenté dans le sud de la France et devient significative dans le Centre, en Poitou-Charentes, en Pays de la Loire, en Bretagne et jusqu'en Île-de-France** (Chatry *et al.*, 2010). **Toutefois, cette augmentation n'a pas été mise en relation avec le changement climatique en cours.**

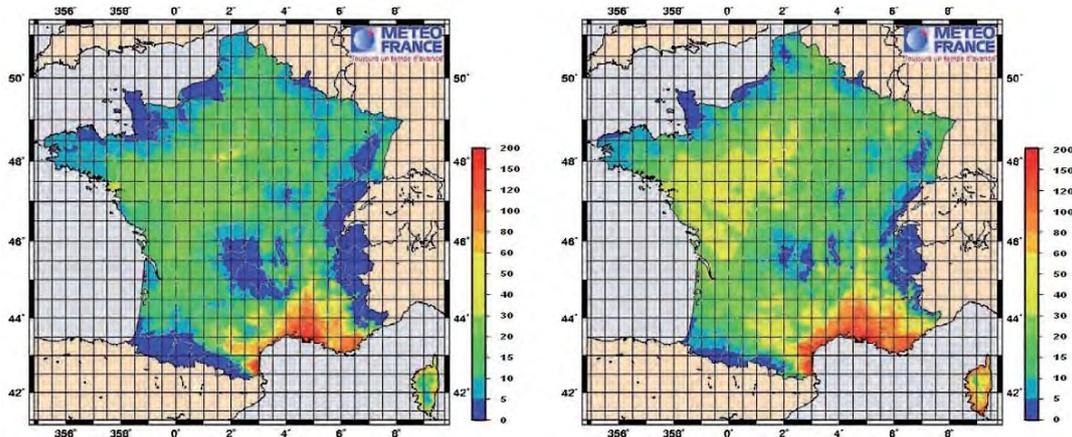


Figure 62 : Cartes du nombre annuel moyen de jours avec risque d'incendie (IFM supérieur à 20) pour les deux périodes d'études : 1961-1980 (à gauche) et 1989-2008 (à droite) (source : Météo France, 2009 cité dans Chatry *et al.*, 2010).

Une mission interministérielle des inspections générales (IGA) et conseils généraux (CGEDD-CGAAER) a été constituée en 2008 pour analyser les conséquences du changement climatique dans les décennies à venir sur l'aléa feux de forêts, l'extension probable des zones sensibles sur le territoire métropolitain et faire les propositions nécessaires pour permettre au gouvernement de préparer ces échéances. Dans ce cadre, pour 3 scénarios d'émission de GES (A1B, A2 et B1), les

simulations d'IFM ont été faites pour 2031-2050, 2051-2070 et 2081-2100 à l'aide du modèle ARPEGE-Climat de Météo France.

Les résultats montrent que le risque d'occurrence de feux de forêts augmente dès 2040, surtout dans le sud-est et l'ouest de la France. Seules les zones de relief et la Corse semblent peu affectées par cette hausse de l'IFM. Cette tendance s'accroîtra fortement pour les horizons 2060 et 2090, jusqu'à atteindre la France entière. On peut observer une différence entre les scénarios d'émissions de GES, le scénario B1 étant plus optimiste (Fig. 63 ; Chatry *et al.*, 2010).

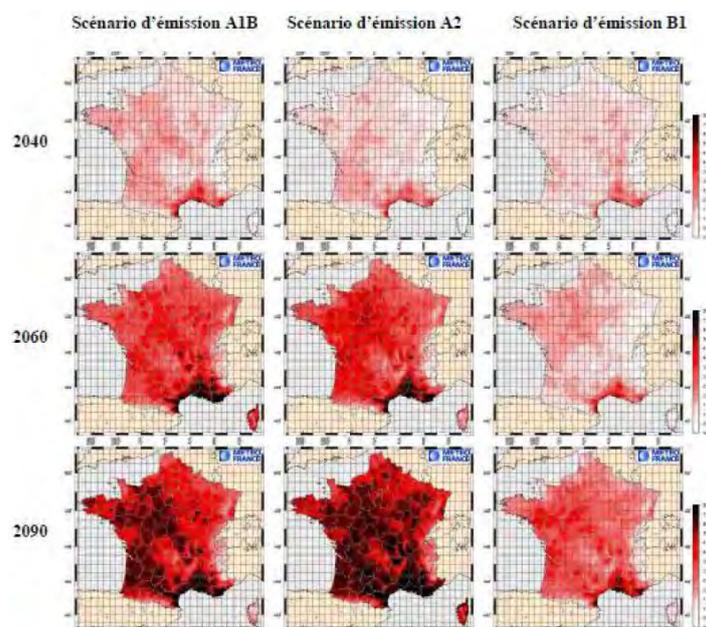


Figure 63 : Cartes d'anomalie d'IFM (climat futur – climat présent observé) pour trois hypothèses d'émission de gaz à effet de serre (A1B, A2 et B1) et trois horizons (2040, 2060 et 2090), la période de référence est 1961-2000 (Chatry *et al.*, 2010).

Dans le cadre de cette mission, des modélisations concernant la sensibilité de la végétation au risque d'incendie ont été réalisées. Elles montrent que pour les années 2031-2050, la surface des massifs forestiers à risque élevé ou très élevé, devrait augmenter en Paca, Languedoc-Roussillon, sud de Rhône-Alpes, Corse et Aquitaine et deviendrait significative en Poitou-Charentes, Pays de la Loire, Centre, Bretagne et au nord du Midi-Pyrénées. Le sud de l'Île-de-France et de la Basse-Normandie devrait également faire partie des territoires à risque élevé (Chatry *et al.*, 2010).

Les risques d'occurrence d'incendies de forêts risquent donc de s'accroître, principalement en lien avec l'accroissement des périodes de sécheresse. A l'échelle de la Bretagne, cette tendance semble augmenter sans que cela soit alarmant, montrant la nécessité de disposer de simulations régionalisées. Par ailleurs, ces projections comportent de nombreuses incertitudes qu'il apparaît nécessaire de réduire (Chatry *et al.*, 2010) :

- en utilisant plusieurs modèles de climat avec d'autres techniques de descente d'échelle ;
- en améliorant les connaissances sur l'adaptation des essences forestières aux sécheresses et sur l'évolution de leur consommation en eau sous l'effet de l'augmentation des températures et du CO₂ ;
- en prenant mieux en compte l'insolation, la pédologie, la pente et plusieurs modèles de bilan hydrique sur les massifs forestiers à une maille de l'ordre de l'hectomètre ;
- en améliorant les bases de données sur les feux, notamment l'indication précise du lieu de départ et de la végétation concernée pour les années passées, en accordant une plus grande priorité et une plus grande attention à la saisie des données pour les années à venir.

Dans le rapport final de cette mission, il est aussi énoncé une série de recommandations relatives à l'amélioration des connaissances, l'information du public, la prévention et la lutte contre les incendies de forêts, la gestion forestière, l'urbanisme et l'aménagement du territoire, susceptibles d'aider à préparer les décisions utiles pour mieux aborder les conséquences de l'augmentation du risque de feux de forêts aux échéances étudiées.

En Bretagne, il est nécessaire de poursuivre la politique de prévention mise en place au début des années 1980⁹¹ qui passe également par le suivi de l'amélioration du réseau d'accès rapide des services de secours, une meilleure pratique sylvicole permettant de rendre les peuplements forestiers moins sensibles au feu et une sensibilisation du public (DRAAFB⁹²). La mise en place d'infrastructures adaptées est aussi indispensable dans les forêts sensibles pour lutter contre les feux déclarés, surtout que les phénomènes de sécheresses risquent de s'accroître avec le changement climatique (CRPF, 2005). Par ailleurs, l'optimisation des moyens de lutte existants pourra se faire grâce à une modernisation accrue des moyens de détection et un renforcement de la prévision.

Pour plus d'informations, le CRPF a réalisé des schémas de protection des massifs forestiers contre l'incendie dans les 19 cantons parmi les plus sensibles du Morbihan et du sud de l'Ille-et-Vilaine. Ces schémas contiennent une cartographie du niveau de combustibilité des peuplements, un relevé des voiries existantes ainsi que des propositions d'aménagement et d'équipement des massifs les plus sensibles (CRPF, 2005).

5.4.4. Conclusion concernant les forêts face au changement climatique

La réserve en eau des sols est le facteur qui influence directement la survie des arbres. Ainsi, les sécheresses influencent et influenceront la santé et la productivité des peuplements forestiers, leur vulnérabilité pouvant être accentuée en cas d'interaction entre sécheresse et attaques de parasites. Les capacités de prévision concernant les forêts sont limitées, car l'évolution spatiale et temporelle des précipitations est particulièrement incertaine.

A l'échelle nationale, l'avancée des stades phénologiques, le dépérissement de certaines essences et la progression de certains pathogènes ont été observés ces dernières décennies, sans qu'ils soient attribués au réchauffement climatique en cours. **A l'échelle de la Bretagne, on observe peu d'évolution des peuplements forestiers dans le passé, les séries de données n'étant surtout pas assez longues pour observer des tendances à long terme liées au changement climatique.**

Deux facteurs antagonistes sont à attendre avec le changement climatique : l'effet positif de l'augmentation du CO₂, combiné dans nos régions à celui des dépôts azotés, et les effets limitants et négatifs des sécheresses, qui pourraient conduire à des renversements de la tendance d'augmentation de la productivité actuellement observée.

Il est ainsi difficile d'évaluer avec précision les effets à long terme du changement climatique sur la productivité des écosystèmes forestiers. Les projections réalisées dans CARBOFOR montrent que la répartition sur le terrain des essences feuillues et résineuses, leur productivité ou la restitution d'eau au milieu seront affectées. Certaines régions (Sud, Sud Ouest) seront touchées dès le futur proche (2050), mais la plupart des autres régions le seront dans un futur plus lointain (2100). Les

⁹¹ Equipements en pistes, réalisation de points d'eau, programme de débroussaillage à la périphérie Ouest du massif de Paimpont depuis 1991, entretien des landes par le pâturage, actions de prévention et d'équipement des forêts contre l'incendie dans 3 cantons du Morbihan et dans les Monts d'Arrée.

⁹² <http://draaf.bretagne.agriculture.gouv.fr/Foret-et-Bois>

modèles indiquent une extension vers le nord des essences de type méditerranéen (chêne vert) accompagnée d'une régression des essences de type tempéré (hêtre) ainsi qu'une prolifération de certains pathogènes. Les essences forestières les plus sensibles seront surtout celles en limite Sud de leur aire de répartition naturelle et celles très sensibles au manque d'eau dans le sol.

Concernant le siècle à venir, les peuplements forestiers bretons ne devraient pas subir de forts dommages. En effet, les projections climatiques ne prévoient pas un climat aride dans les années à venir, à l'inverse des régions méditerranéennes. **Par contre, les faibles réserves d'eau dans les sols bretons et l'accroissement des sécheresses déjà observé pour notre région sont à craindre.** Les sécheresses seront probablement plus fréquentes dans le siècle à venir, fragilisant de plus en plus les essences forestières et augmentant leur vulnérabilité face à d'autres stress (climatiques, pathogènes, etc.).

Ces résultats ne constituent toutefois pas une prévision pour nos forêts car il reste encore beaucoup d'incertitudes sur le comportement des essences forestières mais ils servent à montrer les tendances potentielles qui peuvent être envisagées par les forestiers. Ils ont pour objectif d'aider les gestionnaires à prioriser les actions en indiquant quelles seront les situations les plus vulnérables selon la zone climatique, l'essence et le milieu naturel afin de minimiser le plus possible les impacts néfastes du changement climatique, qui pourrait intervertir dans un laps de temps inférieur à une génération pour la plupart des espèces d'arbres.

5.4.5. Perspectives de recherche sur les forêts face au changement climatique : les projets en cours

➤ - A l'échelle de la Bretagne

Concernant les impacts du changement climatique sur les forêts, le CRPF Bretagne participe à divers programmes de recherche qui visent à améliorer les connaissances sur le sujet. Par ailleurs, il a aussi réalisé des guides sur la connaissance des stations forestières (disponibles sur leur site⁹³) à destination des propriétaires forestiers privés, afin qu'ils puissent favoriser les essences les mieux à même de se développer en fonction de la typologie du sol, du climat, etc., ou pour introduire, le cas échéant, celles qui seront les plus aptes à valoriser le terrain.

Le projet « Pour et sur le développement du chêne en Bretagne » coordonné par le CRPF Bretagne et mené en collaboration avec l'ONF et le CETEF depuis 2010, se propose d'étudier le comportement de différentes essences de chênes (rouvre, liège, etc.) qui proviennent de différentes régions et font face à différents climats. Pour cela, les arbres ont été plantés il y a un an dans 3 sites bretons (Montauban-de-Bretagne, 35 ; La Trinité-Porhoët, 29 et Séran, 56) et leur suivi sera assuré pendant les décennies à venir. Ils permettront de déterminer quelles caractéristiques génétiques seront les mieux adaptées au climat futur.

Le projet français « Chênaies atlantiques », coordonné par l'IDF de 2009 à 2014 en partenariat avec des organismes de recherche et huit CRPF le long de la façade atlantique, dont le CRPF-Bretagne, vise à mieux connaître et détecter les facteurs de dépérissement des chênes pédonculé et sessile en zone atlantique et ainsi de prévenir les risques induits par les changements climatiques globaux. Le protocole ARCHI est un nouveau protocole de diagnostic visuel et de pronostic du dépérissement des chênes. Il permet de définir l'aptitude d'un chêne à surmonter ou non une phase de stress. Ce dispositif permettrait *in fine* de favoriser les chênes ayant mieux résisté à un stress climatique lors de nouvelles plantations. Dans ce cadre, ils ont aussi déterminé le seuil du

⁹³ <http://www.crfp.fr/bretagne/foret-bretonne/stations-forestieres.html>

bilan hydrique à partir duquel les chênes sessile et pédonculé dépérissent sous l'effet d'un stress hydrique afin de mieux définir les zones climatiques à risque le long de la façade atlantique.

Le projet européen INTERREG-IVB REINFFORCE⁹⁴ (Réseau INFrastructure de recherche pour le suivi et l'adaptation des FORêts au Changement climatiqUE), piloté par le Centre National de la Propriété Forestière et l'Institut pour le Développement Forestier (CNPF-IDF) en cours depuis 2007, est un projet à long terme qui vise à mettre en commun les capacités de recherche de 11 instituts européens (dont le CRPF-Bretagne) pour répondre à une préoccupation transnationale qu'est l'adaptation des forêts de l'espace atlantique au changement climatique. Pour cela, ils ont installé un réseau d'arboretum⁹⁵ s'étendant du Portugal au Royaume-Uni, afin de suivre l'évolution du changement climatique et tester l'efficacité des mesures adaptatives préconisées. Ce réseau est constitué de 38 sites construits sur le même modèle, comportant chacun plus de 2000 arbres de 32 espèces et 150 provenances. Le Grand Ouest est constitué de 9 arboreta, dont 2 situés en Bretagne (à Plancœt, 22 et Priziac, 56). L'évolution des espèces selon ce gradient climatique permettra de mieux connaître les seuils thermiques des espèces. Il s'agit donc d'un dispositif clef pour la durabilité des ressources forestières, car les arbres plantés maintenant seront récoltés dans 50 ans, et devront être en mesure de résister aux nouvelles conditions climatiques.

En termes d'anticipation et d'adaptation, le CRPF Bretagne suggère deux types d'action qui favoriseraient la résilience des forêts :

- des peuplements de plusieurs essences seraient plus résistants car les essences n'auraient pas les mêmes besoins en eau, ni le même captage racinaire de cette eau et supporteraient mieux un stress. Si certaines sont moins sensibles ou mieux adaptées que d'autres, elles pourraient aussi assurer la permanence du couvert forestier ;

- des peuplements d'âge différents seraient plus résistants car les arbres âgés n'ont pas les mêmes besoins en eau que les jeunes plants et lors du dépérissement de ces vieux arbres, les jeunes plants permettront d'assurer la continuité du peuplement.

Pour mieux tester ces deux actions, une parcelle d'essai a été mise en place en Ille-et-Vilaine (au nord de Rennes) et sera suivie pendant une trentaine d'années.

➤ - A l'échelle nationale et européenne

La migration naturelle des populations d'arbres est trop lente pour leur permettre de faire face aux changements climatiques à venir. Afin de les aider à intégrer les zones climatiques plus adaptées à leur survie, l'une des solutions est la migration assistée par l'homme, mise en place au sein du projet NOMADE (NOuvelles Méhodes d'Acclimatation Des Essence forestières) coordonné par le CNBF (Conservatoire national de la Biodiversité Forestière). Ce projet se propose de réaliser un bilan des connaissances sur l'utilisation passée des essences introduites et leurs potentialités de croissance ainsi que de développer un protocole expérimental simple de mise en place d'essais d'introduction. Un essai installé en région Centre concrétisera l'ensemble, afin de valider le protocole et pourra constituer la base d'actions de développement ultérieures. Ces dispositifs devront être utilisables par les organismes de développement et facilement duplicables, de manière à permettre l'amorce d'un réseau, voire à terme des pôles de dissémination dans des zones où les peuplements naturels seraient en difficulté.

Le projet FAST (Analyse et Spatialisation de scénario intégré de changement global sur la Forêt française) est coordonné par l'UMR INRA-UHP (Nancy) de 2009 à 2011. Ce projet vise à analyser les évolutions régionalisées possibles de la forêt métropolitaine eut égard aux aléas climatiques et biotiques résultants des scénarios régionalisés intégrés, c'est-à-dire couplant des

⁹⁴ <http://reinforce.iefc.net/>

⁹⁵ Un arboretum est une pépinière où l'on cultive des arbres d'essences diverses.

modèles climatiques avec des contraintes et des modèles économiques correspondants et proposant différentes stratégies d'atténuation et d'adaptation. Il propose aussi d'intégrer dans ces modèles les conséquences des options de gestion sylvicole et des stratégies d'atténuation futures.

Le projet européen ForeStClim⁹⁶ (Stratégies transnationales de gestion forestière en réponse à l'impact des changements climatiques régionaux) est coordonné par l'Universität Trier (Allemagne) de 2008 à 2013. Parmi ses 21 partenaires, on peut noter au niveau français l'ONF et le CNBF, ainsi que 6 partenaires d'Ille-et-Vilaine (les communes de Beignon et Allaire, le GIP du Pays de Redon et Vilaine, le Centre Permanent d'Initiatives à l'Environnement Val de Vilaine, le Syndicat Intercommunal à Vocation Unique du Vauvert et l'Association syndicale libre forestière d'Allaire et du Pays de Redon et Vilaine) pour un site expérimental situé en Ille-et-Vilaine. Ce projet se propose de développer des scénarii régionaux pour chacun des sites expérimentaux afin d'étudier les conséquences du changement climatique sur:

- la croissance des arbres ;
- la diversité des espèces d'arbres (compétition) ;
- l'évolution des stations forestières (eau, carbone) ;
- les fonctions forestières (ex: protection contre les inondations) ;
- les objectifs sylvicoles: bois d'œuvre, bois énergie.

Le programme est prévu pour mettre en exergue les risques écologiques et économiques de certaines stratégies sylvicoles et contribuera à minimiser les risques dans la prise de décision.

Le projet européen Baccara⁹⁷ (Biodiversité et changement climatique, analyser les risques) coordonné par l'UMR BIOGECO-INRA de 2009 à 2013 se propose de développer des outils d'évaluation du risque de dégradation de la biodiversité et de la productivité des forêts européennes sous l'effet des changements climatiques. Ce projet englobe la composition des forêts à différents niveaux trophiques, à savoir des assemblages hôte-parasites (mycorhizes), les producteurs (espèce clés), les consommateurs (les herbivores et les pathogènes) et leurs prédateurs. L'objectif final est de construire un modèle d'évaluation des risques en 3 dimensions intégrant les changements climatiques, la diversité fonctionnelle et la productivité des forêts.

- En termes d'adaptation :

Pour proposer des actions d'adaptation de la forêt française selon les grandes zones climatiques et les groupes d'essences, des forestiers et chercheurs travaillent ensemble depuis 2008, au sein du RMT AFORCE (Réseau Mixte Technologique « Adaptation des FORêts au Changement climatiqUE ») coordonné par l'Institut pour le Développement Forestier (IDF) et consacré à la production d'outils pour aider les gestionnaires à préparer les forêts au changement climatique.

La mission CREAFOR⁹⁸ (Coordination des activités de REcherche sur l'Adaptation des FORêts au changement climatique) a été confiée au GIP Ecofor fin 2008 par le ministère en charge de l'agriculture. Cette mission a pour objectif de dégager les priorités de recherche à mettre en œuvre pour mieux anticiper l'impact des évolutions du climat sur les forêts et entreprendre l'adaptation des forêts face à ces changements. Un colloque international intitulé « Faire face au changement climatique : la contribution de la science forestière » sera organisé par le GIP Ecofor à Tours en mai 2012.

Le Livre vert du projet CLIMATOR, édité en 2010 à l'intention de l'ensemble des acteurs du monde agricole et forestier, comporte un volet « forêt » qui permet d'appréhender les impacts du

⁹⁶ Programme INTERREG-IVB Nord-Ouest Europe : <http://www.forestclim.eu/index.php?id=2&L=2>

⁹⁷ Programme EU-FP7 : <http://www.baccara-project.eu/>

⁹⁸ <http://creafor.gip-ecofor.org/>

changement climatique sur les surfaces boisées françaises au travers de simulations et propose des pistes sylvicoles pour y faire face (Brisson et Levrault, 2010).

Enfin, l'INRA prépare un programme sur l'adaptation de la sylviculture au changement climatique.

- En termes de conservation des essences forestières :

La conservation des essences forestières a comme objectif de conserver les gènes fondateurs de la variabilité actuelle (conserver la diversité génétique de cette espèce) et de conserver au mieux les adaptations locales. Deux types de conservation sont menés en France : la conservation statique (hors du milieu naturel) et la conservation dynamique (dans le milieu naturel). Le CNBF de Guémené-Penfao (44) est fortement impliqué dans la conservation statique puisqu'il assure les récoltes *in situ* et multiplie végétativement les individus récoltés dans sa pépinière. Cependant, l'inconvénient à long terme est que les échantillons ainsi conservés, ne sont pas soumis au jeu de la recombinaison et de la sélection et qu'ils n'engendrent aucune diversité nouvelle.

En Bretagne, le CNBF s'est dernièrement impliqué dans des actions d'essaiage en Bretagne afin de réintroduire des espèces locales en voie de disparition (par exemple l'opération « Essayons les arbres », lancée dans les Pays de Redon et Vilaine). Il est aussi impliqué dans le recensement d'une espèce en voie de disparition dans le massif armoricain (Bretagne et Pays de la Loire), le cormier. Cette espèce, caractérisée par des arbres isolés qui ne sont pas auto-féconds s'adapte très bien aux sécheresses et peut trouver facilement des débouchés économiques. Dans un contexte de changement climatique, ces caractéristiques représentent un fort intérêt pour la sylviculture de demain.

Chapitre 6. Les effets et impacts du changement climatique sur le milieu marin et côtier

6.1. L'évolution physique et chimique du milieu marin	107
6.1.1. L'évolution des températures de l'océan	107
6.1.2. L'évolution de la circulation thermohaline.....	110
6.1.3. L'évolution du niveau de la mer	112
6.1.4. L'évolution du pH	116
6.1.5. Les niveaux marins extrêmes	122
6.1.6. L'impact potentiel des extrêmes climatiques sur l'apport d'eaux douces au niveau des côtes.....	124
6.1.7. Conclusion sur l'évolution physique et chimique du milieu marin et côtier	125
6.2. Les effets du changement climatique sur l'évolution des côtes : étude du risque d'érosion et de submersion en Bretagne	126
6.2.1. Les connaissances actuelles sur les risques d'érosion et de submersion.....	127
6.2.2. Les projections d'évolution de ces risques sous l'effet du changement climatique (étude du Conservatoire du Littoral)	127
6.2.3. La visualisation de l'évolution du trait de côte : exemple de l'outil LITTO-3D	131
6.2.4. Conclusion sur les risques d'érosion et de submersion	132
6.2.5. Les études d'identification des zones à risque face aux aléas d'érosion et de submersion	132
6.3. Les impacts du changement climatique et des événements climatiques extrêmes sur la biodiversité marine et côtière	137
6.3.1. Impacts du changement climatique	139
6.3.2. Impacts de l'« acidification » des océans	160
6.3.3. Impacts des événements climatiques extrêmes	165
6.4. Conclusion concernant les impacts du changement climatique et de l'« acidification » des océans sur la biodiversité marine et côtière	168

S'agissant du changement climatique, on peut rappeler que 90 % de l'augmentation de la quantité de chaleur reçue par la planète depuis le milieu du 20^{ème} siècle a été stocké dans l'océan mondial ; ce qui s'est traduit par une augmentation moyenne des eaux superficielles de 0.17°C depuis 40 ans (à comparer aux 0.6°C de la surface du globe dans les 30 dernières années) (Levitus *et al.*, 2009).

La Bretagne possède une importante façade maritime, avec ses 2730 km de côtes (un tiers du littoral national) et ses 289 communes littorales (86 % des communes bretonnes). Ceci lui confère une large part dans l'économie maritime française qui a produit 28 milliards d'euros de valeurs ajoutées en 2007 et 480 000 emplois (source : Kalaydjian *et al.*, 2010 cités dans Massu et Landmann, 2011). L'économie maritime bretonne se traduit en diverses activités liées à la variété du littoral et au riche patrimoine naturel marin (Bretagne Environnement / Edition 2011) :

- **la pêche maritime** : en 2007, 80 % de la flotte nationale était bretonne fournissant 44 % des captures nationales de pêche et 90 % de la production française d'algues ;
- **la conchyliculture** : (45 % des surfaces conchylicoles françaises) basée essentiellement sur l'exploitation de l'huître creuse (34 % de la production française en 2005), de la moule (34,5 % de la production nationale en 2005) et de l'huître plate ;
- **l'aquaculture marine** : axée sur le poisson (saumon, truite, etc.) mais aussi sur la culture d'algues comme le wakamé ;
- **les chantiers navals** : 15,5 % du secteur français (1^{ère} place pour les chantiers de construction et de réparation navale) et 6 % des emplois bretons ;
- **le tourisme** (4^{ème} position des régions touristiques françaises et en 2^{ème} pour les voyages en bord de mer) ;
- **les sports nautiques** : plus de 750 clubs de voile, canoë, kayak, plongée, etc.

La Bretagne a la particularité de se situer dans la zone de transition entre deux provinces biogéographiques (Boréale au nord et Lusitanienne au sud) ou, pour reprendre la terminologie européenne (CIEM et OSPAR), entre deux écorégions (mers celtiques et Atlantique Nord Est). Cette caractéristique biogéographique fait que l'on s'attend à observer des changements en termes de diversité biologique à tous les niveaux (du gène à l'écosystème).

Cette richesse est fragile car la zone côtière est une zone fortement convoitée où s'expriment et convergent la plupart des pressions liées à l'activité humaine sur l'espace (réduction, artificialisation), les milieux naturels (destruction, dégradation) et les ressources biologiques (chalutage, pêche, extraction de granulats, etc.). Ces risques ont ainsi conduit à mettre en place différentes actions pour la protection et la gestion de la mer et du littoral, avec entre autres récemment la charte des espaces côtiers bretons (2005), le Parc Naturel Marin d'Iroise créé en 2007 et le projet d'un deuxième PNR (golfe normand-breton). Le suivi de la qualité des eaux et des milieux marins est assuré par plusieurs réseaux de surveillance nationaux ou régionaux dont : RePHY (coord. Ifremer) pour la surveillance du phytoplancton, des paramètres physico-chimiques dans l'eau et des phycotoxines dans les coquillages ; Remi (coord. Ifremer) pour la surveillance de la contamination microbiologique dans les coquillages ; Rocch (coord. Ifremer) pour la surveillance de la contamination chimique en mer en Bretagne ; ReBENT (coord. Ifremer) pour la surveillance de la faune et de la flore benthique ; PreVIMER (coord. Ifremer et le SHOM) un système d'observations et de prévisions côtières ; SOMLit, le Service d'Observation en Milieu Littoral labellisé par l'INSU et qui regroupe 7 stations marines sur la façade nationale. Les réseaux de surveillance et les observatoires scientifiques peuvent être mis à profit pour conduire un effort d'observation de longue durée sur les effets du changement climatique.

De part ces différentes spécificités socio-économiques et naturelles, il est important d'identifier les enjeux liés aux impacts du changement climatique sur le milieu marin et côtier en Bretagne.

6.1. L'évolution physique et chimique du milieu marin

La variabilité du climat de l'Europe de l'Ouest est associée à la variabilité de (1) la circulation thermohaline de l'océan Atlantique, qui transporte des eaux chaudes superficielles tropicales vers les hautes latitudes, et de (2) la circulation atmosphérique dominée notamment par les vents de secteur ouest (Seager, 2006).

6.1.1. L'évolution des températures de l'océan

La tendance au réchauffement de l'océan global sur la période 1993 à 2008 est démontrée à partir des mesures de température de surface classiques acquises grâce aux navires ou par satellites, et des données des flotteurs Argo⁹⁹ (Fig. 64, Trenberth, 2010). Ces flotteurs montrent qu'au delà du transfert thermique de l'atmosphère vers la surface de l'océan, ce réchauffement affecte une couche d'eau d'au moins 2000 m. Cependant, la durée des observations en mer est encore souvent trop courte pour distinguer, dans la variabilité observée, la part due au changement climatique d'origine anthropique, de celle due à la variabilité naturelle à différentes échelles de temps du système complexe océan – atmosphère.

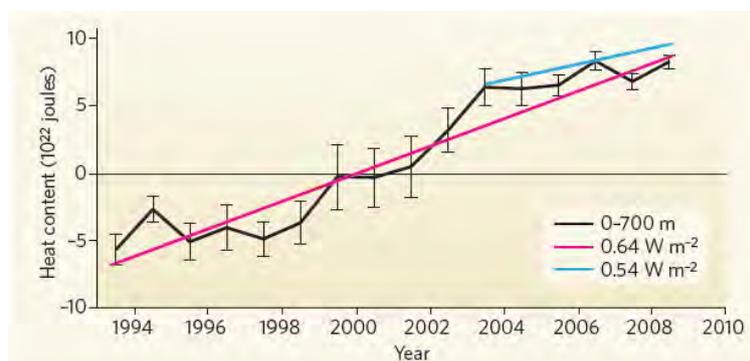


Figure 64 : Evolution du contenu thermique moyen de l'océan global de 1993 à 2008. Le réchauffement des océans est représenté par la ligne noire avec des barres d'erreur (construites par Lyman *et al.*, 2010). L'analyse des mesures à 700 m de profondeur donne une tendance au réchauffement moyen de $0,64 \text{ W.m}^{-2}$ (ligne rouge). Les données disponibles auprès de flotteurs Argo depuis 2003 permettent d'estimer à 2000 m de profondeur un réchauffement de $0,54 \text{ W.m}^{-2}$ (ligne bleue) (Trenberth, 2010).

Le réchauffement à l'échelle de l'océan global diffère selon les régions considérées. Ainsi l'Atlantique Nord, spécialement en mer du Nord dans les eaux européennes, se réchauffe plus vite en profondeur que dans le golfe de Gascogne et à l'Ouest de la péninsule ibérique (Tasker, 2008) ou encore que dans les régions tropicales ou le Pacifique (Barnett *et al.*, 2005). Une élévation de $0,4^\circ\text{C}$ dans les 300 premiers mètres de l'Atlantique Nord a été mesurée au cours des deux dernières décennies (Levitus *et al.*, 2000 ; Fig. 65).

⁹⁹ Réseau global de 3000 flotteurs qui fournissent des profils verticaux de température et de salinité des océans, depuis la surface jusqu'à 2000m de profondeur, cela tous les 10 jours ou plus.

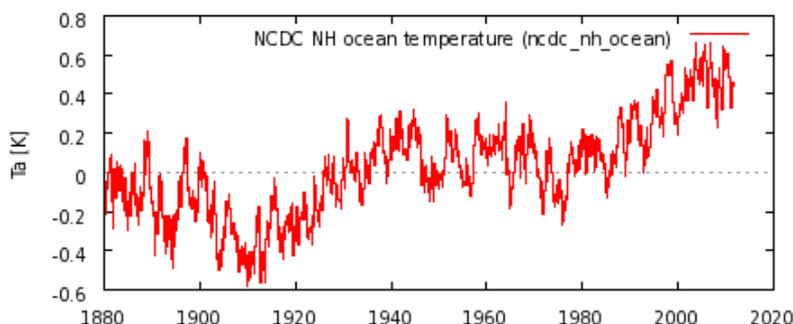


Figure 65 : Variabilité des températures moyennes de surface des océans, de 1880 à 2011 pour l'Hémisphère Nord. Source : NOAA/NCDC, dans KNMI Climate Explorer¹⁰⁰.

Dans l'Atlantique Nord, au large de Plymouth et dans le golfe de Gascogne, la température a augmenté de environ 1°C sur la période 1880-2000, ce réchauffement étant particulièrement marqué au cours de la décennie 1990-2000 (Fig. 66 ; Hawkins *et al.*, 2003). Dans le nord du golfe de Gascogne, l'augmentation est particulièrement forte sur les 4 dernières décennies en ce qui concerne les minima hivernaux (Désaunay *et al.*, 2006).

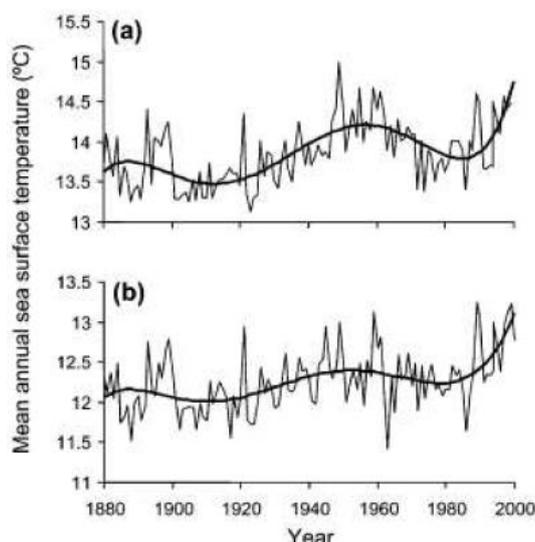


Figure 66 : Variation de la température de surface moyenne annuelle au nord du golfe de Gascogne (a) et dans l'ouest de la Manche, au large de Plymouth (b) (données : Hadley Centre for Climate Prediction and Research¹⁰¹ dans Hawkins *et al.*, 2003).

En mer d'Iroise, de 1958 à 2004, Esnault (2004) n'observe pas de tendance nette au réchauffement, même si une augmentation de plus de 1°C est enregistrée sur la période 1993-2004.

Au large de Roscoff, les données de température de surface du SOMLIT¹⁰² ne montrent pas, depuis 2000, de tendance nette mais révèlent une forte variabilité annuelle, particulièrement marquée pour les minima thermiques (Fig. 67).

¹⁰⁰ <http://climexp.knmi.nl/start.cgi?id=someone@somewhere>

¹⁰¹ <http://www.badc.rl.ac.uk>

¹⁰² <http://somalit.epoc.u-bordeaux1.fr/fr/>

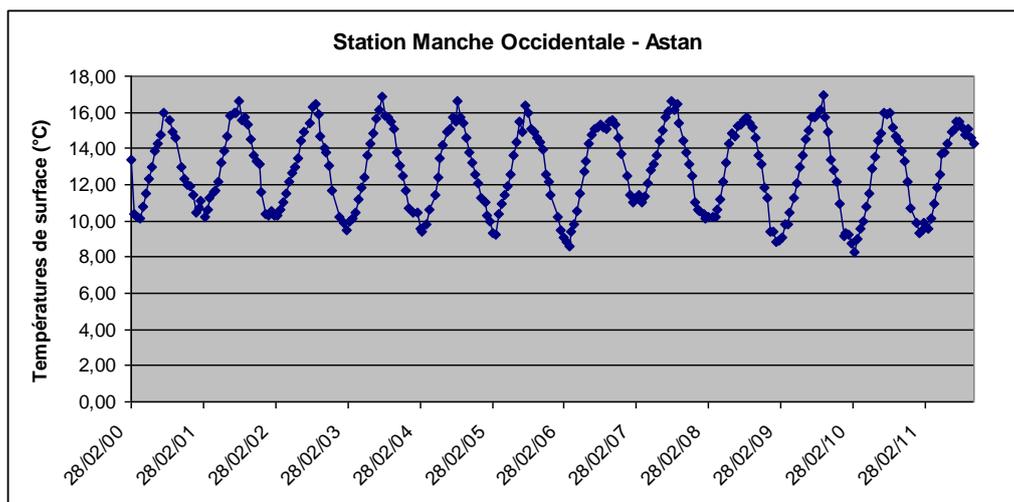


Figure 67 : Evolution des températures de surface (°C) enregistrées à la station Manche Occidentale-Astan, tous les 15 jours entre 2000 et 2011. Données : Service d’Observation en Milieu Littoral, INSU-CNRS.

Ce type de graphiques confirme l'importance d'avoir de longues séries d'observation, car en utilisant des données prélevées à la même station mais sur une période plus longue (35 ans), on peut observer une augmentation de 0,7°C de 1970 à 2005 (Fig. 68 ; Ayata, 2010). Toutefois, ces données ne permettent pas de documenter l'importance relative du signal lié au changement climatique à celle de la variabilité naturelle. En effet :

- la variabilité observée sur 10 ans peut être liée à une variabilité naturelle comme cela peut s’observer sur l’indice d’oscillation Nord-Atlantique (en anglais, NAO : *North Atlantic Oscillation*) (Ottersen *et al.*, 2001 ; Planque *et al.*, 2003) ;
- la variabilité observée sur 35 ans peut être liée à une variabilité naturelle multi-décennale (l’oscillation Atlantique multi-décennale (en anglais, AMO : *Atlantic Multidecadal Oscillation*) par exemple), enchaînant des périodes froides et chaudes.

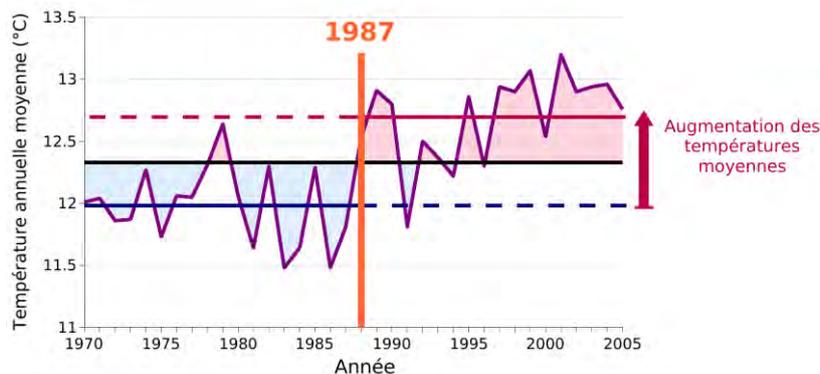


Figure 68 : Evolution des températures annuelles de surface au large de Roscoff de 1970 à 2005 (température moyenne de 12,3°C, ligne noire). La moyenne des températures annuelles atteint 12,0°C pendant la période 1970-1987 (ligne bleu), et 12,7°C pendant la période 1988-2005 (ligne rose). Les données de température proviennent du suivi mensuel d’un site au large de l’île de Batz, Manche occidentale (48°46’50”N-04°03’40”W) (données mises à disposition par P. Morin, Station Biologique de Roscoff, dans Ayata, 2010).

Les projections pour le 21^{ème} siècle montrent que le réchauffement des températures atmosphériques devrait se poursuivre, ainsi que celui des températures de l’océan, de manière beaucoup plus lente pour ce dernier. Helaouët *et al.* (2011) ont projeté l’évolution de la température de surface en mer du Nord pour 3 périodes, 2010-2019, 2050-2059 et 2090-2099 selon le scénario A2 du Groupe d’experts Intergouvernemental sur l’Evolution du Climat (GIEC) (Fig. 69 ; modèle ECHAM :

European Centre of Hamburg). Ces projections montrent ainsi une augmentation de la température de surface en mer du Nord de l'ordre de environ 3°C d'ici la fin du siècle.

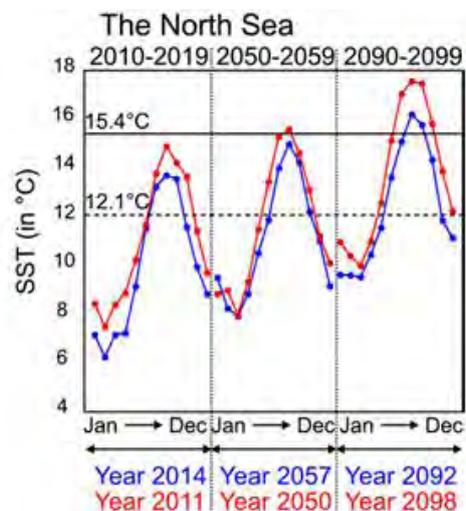


Figure 69 : Evolution des températures de surface en mer du Nord pour les années les plus froides (bleu) et les plus chaudes (rouge) des périodes 2010-2019, 2050-2059 et 2090-2099, selon le scénario A2 (Helaouët *et al.*, 2011).

Ces projections doivent être considérées comme préliminaires car elles n'intègrent pas l'ensemble des processus (par ex. rétroactions du système climatique). Par ailleurs, la stratification thermique de l'océan est liée à la salinité, laquelle dépend également des précipitations et apports d'eau douce, des paramètres très variables et mal pris en compte par les modèles climatiques globaux actuels.

6.1.2. L'évolution de la circulation thermohaline

La circulation thermohaline (en anglais, MOC : *Meridional Overturning Cell*) est une circulation verticale, qui en Atlantique Nord se traduit par la formation et la plongée en profondeur d'eaux froides et salées en mer du Groenland, de Labrador et de Norvège (Shiermeier, 2006). Cette circulation affecte le climat car elle transporte de grande quantité de chaleur. Les courants chauds de surface (Gulf Stream prolongé par la dérive nord-atlantique) contribuent à tempérer le climat de l'ouest de l'Europe.

Il a été observé un déclin de la circulation thermohaline entre 1997 et 2002, associé à une diminution du transport de chaleur vers le nord depuis les années 1990, mais ces conclusions sont à considérer avec prudence de part la forte variabilité naturelle qui peut fausser l'interprétation des mesures ponctuelles (Mercier *et al.*, 2008 ; Fig. 70). Par ailleurs Curry *et al.* (2003) ont observé un adoucissement des eaux en Atlantique Nord et une augmentation de la salinité dans les eaux tropicales entre 1950 et 1990, qui pourraient être corrélés au réchauffement global et aux changements de la circulation thermohaline.

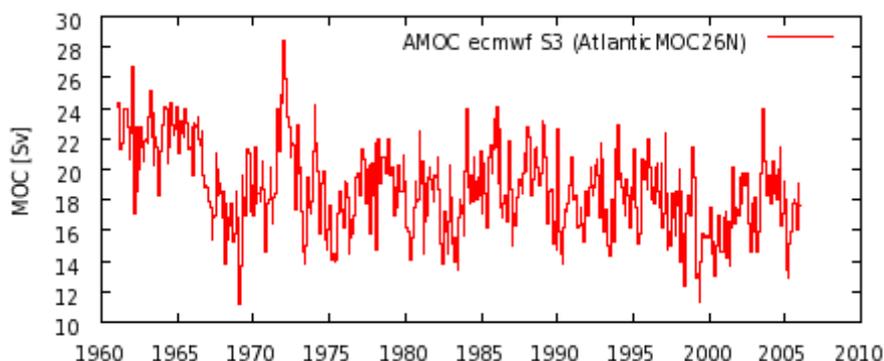


Figure 70 : Evolution de la circulation thermohaline à 26°N de 1961 à 2005. Source : Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT, en anglais : ECMWF, *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*), dans KNMI Climate Explorer¹⁰³.

En théorie, le réchauffement climatique, particulièrement sensible dans l'Arctique, devrait ralentir cette circulation au cours du 21^{ème} siècle, mais pas de manière brusque (Quadfasel, 2005 ; Reid et al, 2009). Le changement climatique devrait entraîner une augmentation de la température et augmenter l'évaporation dans les régions chaudes et la fonte des glaces et les précipitations aux hautes latitudes, ce qui devrait accroître l'apport d'eaux douces et moins froides (GIEC, 2007). La plongée en profondeur de ces eaux de surface, devenues moins salées et moins denses, pourrait être perturbée, ce qui se répercuterait au niveau des courants océaniques et du climat en général. Cependant ces hypothèses sont à considérer avec prudence (Schiermeier, 2006 ; GIEC, 2007 ; Sun et Matsumoto, 2009). Les modèles, qui ont encore du mal à représenter la variabilité naturelle et l'évolution de l'atmosphère, ne prennent notamment pas encore en compte certains phénomènes comme l'accélération de la fonte des calottes glaciaires.

Pour plus d'informations, la thèse de D. Swingedouw (2006 : Origine et impact climatique d'un changement de circulation thermohaline au cours des prochains siècles dans le modèle IPSL-CM4) a étudié le devenir de la circulation thermohaline en Atlantique Nord. Il s'est focalisé sur les effets des changements des flux d'eau douce et des flux thermiques de l'océan sur la circulation thermohaline, en utilisant un modèle couplant l'océan, l'atmosphère, la glace de mer et les surfaces terrestres (IPSL-CM4).

Le projet OVIDE¹⁰⁴ (Observatoire de la Variabilité Interannuelle et DEcennale en Atlantique Nord) coordonnée par l'UMR Laboratoire de Physique des Océans (LPO), se propose d'étudier la variabilité décennale de la circulation océanique dans l'Atlantique Nord en réponse au changement climatique. Pour cela, il est réalisé tous les deux ans depuis 2002, une section hydrographique entre le Groenland et le Portugal, qui va aussi permettre de mieux comprendre le lien entre la variabilité des paramètres océaniques et des paramètres atmosphériques (Mercier *et al.*, 2008). Actuellement ces données sont d'une trop courte durée pour observer l'impact éventuel du changement climatique.

Le projet européen THOR¹⁰⁵ (*Thermohaline Overturning – at Risk?*) en cours de 2008 à 2012 et coordonné par l'Institut für Meereskunde (Université d'Hambourg, Allemagne), se propose d'établir un système opérationnel qui permettra de surveiller et de prévoir l'évolution de la circulation thermohaline en Atlantique Nord à des échelles de temps décennales et d'évaluer sa stabilité ainsi que le risque d'un arrêt dans le cadre du changement climatique.

¹⁰³ <http://climexp.knmi.nl/start.cgi?id=someone@somewhere>

¹⁰⁴ Contribution aux programmes internationaux CLIVAR et IOCCP : <http://www.ifremer.fr/lpo/ovide/index.html>

¹⁰⁵ <http://www.eu-thor.eu/>

6.1.3. L'évolution du niveau de la mer

Le réchauffement global de l'océan entraîne une augmentation de son volume par dilatation thermique. Ce phénomène représente l'une des principales causes de l'élévation du niveau de la mer, avec la fonte des calottes glaciaires. L'élévation relative du niveau de la mer est mesurée depuis la fin du 19^{ème} siècle par des marégraphes et depuis 1993 par des satellites (Topex/Poseidon de 1992 à 2006 ; Jason-1 depuis 2001 ; Jason-2 depuis 2008). Au niveau mondial, le programme GLOSS¹⁰⁶ (Global Sea Level Observing System) de la Commission Océanographique Intergouvernementale de l'UNESCO, initié en 1985, étudie et surveille le niveau de la mer, s'appuyant sur un réseau de 300 stations marégraphiques répartis mondialement.

L'élévation du niveau marin a été quantitativement expliquée par la fonte des glaciers et calottes polaires, par une augmentation de la dilatation thermique en surface et en profondeur et par l'apport d'eaux continentales (Fig. 71).

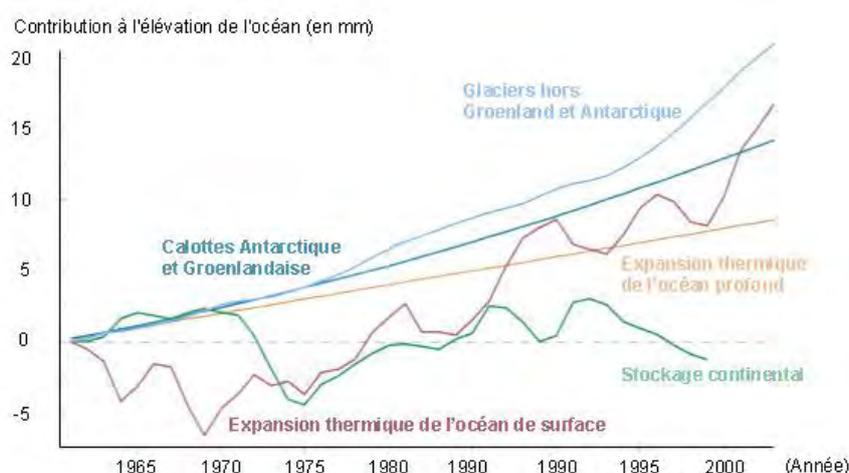


Figure 71 : Contribution à l'élévation de l'océan en mètres (source : Domingues *et al.*, 2008 cités dans ClimObs¹⁰⁷).

➤ Les observations

Selon le GIEC (2007) et Church et White (2011), le niveau moyen mondial des mers s'est élevé en moyenne de 1.1 ± 0.7 mm par an entre 1880 à 1935 et de 1.8 ± 0.3 mm par an de 1936 à 2009 (Fig. 72). Church et White (2011) ont estimé cette accélération entre 1880 et 2009 à $0,009 \pm 0,003$ mm par an. Cette augmentation est majoritairement imputable à la dilatation de l'eau de mer, le rôle de la fonte des calottes glaciaires ayant jusqu'à ce jour été moins important. Cependant, il est difficile de savoir si l'accélération observée de la hausse du niveau marin, traduit une variation décennale ou un renforcement de la tendance à long terme (GIEC, 2007).

¹⁰⁶ <http://www.gloss-sealevel.org/>

¹⁰⁷ <http://www.universcience.fr/climobs/#>

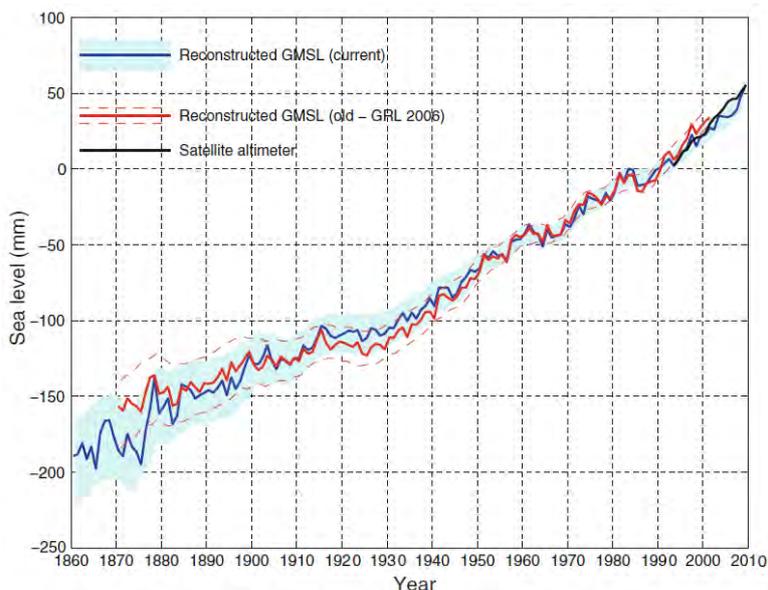


Figure 72 : Niveau moyen mondial des mers de 1860 à 2009 (Church et White, 2011).

L'élévation moyenne du niveau de la mer présente de fortes disparités régionales (Fig. 73). Dans certaines régions, les rythmes de l'élévation sont beaucoup plus rapides que la moyenne mondiale (Pacifique Est), tandis que dans d'autres régions, le niveau de la mer baisse (Pacifique Ouest). Cette variabilité est principalement liée aux variations de température et de salinité, elles-mêmes liées à la circulation océanique générale et aux oscillations climatiques de grande échelle (Trenberth *et al.*, 2007 ; Llovel, 2010).

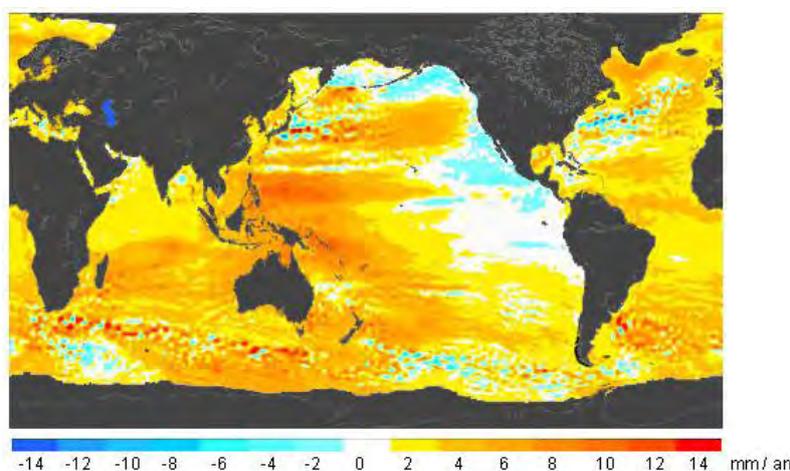


Figure 73 : Disparités régionales de la hausse du niveau marin (1993-2010) par altimétrie satellitaire (source : CLS/Cnes/Legos, dans Climobs¹⁰⁸).

Concernant la France, le SHOM¹⁰⁹ (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) est le référent pour l'observation *in situ* du niveau de la mer. Les données sont gérées, diffusées et valorisées au travers du SONEL¹¹⁰ (Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales) et du réseau RONIM¹¹¹. A l'échelle régionale le marégraphe de Brest fournit des données depuis 300 ans (Regnaud et Dubreuil, 1998 ; Pouveau, 2008).

¹⁰⁸ <http://www.universcience.fr/climobs/#>

¹⁰⁹ <http://www.shom.fr/>

¹¹⁰ <http://www.sonel.org/>

¹¹¹ http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_oceano/maree/maree14.htm

Ces données mettent en évidence une hausse du niveau moyen de la mer à Brest, marquée par une forte variabilité pluriannuelle, en cohérence avec les observations faites par le marégraphe de Newlyn en Grande-Bretagne, en place depuis 1916 (Fig. 74). **Cette élévation est estimée à 0,2 mm par an entre 1806 et 1908, puis à environ 1,2 mm par an au cours du 20^{ème} siècle** (Pouvreau, 2008). Cette accélération est aussi cohérente avec les valeurs disponibles dans la littérature pour Stockholm et Liverpool (Pouvreau, 2008).

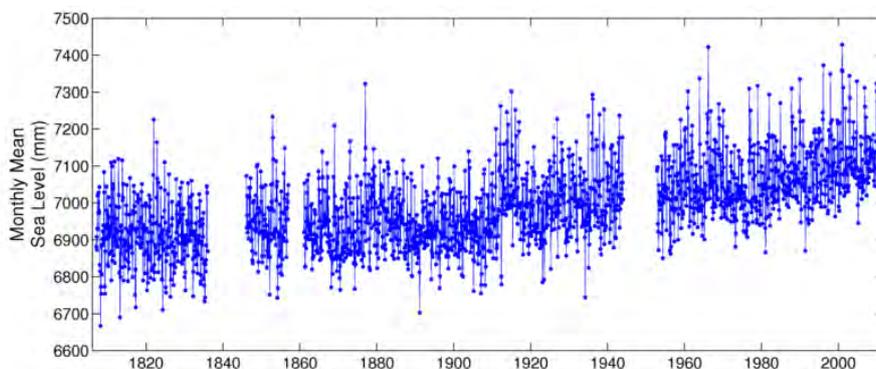


Figure 74 : Evolution du niveau moyen mensuel de la mer à Brest de 1807 à 2010 (source: SHOM sur le site du Permanent Service for Mean Sea Level¹¹²).

Le niveau de la mer local peut aussi être influencé par les mouvements tectoniques. Cependant leur impact se situant à plus long terme permet de considérer que l'élévation du niveau de la mer enregistrée à Brest devrait résulter de processus essentiellement liés au réchauffement climatique (Tréguer *et al.*, 2009). Depuis peu, des mesures de GPS sont réalisées au niveau des marégraphe et vont permettre d'apporter des informations supplémentaires sur les mouvements verticaux des sols, afin de s'affranchir de cette variabilité.

D'autres marégraphe existent en Bretagne, mais les enregistrements sont trop courts pour pouvoir différencier la variabilité liée aux forçages naturels et celle liée aux forçages anthropiques. Ces marégraphe sont celui du Conquet (depuis 1970), de Roscoff (depuis 1973), de Groix (depuis 1975), de l'île de Jersey (depuis 1992), de Concarneau (depuis 1999), du Crouesty (depuis 2002) et de Saint-Malo (depuis 2006). A long terme, ces données pourraient permettre de mieux observer la répartition de l'élévation du niveau de la mer et l'existence de disparités régionales (Regnauld et Dubreuil, 1998).

➤ Les projections

Le GIEC (2007) prévoit pour 2100, une hausse globale du niveau moyen des océans allant de 18 à 59 cm, selon les scénarios utilisés. Cette augmentation sera imputable à un effet croissant et éventuellement majoritaire de la fonte des calottes glaciaires, qui va renforcer l'effet déjà observé de la dilatation liée au réchauffement de l'océan proprement dit. Des études récentes incorporant la fonte des glaces, réalisées par Rahmstorf (2007), Vermeer et Rahmstorf (2009) et Grinsted (2009), estiment en moyenne globale la hausse du niveau de la mer entre 30 et 180 cm pour le 21^{ème} siècle (Fig. 75). La compilation des différentes estimations réalisées à l'aide de ces méthodes semi-empiriques montrent une hausse moyenne globale de 100 cm, cette valeur étant supérieure à l'estimation faite dans le dernier rapport du GIEC en 2007. On peut donc considérer que les estimations faites par le GIEC sous-estiment la hausse probable du niveau de la mer, causée par la fonte des glaciers. Par ailleurs, même si les concentrations en gaz à effet de serre (GES) se stabilisent,

¹¹² <http://www.psmsl.org/>

la dilatation thermique se poursuivra pendant de nombreux siècles, provoquant une montée des eaux beaucoup plus importante que celle projetée pour le 21^{ème} siècle (Llovel, 2010).

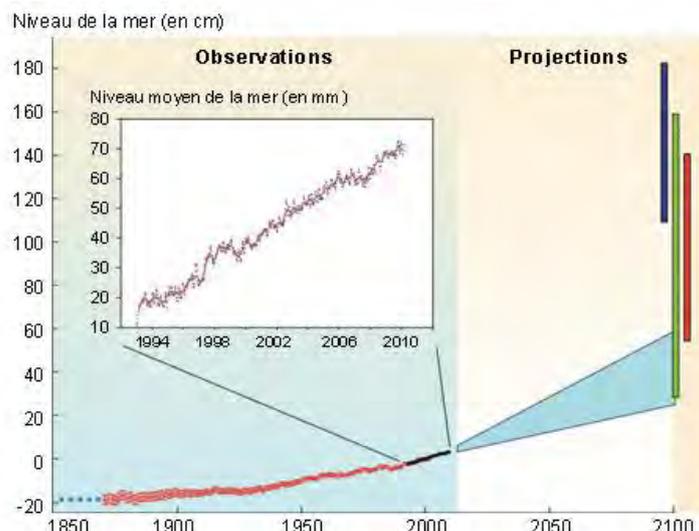


Figure 75 : Evolution du niveau moyen global de la mer entre 1850 et 2100. Les pointillés bleus représentent les estimations faites à partir des études géologiques. La courbe rouge représente le niveau de la mer observé par les marégraphes. La courbe noire représente le niveau moyen global observé par altimétrie spatiale. L’enveloppe bleue représente les estimations basées sur les modèles numériques climatiques du GIEC en 2007. Enfin, les barres verte (Grinsted *et al.*, 2009), rouge (Rahmstorf, 2007) et bleue (Vermeer et Rahmstorf, 2009) correspondent à d’autres projections postérieures à celles du GIEC. Cités dans Climobs¹¹³.

A l’échelle de la Bretagne, Pouvreau (2008) s’est servi des données d’observations du marégraphe de Brest pour simuler l’élévation potentielle du niveau de la mer à Brest aux horizons 2100. Les 300 années d’observation lui ont permis de comparer des valeurs moyennes (niveau moyen de mi-marée, de pleine marée, etc.) simulées par rapport au niveau moyen de la mer observé. Ainsi, la possible évolution du niveau moyen de la mer à Brest aux horizons 2100 varie entre 8,7 et 20,8 cm (ces valeurs variant entre 0,5 et 28,7 cm ; Fig. 76).

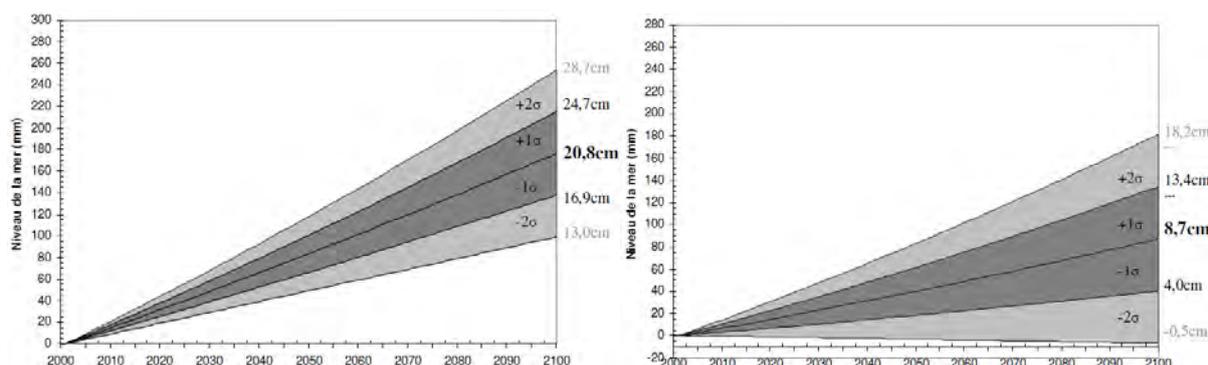


Figure 76 : Hausse du niveau de la mer entre 2001 et 2100 avec en gris les valeurs à \pm deux incertitudes, en noir à \pm une incertitude et en gras, à la valeur exacte de l’accélération. **Gauche** : 1^{er} scénario : Hausse du niveau de la mer prédite pour le 21^{ème} siècle à partir des accélérations calculées avec les niveaux moyens de mi-marée entre 1807 et 2004. **Droite** : 2^{ème} scénario : Hausse du niveau de la mer prédit pour le 21^{ème} siècle à partir des accélérations calculées avec les niveaux moyens de pleine marée entre 1711 et 2007 (Pouvreau, 2008).

L’incertitude de ces projections résulte principalement de l’incapacité actuelle des modèles climatiques à simuler de façon réaliste les divers facteurs responsables de la hausse du niveau de la mer (dilatation thermique, fontes des calottes polaires, échanges d’eau avec les réservoirs

¹¹³ <http://www.universcience.fr/climobs/#>

continentaux). Par ailleurs, les projections des modèles climatiques du GIEC (2007) et celles de Pouvreau (2008) ne prennent pas en compte une accélération possible de ces différents phénomènes. De plus, les modèles actuels reproduisent mal la variabilité décennale du niveau de la mer des dernières décennies, et prédisent donc mal cette variabilité pour les prochaines décennies.

6.1.4. L'évolution du pH

➤ Le phénomène d' « acidification » des océans

Le projet européen EPOCA¹¹⁴ (European Project on Ocean Acidification) porté par l'Observatoire Océanologique de Villefranche-sur-Mer de 2008 à 2012, est un programme majeur qui a étudié les conséquences biologiques, écologiques, biogéochimiques et sociétales de l'acidification des océans en Europe. Le rapport final de ce projet est attendu pour juin 2012, mais les différents auteurs ont déjà publié des résultats, dont certains sont repris ici.

La quantification précise des échanges de gaz carbonique (CO₂) air-mer est essentielle si l'on veut prévoir l'intensité du réchauffement planétaire futur. Le pompage du CO₂ atmosphérique par l'océan provoque des perturbations chimiques qui aboutissent à une diminution du pH des eaux de mer, dite « acidification » (Gattuso *et al.*, 2009). La capacité de séquestration du CO₂ par l'océan est considérable (il contient 65 fois plus de CO₂ que l'atmosphère) et il a absorbé 30 % des émissions de CO₂ anthropique depuis 1800 (Harley *et al.*, 2006 ; Martin *et al.*, 2008). Une fois absorbé par les eaux de surface, le CO₂ est transporté horizontalement et verticalement vers l'océan profond par une série de processus physiques (pompe de solubilité) et biologiques (pompe biologique) (Reid *et al.*, 2009 ; Fig. 77 ; SCDB, 2010).

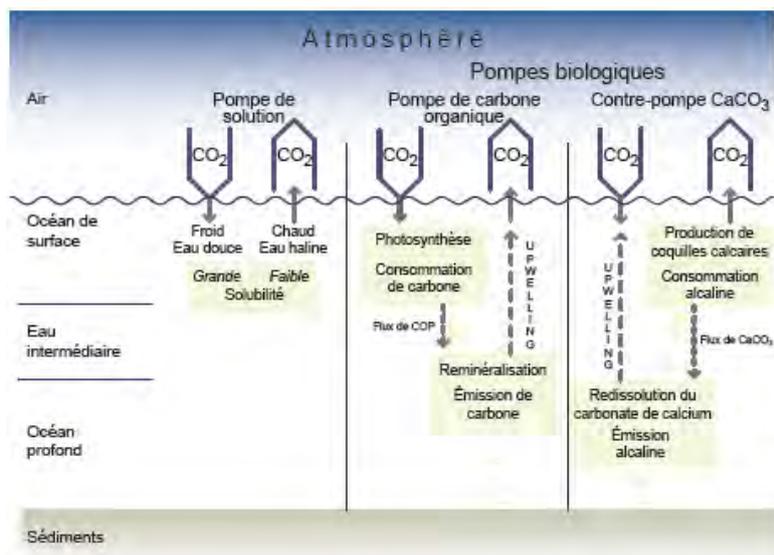


Figure 77 : La régulation des fluctuations naturelles du CO₂ atmosphérique par les océans est contrôlée par trois pompes de carbone océaniques principales. Source : Denman *et al.*, 2007 cités dans SCDB, 2010.

La pompe de solubilité représente le lien entre la solubilité du CO₂ et les températures, la solubilité étant d'autant plus grande que l'eau de mer est froide. Ainsi, des températures plus élevées diminuent la solubilité du CO₂ dans l'eau de mer, ce qui affaiblit l'absorption de ce gaz par l'eau de mer et diminue l'effet tampon des océans sur le climat (SCDB, 2010).

¹¹⁴ <http://www.epoca-project.eu/>

La pompe biologique est associée au captage de CO_2 par le phytoplancton marin, qui, au travers de la photosynthèse, convertit le carbone inorganique dissous (CID) et les nutriments en matière organique. Une partie (30 %) s'enfonce alors dans les eaux plus profondes avant d'être reminéralisée en CO_2 par les bactéries marines. Le captage de CO_2 par la production primaire augmente le pH des eaux de surface alors que la libération de CO_2 par la respiration abaisse le pH, entraînant une variation naturelle du pH des océans (SCDB, 2010).

La pompe biologique joue un rôle particulier dans la régulation de la séquestration du CO_2 par les océans. Le CO_2 dissous réagit avec l'eau pour former de l'acide carbonique (H_2CO_3), qui se dissocie en ions bicarbonates (HCO_3^-) et ions hydrogène (H^+ , qui réduisent le pH), et dans une moindre mesure en ions carbonates (CO_3^{2-}). La réaction des ions carbonates et des ions calcium dissous dans l'eau de mer aboutit à la formation des carbonates de calcium solides (CaCO_3).

De nombreux organismes marins élaborent ces structures calcifiées en précipitant le CaCO_3 sous deux formes de structures cristallines, la calcite (coccolithophoridés, foraminifères, échinodermes, crustacés, etc.) et l'aragonite (ptéropodes, coraux, mollusques) plus soluble (Martin *et al.*, 2008 ; CGDD, 2011). Cette réaction génère du CO_2 , qui peut être transféré à l'atmosphère, diminuant ainsi l'effet tampon de l'océan. Il faut aussi noter que l'effet tampon abaisse le degré de saturation de l'eau de mer (« état de saturation (Ω) ») en minéraux de carbonate tels que la calcite et l'aragonite, avec des effets sur la stabilité et le taux de production de ces composantes essentielles (SCDB, 2010).

Contre-intuitivement la dissolution d'un excès de CO_2 dans l'eau de mer (par exemple par pompage de CO_2 atmosphérique d'origine anthropique) aboutit, par le jeu des réactions chimiques, à la diminution de la teneur en ions carbonates, ce qui déstabilise les carbonates de calcium formés et peut entraîner leur dissolution. L'eau de mer devient « corrosive » pour les composants calcaires (SCDB, 2010). Le CaCO_3 devient plus soluble à mesure que la température baisse et que la pression augmente, donc en fonction de la profondeur de l'océan, où se crée ainsi une frontière naturelle surnommée « l'horizon de saturation » ($\Omega = 1$), au-dessus duquel le CaCO_3 peut se former, mais en dessous duquel il se dissout aisément. L'horizon de saturation se situe dans un océan non perturbé à une profondeur variant entre 200 m à certaines hautes latitudes et dans l'océan Indien, et 3 500 m dans l'océan Atlantique. L'horizon de saturation de la calcite se situe actuellement entre 1500 m et 5000 m de profondeur, et celui de l'aragonite entre 500 m et 2500 m (CGDD, 2011).

Lorsque l'océan « s'acidifie », l'horizon de saturation remonte vers les eaux de surface, devenues moins favorables à la précipitation des coquilles et des squelettes calcaires et plus favorables à leur dissolution (Gattuso *et al.*, 2009). La remontée des horizons de saturation et la dissolution résultante des carbonates est l'un des mécanismes tampon importants à long terme, qui permet la restauration du pH des océans. Cependant elles entraînent aussi une réduction de l'habitat disponible pour les organismes calcifiants (SCDB, 2010). C'est cette valeur limite (horizon de saturation) que les modèles prévisionnels cherchent à déterminer, de par son importance pour les organismes marins calcaires (Tréguer *et al.*, 2009).

➤ Les observations

L'océan mondial absorbe le CO_2 anthropique à un taux d'environ 24 millions de tonnes par jour, l'océan Atlantique contribuant à la séquestration d'environ 38 % de ce total. Les mesures montrent que le pH moyen à la surface de la mer a diminué de 0,1 unité (passant de environ 8.2 à environ 8.1) depuis 1750 (Fig. 78 ; GIEC, 2007 ; Gattuso et Hansson, 2011) et que la concentration en ions carbonates aurait diminué de plus de 10 % depuis le début de l'ère industrielle (Orr *et al.*, 2005 dans Martin *et al.*, 2008). La solubilité du CO_2 étant plus élevée dans les eaux plus froides, celles-ci retiennent naturellement plus de CO_2 et sont plus « acides » que les eaux plus chaudes.

Effectivement de plus importantes absorptions de CO₂ ont été observées dans les eaux de l'Atlantique Nord et de l'océan Austral (SCDB, 2010). Par ailleurs, les résultats des campagnes OVIDE de la dernière décennie, suggèrent un **affaiblissement de l'absorption du CO₂ en Atlantique Nord**, d'autres études ayant aussi révélé **d'importants changements du taux de concentration en CO₂ dans les masses d'eau situées entre 3000 et 5000 m de profondeur** (SCDB, 2010).

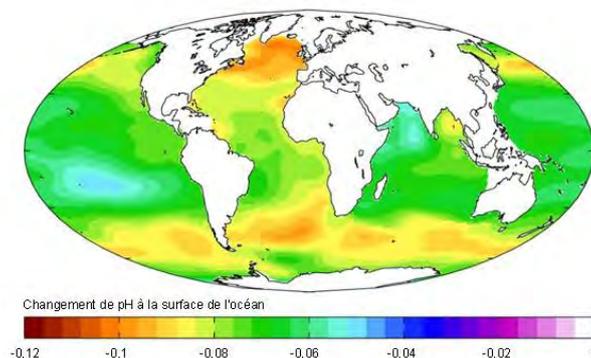


Figure 78 : Estimation de l'abaissement du pH océanique 1700-1990. Sources : Gruber *et al.*, 1996 et Global Ocean Data Analysis Project, cités dans Climobs¹¹⁵.

Il existe peu d'informations publiées sur la dynamique du pH océanique mesuré directement à des latitudes tempérées et moyennes. **En mer d'Iroise, ainsi qu'au large de Roscoff, les données de pH de surface du SOMLIT ne montrent pas, depuis 2000, de tendance nette mais révèlent une forte variabilité annuelle, avec une légère diminution depuis 2009** (Fig. 79). Toutefois, ces données ne permettent pas d'observer un signal du changement climatique car la variabilité des données sur 10 ans peut être liée à la variabilité naturelle.

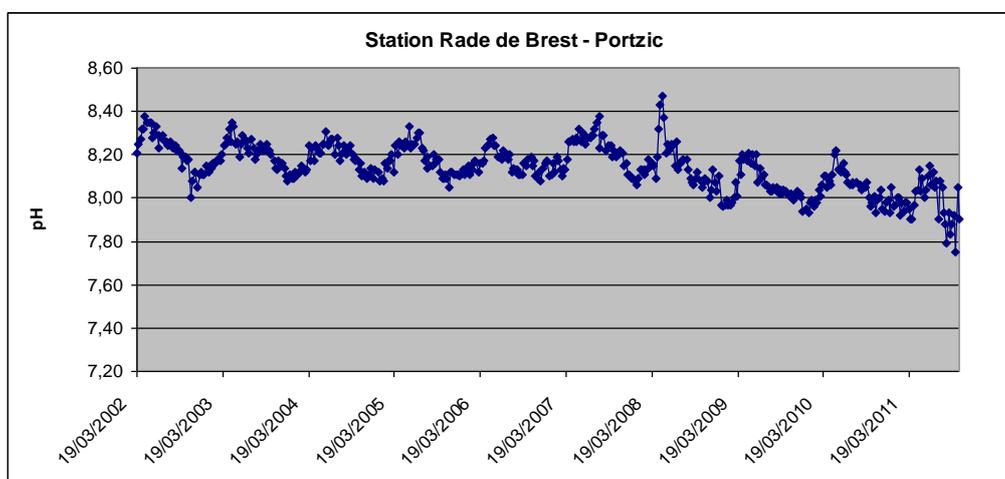


Figure 79 : Evolution du pH de surface enregistré à la station rade de Brest-Portzic, toutes les semaines entre 2002 et 2011 (données : Service d'Observation en Milieu Littoral, INSU-CNRS).

➤ Les projections

L'accroissement du CO₂ dans l'atmosphère est projeté à partir des scénarios d'émissions anthropiques du GIEC. Ainsi, selon le GIEC (2007) et ces différents scénarios, les émissions mondiales de CO₂ devraient augmenter de 40 à 110 % au cours du 21^{ème} siècle, en lien à la consommation d'énergie (combustibles fossiles) au cours de cette période. Il faut aussi noter que la hausse des températures pourrait affaiblir la pompe de solubilité (diminution de la solubilité du CO₂), diminuant

¹¹⁵ <http://www.universcience.fr/climobs/#>

la capacité des océans à absorber le CO₂ atmosphérique, qui s'accumulerait dans l'atmosphère (effet rétroactif sur le climat).

Si les émissions se poursuivaient au taux actuel, la moyenne du pH des eaux marines superficielles (environ 8,1 aujourd'hui) pourrait atteindre 7,8 vers la fin du 21^{ème} siècle (scénario A2 ; Fig. 80 ; Feely *et al.*, 2009) et 7.6 à plus long terme (Denman *et al.*, 2011).

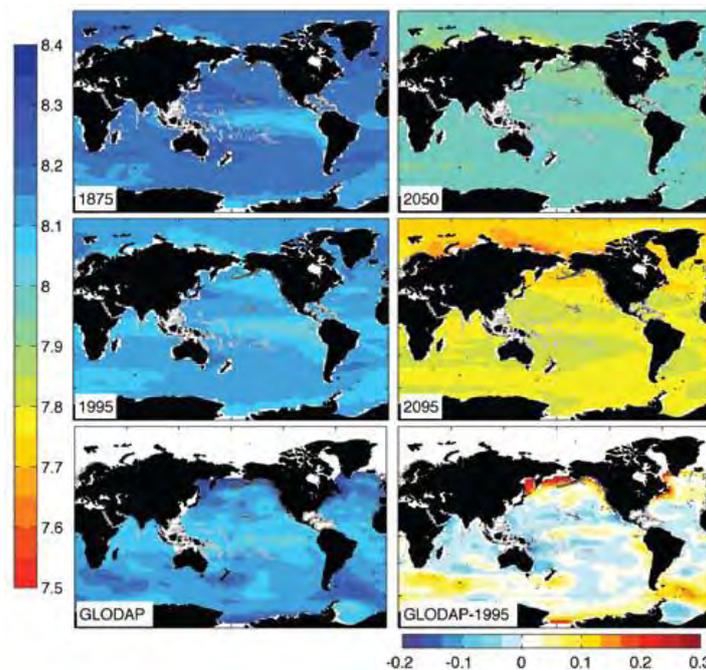


Figure 80 : Projections du pH moyen à la surface des océans autour des années 1875, 1995, 2050 et 2095 (Feely *et al.*, 2009).

De plus, les prévisions indiquent que les hausses de CO₂ atmosphérique et de température réduiront les taux de production des carbonates de calcium utilisés par les organismes calcifiants (Fig. 81 ; Feely *et al.*, 2009).

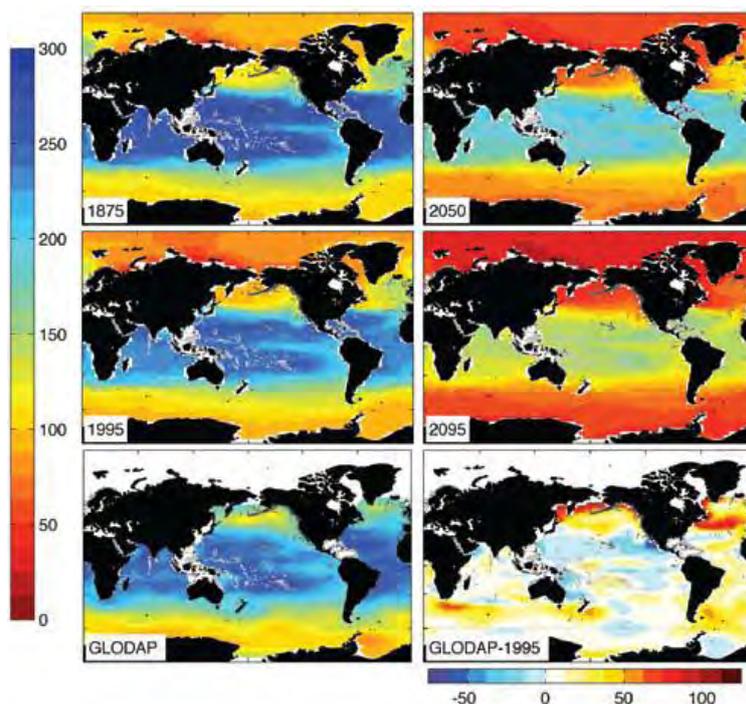


Figure 81 : Projections du taux moyen de CaCO_3 à la surface des océans autour des années 1875, 1995, 2050 et 2095 (Feely *et al.*, 2009).

L'« acidification » de l'océan entraîne la remontée de l'horizon de saturation des carbonates. Les projections réalisées par Feely *et al.* (2009) montrent que l'état de saturation en aragonite (Ω_{ar}) et en calcite (Ω_{cal}) diminuera d'ici 2100 (Fig. 82). Il est prédit que, pour l'aragonite, l'horizon $\Omega_{ar}=1$ atteindra avant 2100 la surface de l'océan Austral, où sa profondeur moyenne est aujourd'hui de 1040 m. Il s'élèvera de 2820 à 110 m dans le nord de l'Atlantique Nord (Orr, dans Gattuso et Hansson, 2011).

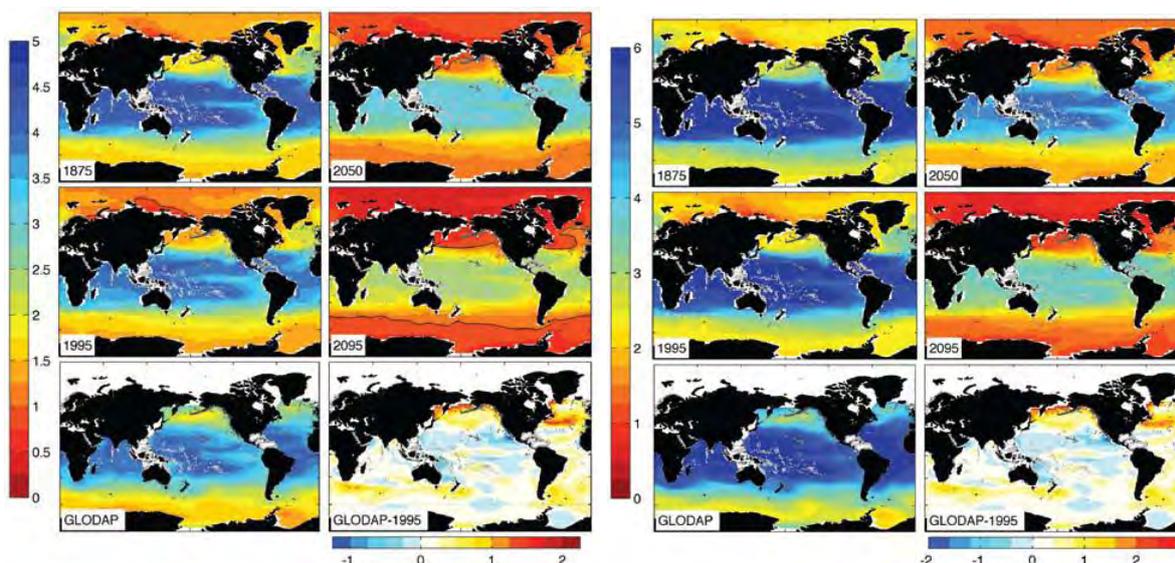


Figure 82 : Projections du Ω_{ar} (gauche) et Ω_{cal} (droite) à la surface des océans autour des années 1875, 1995, 2050 et 2095 (Feely *et al.*, 2009).

Ces différentes projections montrent aussi la forte sensibilité des océans polaires au phénomène d'« acidification » des océans. Concernant l'océan Arctique, cette sensibilité peut être expliquée par le fait qu'il est déjà faiblement saturé en carbonates et particulièrement sensible au changement climatique (Orr, dans Gattuso et Hansson, 2011). Le recul des glaces et l'adoucissement

des eaux, en réponse au changement climatique, peuvent conduire à une diminution des taux de carbonates de calcium et donc des taux de saturation en carbonates. Les projections du GIEC (2007) montrent que le changement climatique amplifiera ce phénomène de sous-saturation assez rapidement pour l'aragonite (en 2020 dans l'océan Arctique et en 2050 dans l'océan Austral), puis d'ici la fin du 21^{ème} siècle pour la calcite (Fig. 83).

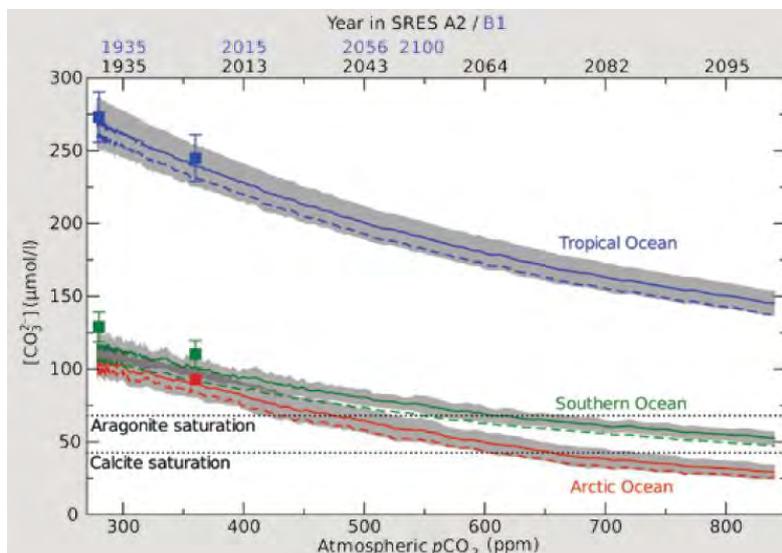


Figure 83 : Projections des concentrations en ions carbonates à la surface des eaux en fonction du taux de CO₂ atmosphérique, entre 1935 et 2095 pour les scénarios B1 et A2. Les moyennes annuelles (ligne) et les minima mensuels (pointillés) pour l'océan Arctique (rouge), l'océan Austral (vert) et l'océan Tropical (bleu) sont ici représentés (Meehl et al., 2007).

Ces tendances ont aussi été observées par des chercheurs du Réseau d'Excellence Européen EUR-OCEANS qui ont simulé l'évolution du phénomène d'acidification des océans. **Leurs projections selon le scénario A2 du GIEC, montrent que les eaux baignant le massif armoricain (au niveau de 48°N, latitude de Brest) seront affectées avant la fin du 21^{ème} siècle** (Tréguer et al., 2009).

➤ Projets de recherche finalisés et en cours

Alors que les flux de CO₂ à l'interface air-mer sont bien étudiés en milieu océanique, les études réalisées en milieu côtier restent peu nombreuses et le rôle de l'océan côtier dans la pompe globale du CO₂ atmosphérique reste mal évalué. Le projet CO₂ ARVOR¹¹⁶, porté par l'équipe de chimie marine de la station biologique de Roscoff entre 2008 et 2010, se propose justement d'étudier le cycle du carbone dans 3 milieux côtiers, un écosystème estuaire-rade directement soumis aux apports anthropiques (la rade de Brest), un système plume d'estuaire-plateau stratifié (plume de la Loire/Atlantique Nord, voir aussi projet CALVI) et un système mer côtière (la Manche Occidentale).

Le projet européen EPOCA¹¹⁷ a publié un guide des meilleures pratiques pour la recherche et le rapport des données sur l'acidification des océans (A Guide to Best Practices in Ocean Acidification Research and Data Reporting) afin de fournir un cadre de recherche aux scientifiques travaillant dans ce domaine en pleine expansion. Le rapport final de ce projet est attendu pour juin 2012, mais un livre ("Ocean Acidification" par J.-P. Gattuso et L. Hansson) publié en septembre 2011, synthétise déjà les principaux résultats scientifiques au niveau national et international.

Un programme d'échantillonnage en Norvège, coordonné par l'Institut Leibniz des sciences marines en Allemagne (IFM-GEOMAR) en 2010, a utilisé des dispositifs expérimentaux pour les

¹¹⁶ Financé par la région Bretagne.

¹¹⁷ <http://www.epoca-project.eu/>

observations en mésocosme à large échelle afin de simuler les conditions de pH océanique futures, dans des conditions quasi-naturelles. Par ailleurs, l'étude de sites à fortes concentrations de CO₂ naturelles permet aussi d'observer et de mieux comprendre l'acidification des océans à plus petite échelle et sur des périodes suffisamment longues. Les premiers résultats indiquent que les impacts seront plus variés que prévus, de nombreuses espèces n'étant plus viables tandis que d'autres réussissent à s'adapter et à proliférer.

Le Projet FERRYBOX¹¹⁸ porté par l'équipe chimie marine de l'UMR Adaptation et Diversité en Milieu Marin (CNRS / UPMC), dans le cadre du projet européen Marinexus de 2010 à 2014, permet un suivi temporel haute fréquence des paramètres biogéochimiques en Manche occidentale, grâce à des capteurs placés sur le navire Armorique de la Brittany Ferries. Depuis janvier 2011, ces capteurs ont aussi été placés à bord du Pont-Aven qui relie plusieurs ports de la Manche à celui de Santander, en Espagne et permet d'étudier le Golfe de Gascogne. Les données recueillies au sein de ce projet servent à alimenter Previmer¹¹⁹, le système de prévision de l'environnement côtier et Coriolis¹²⁰, un système de suivi des océans, tous les deux coordonnés par Ifremer.

Le projet UK Ocean Acidification Research Programme¹²¹ porté par le Plymouth Marine Laboratory de 2010 à 2015 se propose d'étudier les flux CO₂ air-mer au niveau des eaux anglaises, l'impact de l'acidification sur les principaux écosystèmes et les tendances futures de ce phénomène.

6.1.5. Les niveaux marins extrêmes

➤ Les observations

L'étude des niveaux marins extrêmes est importante pour évaluer les risques côtiers susceptibles d'être aggravés par le changement climatique. Des travaux récents ont montré qu'à l'échelle planétaire, si les vents et les vagues n'augmentent pas d'intensité moyenne, les événements de vents forts, les cyclones et les vagues très hautes, sont par contre plus fréquents (Saunders and Lea, 2008 ; Young *et al.*, 2011), notamment sur les zones côtières (Sunderman *et al.*, 2001).

Les surcotes correspondent à des élévations exceptionnelles du niveau de la mer qui durent quelques heures et s'expliquent à la fois par une baisse de la pression atmosphérique et des vents forts soufflant vers la terre. Les faibles pressions provoquent une surcote. À l'inverse, les hautes pressions provoquent une décote (Clus-Auby *et al.*, 2004 ; CGDD, 2011). L'étude des surcotes est donc importante puisqu'elles peuvent provoquer des fortes variations du niveau marin et entraîner des événements extrêmes provoquant des submersions marines sur le littoral.

Costa (1998) observe une augmentation de la fréquence et de la hauteur des fortes marées à Dieppe entre 1953 et 1995 (Fig. 84). **Cette observation a aussi été faite par Bouligand et Pirazzoli (1998) à Brest, où la fréquence des surcotes extrêmes a augmenté durant la seconde moitié du 20^{ème} siècle (1860-1995), à l'inverse des décotes extrêmes** (Pouvreau, 2008). Cependant ces modifications peuvent aussi avoir été causées par l'action de l'homme sur le littoral (infrastructures, dragages, etc.), qui modifie sa morphologie et donc la dynamique des vagues.

¹¹⁸ Programme Marinexus Interreg IVA France (Manche) - Angleterre financé par l'Europe

¹¹⁹ <http://www.previmer.org/>

¹²⁰ <http://www.coriolis.eu.org/>

¹²¹ <http://www.oceanacidification.org.uk/default.aspx>

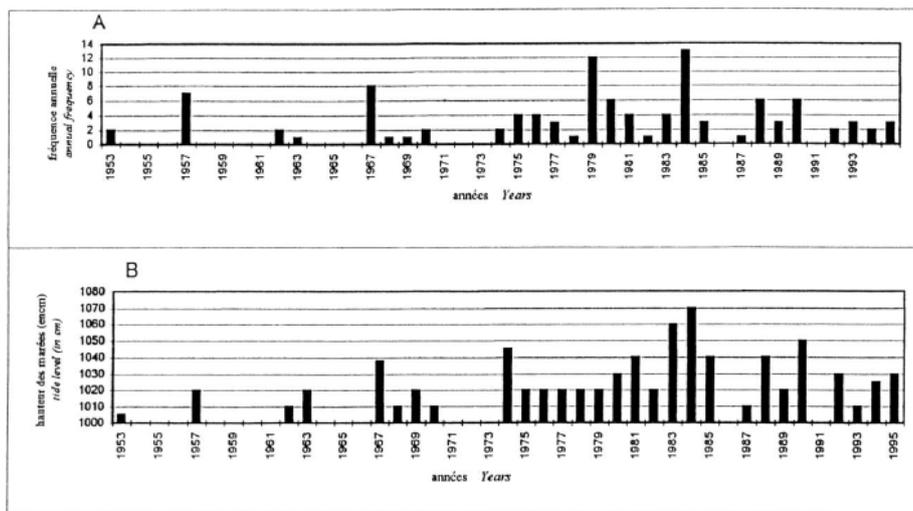


Figure 84 : Evolution de la fréquence (A) et de la hauteur (B) des marées dépassant la cote des 10 m à Dieppe entre 1953 et 1995 (source : Costa, 1995 cité dans Costa, 1998).

Le projet DISCOBOLE¹²² (Données pour le dimensionnement des Structures Côtières et des Ouvrages de Bord de mer à Longue Echéance) a été mené par EDF R&D associé au CETMEF, à l'UBO et au Laboratoire de Géographie Physique (CNRS) de 2004 à 2008. Son objectif était d'estimer l'évolution à long terme (50 ans) de certaines conséquences du changement climatique sur le climat maritime et côtier, afin d'améliorer le dimensionnement et la gestion à long terme des ouvrages d'eau (digues, brise-lames, etc.). Ce projet a permis de constituer une base de données de 1979 à 2003 sur l'ensemble du littoral français. Les résultats obtenus pour ces 25 années ne montrent pas d'évolution des houles extrêmes, ni des surcotes. Cependant la durée d'observation de 25 ans n'est pas suffisante pour dégager des tendances liées au changement climatique (CGDD, 2011).

Concernant les hauteurs de vagues, l'étude de Charles *et al.* (2010), centrée sur les côtes du golfe de Gascogne pour la période 1958-2001, a montré qu'il n'y avait pas de tendance significative sur cette période pour les valeurs moyennes et extrêmes (Fig. 85). **Mais de 1970 à 2001, il a été observé une augmentation des hauteurs de vagues extrêmes le long de la côte atlantique en été.** Cependant, le manque de données des hauteurs d'eau à une échelle spatiale fine et sur une échelle de temps longue ne permettent pas une réelle analyse des tendances à long terme.

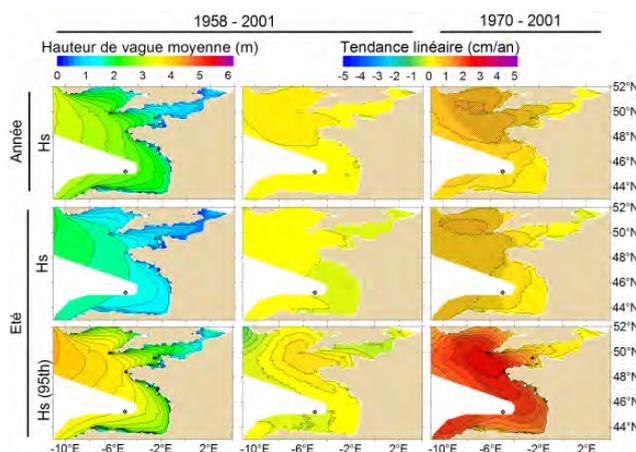


Figure 85 : Cartes des moyennes des hauteurs de vagues de 1958 à 2001 (1^{ère} colonne) et des tendances de 1958 à 2001 (2^{ème} colonne) et de 1970 à 2001 (3^{ème} colonne) pour l'année complète (hauteurs des vagues moyennes) et pour l'été (hauteurs des vagues moyennes et hauteurs des vagues supérieures au 95^{ème} percentile) (Charles *et al.*, 2010).

¹²² <http://discobole.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/?q=node/26>

➤ Les projections

Les études de projection de l'évolution des niveaux extrêmes marins peuvent être utiles, par exemple, concernant les niveaux extrêmement hauts pour les projets de ports et de défenses littorales, ou pour la navigation et l'alimentation en eau des zones urbaines et industrielles concernant les niveaux extrêmement bas, plus rarement étudiés.

Il est projeté que le changement climatique aura un impact sur le régime des tempêtes et sur l'élévation du niveau marin. Une modification de la profondeur des eaux côtières, due à l'élévation du niveau marin, peut modifier la propagation des houles et des surcotes au niveau des côtes (CGDD, 2011). Ainsi, dans le cadre du changement climatique, il se pourrait que les surcotes se produisent plus souvent avec un temps de retour plus court (Clus-Auby *et al.*, 2004).

Dans le cadre du projet DISCOBOLE, Morellato *et al.* (2010) ont réalisé des simulations prospectives d hauteurs de mer pour la façade atlantique, Manche et mer du Nord selon les scénarios B1, A1B et A2, pour la période 2000-2100 (Fig. 86). Une base de données a ainsi été construite permettant d'améliorer les connaissances actuelles. Cette base de donnée nommé ANEMOC¹²³ (Atlas Numérique d'Etats de Mer Océaniques et Côtiers) couvre une période de temps allant de 1979 à 2002 et propose des résultats à titre indicatif qui doivent être complétés par des campagnes de mesures. Les principaux résultats issus de ces simulations numériques sont :

- une légère diminution de la valeur moyenne annuelle des hauteurs de vagues sur la façade atlantique (golfe de Gascogne), et une légère augmentation sur la mer du Nord ;
- une augmentation des valeurs extrêmes annuelles des hauteurs de vague, augmentant de 1 % le long de la côte atlantique et de 5 à 8 % le long des côtes de la Manche et de la mer du Nord ;
- une saisonnalité plus marquée, avec une légère augmentation des valeurs moyennes et extrêmes pour la saison hivernale (+10 %) et une diminution pour la saison estivale (-25 %) ;
- pas d'évolution significative de la direction de propagation moyenne des vagues.

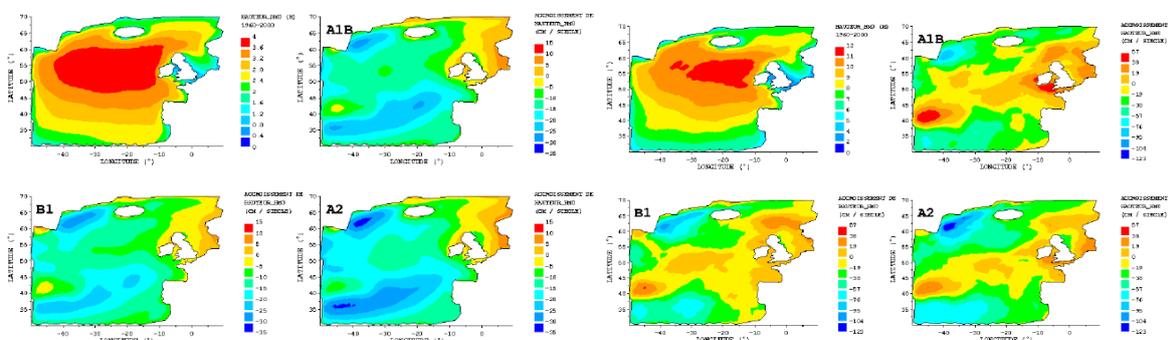


Figure 86 : Gauche : Évolution de la moyenne de hauteur (Hmo) par rapport à la période 1960-2000. Droite : Évolution du quantile 99 de la Hmo par rapport à la période 1960-2000 (Morellato *et al.*, 2010).

6.1.6. L'impact potentiel des extrêmes climatiques sur l'apport d'eaux douces au niveau des côtes

Le gradient de salinité, l'un des principaux facteurs caractérisant un estuaire, varie naturellement selon les marées et l'apport d'eaux douces. Le changement climatique au niveau des zones côtières pourrait potentiellement affecter les paramètres physiques et chimiques, en particulier la salinité, en modifiant le régime des précipitations, les pluies extrêmes, le risque de crues et le ruissellement local (Nicholls *et al.*, 2007). Toutefois, il existe peu d'informations sur l'évolution de ces variables sous l'effet du changement climatique et les projections de leur impact

¹²³ <http://anemoc.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/>

sur les caractéristiques physiques et chimiques des eaux côtières restent entourées d'incertitudes. Ces projections suggèrent une augmentation des précipitations extrêmes en hiver en Europe. On peut donc supposer que lors d'événements extrêmes de fortes pluies, plus marqués en hiver, le risque de crue sera plus élevé, ainsi que le déversement d'eaux douces dans les zones côtières, pouvant entraîner une diminution de la salinité des eaux. L'inverse pourra se produire lors d'épisodes extrêmes de faibles précipitations, surtout marqués en été, entraînant des sécheresses, une diminution de l'écoulement fluvial et une augmentation de l'intrusion d'eau saline.

Des changements de débits des cours d'eau dans les environnements côtiers peuvent entraîner des changements de la salinité, mais aussi de la turbidité, de la stratification et de la disponibilité en éléments nutritifs. Si les débits des rivières diminuent, la salinité des zones humides et des estuaires côtiers devrait augmenter, alors que la quantité de sédiments apportés vers la côte devrait diminuer. Dans les régions côtières où l'écoulement fluvial diminue, la salinité aura tendance à remonter les cours d'eau et à altérer les écosystèmes ainsi que la disponibilité en eau douce pour l'homme (Nicholls *et al.*, 2007). Mais actuellement, il n'y a pas de données observées sur ce type de changement.

Ces effets auront de forts impacts sur la biodiversité côtière, car l'hydrologie et la salinité exercent une grande influence sur la distribution des populations dans les zones côtières, influencées par les apports d'eau douce (Martinho *et al.*, 2009). C'est pourquoi, il est important d'améliorer les connaissances concernant l'évolution des indices climatiques moyens et extrêmes (crues, sécheresses) avec le changement climatique, afin de mieux appréhender leur impact sur les caractéristiques physiques et chimiques des milieux côtiers.

6.1.7. Conclusion sur l'évolution physique et chimique du milieu marin et côtier

L'analyse de l'évolution physique et chimique des océans à l'échelle de l'Atlantique Nord montre une modification sur le long terme de certains paramètres, qui peut être liée au changement climatique :

- un réchauffement des eaux de surface marqué depuis des décennies et une tendance au réchauffement des eaux profondes observée seulement depuis quelques années, donc peu significative ;
- un ralentissement de la circulation thermohaline globale, lié aux changements de température et de salinité ;
- une acidification des océans, plus forte aux hautes latitudes.

On peut supposer que ces changements se produisent aussi au niveau des côtes bretonnes, mais actuellement, du en partie au manque de longues séries d'observations, il n'existe pas de preuve scientifique liant la variabilité observée au changement climatique en cours. Les données marégraphiques de Brest, d'une plus longue durée permettent toutefois d'observer une élévation du niveau de la mer depuis 300 ans (environ 1,2 mm par an au cours du 20^{ème} siècle).

Les projections climatiques pour le 21^{ème} siècle concernant les principaux paramètres présentés ci-dessus montrent une accentuation des tendances observées. Les modifications touchant les océans devraient avoir des effets de rétroaction importants sur le climat.

Le projet OCEANS 2025¹²⁴ en cours de 2007 à 2012 et coordonné par le Natural Environment Research Council (NERC, UK) cherche à améliorer les connaissances sur le fonctionnement des océans actuellement et dans le futur, afin de développer des solutions durables pour la gestion des

¹²⁴ <http://www.oceans2025.org/aboutoceans2025.php>

ressources marines. Il est centré sur les estuaires et mers bordant le Royaume-Uni, le Nord et le Sud de l'Atlantique, l'océan Arctique et l'océan Austral. Les différents thèmes abordés sont : (i) le climat, la circulation océanique et le niveau de la mer ; (ii) les cycles biogéochimiques marins ; (iii) les processus côtiers ; (iv) la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes ; (v) les marges continentales et l'océan profond ; (vi) les ressources marines durables et (vii) les prochains systèmes de prévision océanique.

6.2. Les effets du changement climatique sur l'évolution des côtes : étude du risque d'érosion et de submersion en Bretagne

Le littoral est principalement affecté par les vents et tempêtes qui interagissent avec l'action de la mer et font évoluer la géomorphologie et la sédimentologie des côtes (Fig. 87). Lors de tempêtes, le niveau moyen de la mer augmente (surcotes) pouvant conduire à l'invasion d'eau salée dans les terres (submersion / inondations) et à des transports sédimentaires vers le large (érosion) ou vers les terres (engraissement ou accrétion). Suivant leur nature, les côtes évoluent différemment. Ce sont essentiellement les littoraux bas formés de matériaux sédimentaires fins (plages) et les littoraux à falaises constituées de matériaux sédimentaires non consolidés qui subissent le plus l'érosion. À l'inverse, les côtes vaseuses (baies, estuaires et marais littoraux) constituent généralement des zones d'accrétion (Ifen, 2006).

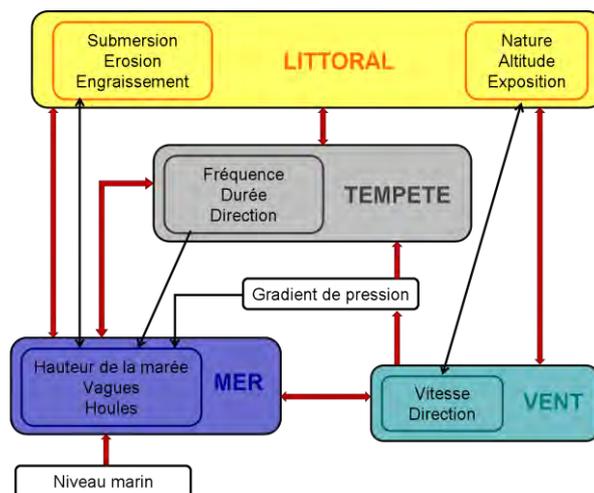


Figure 87 : Inter-relations principales entre les paramètres météo-océaniques et leur impact sur le littoral (figure adaptée de Lemasson, 1999)

L'érosion et la submersion du littoral, sous l'effet de facteurs naturels, sont accélérées par les contraintes que l'homme va faire subir au littoral (aménagement des fleuves, extraction de granulats, drainage des marais, urbanisation, implantation d'infrastructures, activités socio-économiques, etc.). On peut supposer que le changement climatique s'ajoutera à cette dynamique, de par ses effets sur le niveau de la mer et les événements extrêmes, qui influencent la morphologie du littoral. **Cependant, on ne connaît actuellement ni la vitesse, ni l'amplitude des effets du changement climatique sur ces risques côtiers** (Philippe *et al.*, 2011).

La Bretagne n'est pas épargnée par ces phénomènes : le GIP Bretagne Environnement¹²⁵ recense les dommages liés au recul du trait de côte, à l'artificialisation des côtes, à l'érosion, à l'accrétion et la submersion. En Bretagne, l'érosion est un phénomène bien étudié de par son impact sur l'évolution du trait de côte. Celui-ci est également affecté par l'accrétion qui peut entraîner des comblements de baies, envasements des ports, engraisements dunaires, ensablements, etc. Il est actuellement difficile de savoir si l'accentuation des phénomènes d'érosion et de submersion en Bretagne est due au changement climatique global ou aux activités humaines locales.

6.2.1. Les connaissances actuelles sur les risques d'érosion et de submersion

L'aléa d'érosion tient avant tout à une cause naturelle qui est un déficit en sédiments, lequel est particulièrement marqué en Bretagne où il n'y a pas ou peu de sources de renouvellement (Philippe *et al.*, 2011). Selon le GIP Bretagne Environnement et d'après les données issues du projet européen EUROSION, **l'érosion touche plus de 23.1 % du linéaire côtier breton et en 15 ans, ce phénomène s'est accru de 40 %**. Les secteurs les plus concernés par l'érosion sont les Côtes d'Armor (37 % des côtes en érosion) et le Finistère (32 % des côtes en érosion) (Ifen, 2006). **Dans le cadre du projet ADAPTALITT pour le site de la dune du Vougot (29), il a été observé un recul du trait de côte de 0,56 m/an en moyenne entre 1914 et 1987, qui s'est accéléré en 2000 (1.5 m/an)**. A l'inverse, les zones plus abritées, comme la baie du Mont Saint-Michel et le fond du golfe du Morbihan, s'engraissent grâce à leurs eaux plus calmes qui vont piéger les sédiments (Philippe *et al.*, 2011). **Il existe donc une forte variabilité spatiale de l'érosion des littoraux bretons principalement due à une exposition différente aux phénomènes extrêmes (tempêtes, surcotes) liée à leur nature et à leur orientation** (Bretagne Environnement).

La submersion marine est une inondation de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques et marégraphiques désavantageuses (tempêtes, hausse du niveau marin, forte houle, etc.). Elle touche surtout les zones basses mais peut envahir l'intérieur des terres sur plusieurs kilomètres, atteignant plusieurs mètres de hauteur. Ces inondations peuvent être temporaires lors des phénomènes de surcote (élévation du niveau marin supérieure à l'état normal), ou à long terme avec l'élévation du niveau de la mer qui recouvre petit à petit les côtes basses (Regnauld et Dubreuil, 1998 ; Philippe *et al.*, 2011).

6.2.2. Les projections d'évolution de ces risques sous l'effet du changement climatique (étude du Conservatoire du Littoral)

Même si les effets du changement climatique sur les événements extrêmes ne sont pas clairement établis, il est projeté que le changement climatique entraînera une hausse du niveau moyen de la mer et des événements extrêmes de surcote (GIEC, 2007 ; Pouvreau, 2008 ; Morellato *et al.*, 2010). Cette hausse, en exacerbant l'impact actuel des tempêtes sur le littoral, aura pour conséquences (Lemasson, 1999 ; Pirazzoli *et al.*, 2004 ; Clus-Auby *et al.*, 2004) :

- une accélération de l'érosion des plages et des falaises ;
- une extension des submersions temporaires ou permanentes sur les côtes basses ;
- une accentuation de la salinisation des eaux souterraines littorales ;
- la dégradation des habitats côtiers.

¹²⁵ <http://www.bretagne-environnement.org/Mer-et-littoral/Les-menaces/L-erosion-du-trait-de-cote/Erosion-cotiere-c-est-la-nature-qui-commande>

Deux approches, pouvant être combinées, sont souvent utilisées pour étudier l'évolution future des zones côtières (Regnauld *et al.*, 2004 ; Clus-Auby *et al.*, 2004):

- une approche par modélisation qui consiste à simuler les différents processus en jeu dans l'évolution du trait de côte. Cependant, les interactions entre les différents paramètres utilisés sont nombreuses et complexes, ce qui diminue la fiabilité de cette démarche ;
- une approche historique qui consiste à retracer le comportement d'un rivage dans le passé pour en prévoir, par extrapolation, l'évolution dans le futur.

Cette dernière approche est souvent préférée à la modélisation, car considérée comme plus fiable. C'est aussi celle qui a été utilisée dans une étude de Clus-Auby *et al.* (2004), qui ont réalisé des scénarios probables d'érosion et de submersion à l'horizon 2100, par région (dont la Bretagne) pour les sites appartenant au patrimoine du Conservatoire du Littoral¹²⁶. Les données utilisées sont issues de documents historiques pour l'étude de l'érosion et des analyses hypsométriques pour celle de la submersion. Ils ont considéré une élévation du niveau de la mer de 44 cm d'ici à la fin du 21^{ème} siècle afin de réaliser un document cartographique faisant apparaître la position supposée de la ligne de rivage en 2050 et en 2100. Ces données, plus importantes pour les phénomènes d'érosion ou d'accumulation que pour les phénomènes de submersion, sont plutôt rares concernant la Bretagne.

➤ Les projections concernant l'érosion en 2100

En Bretagne, les projections d'érosion montrent une perte de 77 ha (1,7 %) de la surface du patrimoine breton actuel du Conservatoire du Littoral et une perte de 126 ha (0,7 %) de la surface de son patrimoine futur pour 2100 (Tab. 5 ; Fig. 88). En intégrant le patrimoine futur du Conservatoire du Littoral, on observe une diminution du degré d'exposition à l'érosion, laquelle est sans doute liée à l'acquisition de nouveaux espaces endigués, non concernés par le phénomène d'érosion.

Tableau 5 : Bilan de l'exposition à l'érosion en Bretagne (Clus-Auby *et al.*, 2004).

FACADE	Sites Acquis		Patrimoine Futur	
	Surface érodable en 2100 (ha)	Surface érodable / Surface renseignée	Surface érodable en 2100 (ha)	Surface érodable / Surface renseignée
Ile-et-Vilaine	0	0 %	0	0 %
Côtes-d'Armor	0	0 %	1,2	0 %
Finistère	64,3	2,5 %	112	1,6 %
Morbihan	12,8	1,4 %	12,8	0,2 %
BRETAGNE	77,1	1,7 %	126	0,7%

¹²⁶ www.conservatoire-du-littoral.fr/

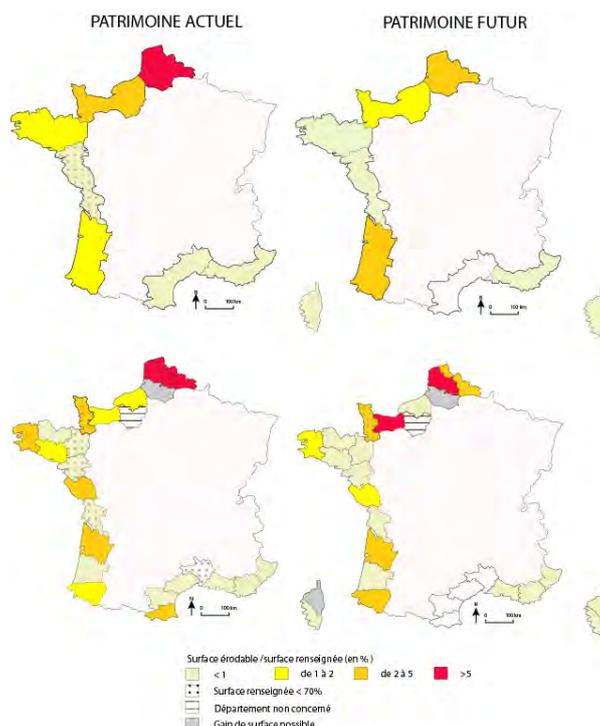


Figure 88 : Evolution de l'exposition à l'érosion par façade et par département en Bretagne (Clus-Auby *et al.*, 2004) ;

Les zones où l'érosion sera la plus importante au 21^{ème} siècle se situent dans le Finistère, avec principalement les sites de Kerouiny et de la baie d'Audierne.

Concernant l'Ille-et-Vilaine, les résultats ne sont pas significatifs. De plus, le site de la Baie du Mont-Saint-Michel, plus concerné par le phénomène d'accrétion que par l'érosion, occupe l'essentiel de la surface du patrimoine futur du Conservatoire du Littoral et tend à diminuer le taux du risque d'érosion pour ce département.

Les Côtes d'Armor demeurent peu concernés par le phénomène d'érosion.

Le Golfe du Morbihan, dont le fond devrait plutôt s'envaser, est peu concerné par l'érosion, sauf pour le site des dunes du Mat Fernoux ainsi que les îles et les falaises de bord de mer, qui s'effondreraient sous l'effet de plus fortes précipitations.

➤ Les projections concernant la submersion en 2100

L'étude du phénomène de submersion a pris en compte l'état parfois très dégradé des ouvrages de défense contre la mer, qui peuvent être mal entretenus. Par ailleurs, ont aussi été étudiés séparément les sites endigués et les sites non endigués.

Les sites non endigués présentent un risque de submersion de part leur faible altitude ou la rupture du cordon dunaire qui les isole de la mer. En Bretagne, ce risque est inférieur à la moyenne nationale. **Concernant le patrimoine futur du Conservatoire du Littoral, les résultats conduisent à une diminution du degré d'exposition à la submersion, 256 ha pourraient être assez fréquemment submergés, soit 1,6 % de la surface renseignée** (Tab. 6).

Les plus importantes zones submersibles en 2100 se trouvent dans le Finistère (98 ha submergés) et plus particulièrement en baie d'Audierne.

Les départements de l'Ille-et-Vilaine et des Côtes d'Armor ne sont en général pas ou peu concernés par le phénomène de submersion.

Les résultats concernant le Morbihan ne sont pas significatifs.

Les sites endigués seraient entièrement submergés si les digues qui les protègent se rompent ou sont dépassées par la marée. En Bretagne, les sites de la Baie du Mont-Saint-Michel et de la

Briantais (35) ne devraient pas être très exposés à de fréquentes submersions. D'autres polders paraissent plus sensibles, tels que Keremma, le Marais de Curnic ou de Moustierlin (29), mais la surface endiguée n'a pas toujours pu être mesurée, ne permettant pas de quantifier le risque de submersion de ces sites.

Tableau 6: Bilan de l'exposition à la submersion de l'ensemble des sites en Bretagne (Clus-Auby *et al.*, 2004).

FACADE	Sites Acquis		Patrimoine Futur	
	Surface submersible (en ha)	Surface submersible / Surface renseignée	Surface submersible (en ha)	Surface submersible / Surface renseignée
Ile-et-Vilaine	non concerné		838	74,6 %
Côtes-d'Armor	67,5	6,4 %	159	3,7 %
Finistère	98,5	4 %	312,5	4,1 %
Morbihan	info insuffisante		info insuffisante	
BRETAGNE	165,98	3,8 %	1 309,5	8,2 %

➤ Les biais liés à ces projections

Les projections réalisées dans l'étude Clus-Auby *et al.* (2004) sur le risque d'érosion et de submersion en 2100, présentent de nombreux biais à considérer lors de l'analyse :

- la méthode historique n'intègre pas l'accélération de l'élévation du niveau marin attendue au cours du 21^{ème} siècle, ni les effets probables de tempêtes plus fréquentes et plus fortes ;
- les données historiques sont fragmentaires et parfois imprécises ;
- les données obtenues par l'interprétation des photographies aériennes présentent une marge d'erreur de ± 8 m dans la position du trait de côte ;
- les modèles ont du mal à fournir des informations sur les impacts à l'échelle régionale ;
- l'étude générale sur l'évolution du trait de côte ne prend pas en compte d'autres facteurs tels que les courants littoraux, le stock sédimentaire disponible et les actions anthropiques ;
- l'étude de l'évolution des falaises ne prend pas en compte l'action des eaux d'infiltration et du gel, qui jouent un rôle important, conjointement avec l'attaque des vagues ;
- l'étude de submersion ne prend pas en compte les conséquences inévitables des submersions telles que l'élévation du toit des nappes phréatiques et l'augmentation de leur salinité, ou l'accroissement des difficultés de drainage de ces terres basses ;
- l'incertitude sur la vitesse et l'amplitude du changement climatique et donc sur les échelles de temps à prendre en compte pour l'analyse des impacts.

➤ Résumé sur les projections des risques d'érosion et de submersion en Bretagne

En Bretagne, on observe des phénomènes d'érosion, de submersion et d'accrétion, mais ces événements sont actuellement difficiles à mettre en relation avec le changement climatique.

Cependant, la hausse du niveau de la mer et l'accentuation des phénomènes extrêmes prédits par les modèles, tendent à accentuer ces risques côtiers. **Les projections réalisées par Clus-Auby *et al.* (2004) sur la Bretagne montrent une augmentation de ces risques, différant selon la morphologie du littoral.** La lecture de ces résultats est toutefois empreinte de nombreuses incertitudes.

Les observations et les projections montrent ainsi une disparité régionale, l'érosion et la submersion étant plus importantes dans le Finistère que dans les Côtes d'Armor, surtout liée au type de littoral affecté (îles, site endigué ou non, présence de falaise, de dunes sableuses, etc.). Par exemple, l'île de Sein, d'une hauteur moyenne de 1.50 m risque de se retrouver sous le niveau de la mer, s'il continue à augmenter tel qu'il est prédit d'ici plusieurs siècles (J. Jouzel, janvier 2012, article

paru dans la revue *Bretons*). Il est ainsi nécessaire d'identifier les zones à risque le long des côtes en améliorant les connaissances sur la géologie et la géomorphologie côtière, l'impact actuel des risques côtiers et leur évolution.

Pour aider à visualiser la vulnérabilité des côtes en termes de relief (côte basse/côte haute), le site <http://flood.firetree.net/> créé en 2006 par un informaticien, permet de visualiser pour différents niveaux de montée de la mer, les côtes qui seraient submergées en premier. Toutefois il ne faut pas oublier le caractère approximatif de ce site qui utilise les données de la NASA à une échelle mondiale (± 60 degrés de latitude) avec une marge d'erreur de ± 16 m dans les données de hauteur, et qui n'intègre pas de nombreux paramètres (marées, érosion côtière, défenses côtières, etc.). **A l'échelle de la Bretagne, un outil plus précis est aujourd'hui développé par le SHOM : le LITTO-3D.**

6.2.3. La visualisation de l'évolution du trait de côte : exemple de l'outil LITTO-3D

Le SHOM¹²⁷ et l'Institut Géographique National¹²⁸ (IGN), ont associé leurs moyens et leur savoir-faire afin de fournir aux acteurs locaux des outils de visualisation des effets du changement climatique en termes d'érosion, de montée du niveau de la mer et de modification du trait de côte. C'est ainsi qu'a été créé le projet LITTO-3D¹²⁹ comprenant un modèle de simulation de variation du niveau de la mer, indépendamment de tout autre phénomène physique, qui permet d'identifier les espaces terrestres qui pourraient disparaître ou se modifier. Cet outil a été utilisé dans le cadre du projet IMCORE où 4 scénarios d'élévation du niveau de la mer sur le golfe du Morbihan ont été simulés (Figs. 89 et 90). Ces scénarios ont été élaborés en fonction de scénarios du GIEC (scénario B1 = + 18 cm et scénario A1FI = +59 cm) et du rapport de préparation au sommet de Copenhague (+ 1 m et + 2 m).

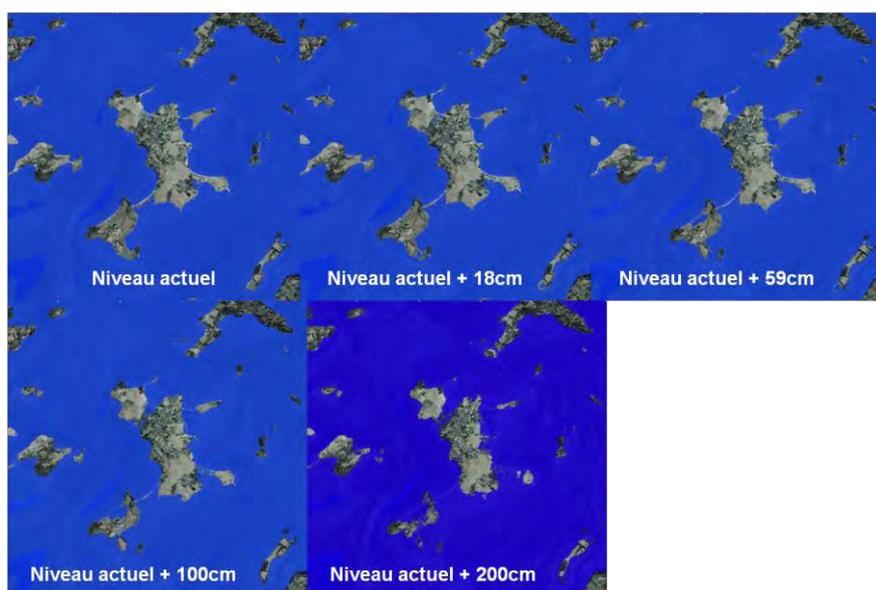


Figure 89 : Simulations d'élévation du niveau de la mer dans la petite mer du golfe du Morbihan à marée haute avec un coefficient de 115 (sources : données SHOM, dans Pasco *et al.*, 2011).

¹²⁷ <http://www.shom.fr/>

¹²⁸ <http://www.ign.fr/>

¹²⁹ http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_Litto3D/index_litto3D.htm

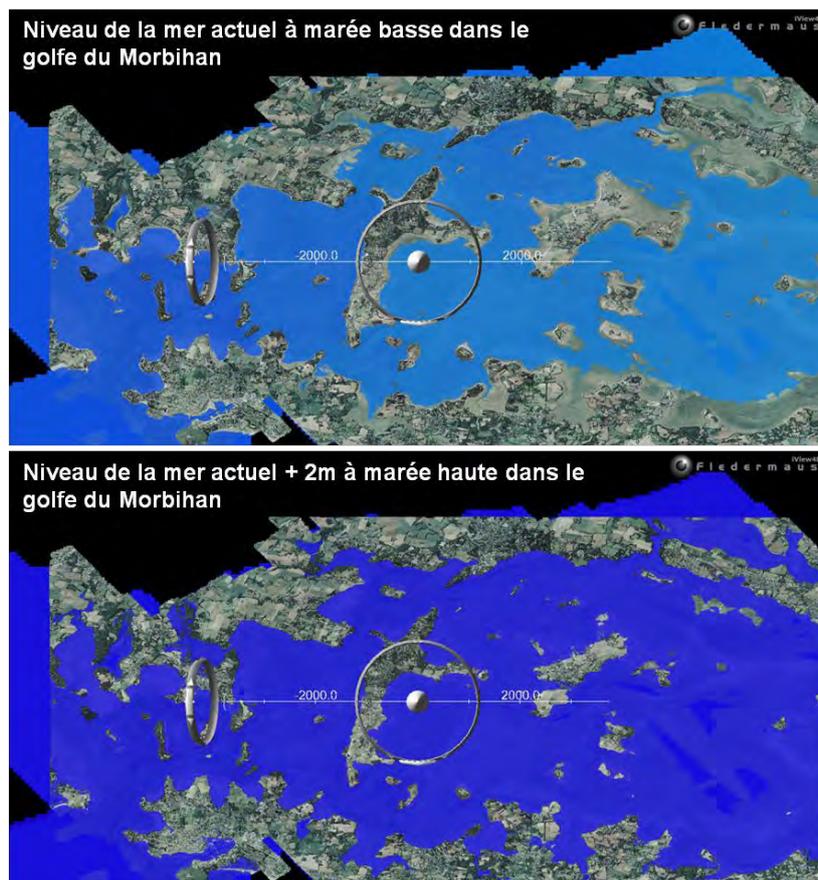


Figure 90 : Simulations d'élévation du niveau de la mer dans le golfe du Morbihan à marée basse et haute avec un coefficient de 115 (source : données SHOM, dans Pasco *et al.*, 2011).

Ces simulations restent hypothétiques puisqu'elles représentent une évolution instantanée de l'élévation du niveau de la mer et non pas une évolution progressive sur une durée de 100 ans : elles ne prennent donc pas en compte les rétroactions du climat, les phénomènes d'érosion ou les futures adaptations de l'homme (infrastructures de défense). Par ailleurs, l'outil LITTO-3D n'en est qu'à ses débuts, puisqu'actuellement, seul le golfe du Morbihan dispose d'une simulation et des travaux sont aussi en cours pour la mer d'Iroise. De nouveaux projets utilisant LITTO-3D permettraient d'obtenir des simulations pour d'autres zones de la région Bretagne, afin de pouvoir visualiser les zones plus sensibles à la montée des eaux (V. Donato, com. pers.)

6.2.4. Conclusion sur les risques d'érosion et de submersion

Les aléas d'érosion et de submersion, déjà observés en Bretagne risquent de s'aggraver avec le changement climatique et la montée des eaux. Cependant, aucune relation n'est émise entre l'intensité et la fréquence de ces risques côtiers et le changement climatique. Il est donc crucial que ces changements éventuels dans la zone côtière continuent d'être étudiés avec des scénarios de modélisation du climat, afin de pouvoir les relier fermement au climat futur. Par ailleurs, l'une des difficultés réside dans le choix de l'adaptation, qui pourra alors entraîner de nouveaux impacts qu'il serait nécessaire de pouvoir anticiper.

6.2.5. Les études d'identification des zones à risque face aux aléas d'érosion et de submersion

Nous avons vu qu'il y a peu de données actuellement sur les risques d'érosion et de submersion en lien direct avec le changement climatique. Par contre, ces aléas font l'objet de nombreux programmes d'études et de recherche car, avec ou sans changement climatique, l'évolution du trait de côte est une préoccupation importante des gestionnaires, aménageurs et collectivités. Il nous a paru important de recenser ici les connaissances en cours d'acquisition sur le sujet.

➤ En Bretagne

Le projet de recherche régional EROCOVUL (EROsion COtière et VULnérabilité du trait de côte en Bretagne), financé par le Conseil Régional de Bretagne de 2001 à 2003 et coordonnée par le laboratoire Géomer (UMR LETG), était centré sur l'érosion des littoraux meubles et la vulnérabilité du trait de côte en Bretagne. Il avait pour objectif de dresser un bilan des évolutions morpho-sédimentaires des rivages régionaux sous l'effet des agents naturels et des pressions anthropiques. Actuellement, Géomer poursuit le travail de collecte des informations et de mise à jour des bases de données

Le projet GICC ADAPTALITT (Capacités d'adaptation des sociétés littorales aux phénomènes d'érosion – submersion des côtes en prise avec les changements climatiques) en cours de 2009 à 2011 et coordonné par le CNRS, vise à analyser les relations des habitants à leurs milieux sous l'angle de la vulnérabilité et des modalités d'actions (voire d'adaptation) dans un contexte de changements climatiques. Le laboratoire Géomer est chargé de dresser un bilan de la situation actuelle et évolutive de la côte pour chaque site étudié afin de cerner les zones potentiellement érodables–inondables. Deux communes ont été choisies pour l'étude, Guissény (29) et Gâvres (56). Dans ce cadre, l'étude de Suanez *et al.*, en 2008, financée par la Région Bretagne, visait à évaluer le risque de submersion dans un contexte d'érosion de cordon dunaire (plage du Vougot dans la commune de Guissény, 29). Une cartographie des zones inondable a ainsi été produite par simulation en croisant les niveaux marins extrêmes et l'altimétrie du secteur étudié.

Dans le cadre du projet européen ANCORIM (*Atlantic Network for COastal Risks Management*), la communauté d'agglomération Cap L'orient cherche à développer une méthodologie pour définir les scénarios d'aménagements et les impacts de ceux-ci sur le site de Gâvres (56). Pour cela, un programme de surveillance de l'érosion côtière est en œuvre depuis 2002 et les travaux issus d'ADAPTALITT devraient être utilisés. Les résultats devraient permettre d'acquérir des connaissances sur l'érosion et l'évolution du trait de côte de la Laïta à Etel, ainsi que sur la propagation de la houle et du transit littoral.

Pour faire suite à ces études, la DDE du Morbihan a choisi Gâvres (où la totalité du trait de côte est artificiellement fixée) comme site témoin pour entamer un Schéma départemental de prévention des risques littoraux¹³⁰ (2009). Ce schéma a permis de faire le point sur les études conduites sur cette zone, les enjeux face aux risques côtiers et les mesures de défense existantes :

- l'étude Ptolémée (2001) avait pour but était d'améliorer les connaissances en terme de comportement et d'évolution du littoral morbihannais . Elle donne des pistes pour orienter les investigations futures, mais certains résultats sont à considérer avec réserve ;

- l'étude Cetmef (2003) a permis un inventaire des zones où il existe un risque fort de submersion marine et où il pourrait être utilise de mettre en place un plan de gestion de la frange littorale ;

¹³⁰ http://www.morbihan.pref.gouv.fr/sections/les_missions_de_l_et/assurer_la_securite/securite_civile/les_risques_naturels/les_risques_littorau/le_schema_de_prevent/view

- l'étude DHI-Géos (2007-2008) a caractérisé l'aléa de submersion marine sur le site de la Grande Plage de Gâvres, préalablement à la mise en place du Plan de Prévention du Risque de submersion marine.

Le laboratoire Géosciences Marines et Géomorphologie du Littoral¹³¹ (GMGL) de l'Université de Bretagne Sud étudie l'évolution de la géomorphologie du littoral, en particulier en Bretagne Sud. Dans ce cadre, plusieurs études ont été menées à l'échelle du Morbihan :

- étude quantitative des variations du trait de côte dans le Golfe du Morbihan entre 1952 et 2000 à partir des photos aériennes : évaluation des phénomènes d'érosion et observation des dynamiques géomorphologiques (2005-2006) ;

- thèse sur la cartographie et la modélisation prédictive du comblement de l'estuaire de la Vilaine (C. Traini, 2009) ;

- thèse sur la cartographie et la modélisation prédictive du littoral morbihannais : évaluation des phénomènes d'érosion et observation des dynamiques géomorphologiques (S. Pian, 2010) ;

- post-doctorat sur la morphodynamique et la submersion de l'île d'Arz (S. Pian, 2010-2011).

Le projet IMCORE¹³², (*Innovative Management for Europe's changing Coastal Resource*), porté côté français par l'UMR-Amure et le Syndicat Intercommunal d'Aménagement du Golfe du Morbihan (SIAGM), entre 2008 et 2011, a pour but d'élaborer une stratégie adaptative permettant aux territoires de faire face au changement climatique. Dans ce cadre, un atlas des risques littoraux du département du Morbihan¹³³ est en cours de réalisation par le BRGM. Une base de données d'expériences (TAGAZAN¹³⁴) a aussi été créée. Elle est constituée d'initiatives en matière de gestion des risques liés au changement climatique dans la zone côtière et répertorie au total 47 cas fournis par les partenaires du projet.

Une autre étude sur les risques littoraux liés à l'érosion côtière a été engagée par le Service Prospective, Planification et Contrôles de la DDE des Côtes d'Armor pour l'ensemble du linéaire côtier du département. Cette étude a permis d'identifier les lieux sensibles à l'érosion dans les Côtes d'Armor, à partir de la cartographie des données morpho-sédimentaires, des facteurs dynamiques et des tendances évolutives du littoral (Bonnot-Courtois, 2010, Colloque d'Orléans).

Enfin, le projet COCORISCO¹³⁵ (COnaissance, COmpréhension et gestion des RISques COtiers) en cours de 2011 à 2013 et porté par le laboratoire Géomer (UMR LETG), se propose d'étudier la vulnérabilité des territoires côtiers bretons face aux risques d'érosion et de submersion afin d'élaborer des stratégies de prévention et de gestion. Il s'agit, en outre, d'accroître les connaissances et la compréhension, à une échelle régionale, des risques induits sur les territoires littoraux par les changements environnementaux en cours. Dans ce cadre, la thèse de C. André se propose d'analyser les dommages liés aux vagues et aux submersions de la tempête Johanna (mars 2008) sur les rivages de la Bretagne.

➤ A l'échelle française

Les travaux réalisés à l'échelle nationale ou dans d'autres régions françaises peuvent être intéressantes, soit car elles intègrent le littoral breton, soit par la méthodologie utilisée. La Base nationale d'Observation et de Suivi des CÔtes¹³⁶ (BOSCO) référence les informations sur l'évolution

¹³¹ http://www.univ-ubs.fr/77372039/0/fiche_pagelibre/

¹³² Programme INTERREG IVB : <http://littoral-et-changement-climatique.fr/> ou <http://www.imcore.eu/>

¹³³ http://coastnet.org.uk/tagazan/fr/index.php?mode=visualisation&num_text=1

¹³⁴ <http://coastnet.org.uk/tagazan/fr/index.php>

¹³⁵ Programme ANR Changements Environnementaux Planétaires et Sociétés

¹³⁶ <http://www.bosco.tm.fr/>

du trait de côte et la lutte contre l'érosion littorale. Le CETMEF, le SHOM et le BRGM sont les organismes pilotes chargés d'engager le programme BOSCO visant, via Internet, à mettre en place un système d'informations sur la zone littorale.

Au sein de l'Institut Français de l'ENvironnement¹³⁷ (IFEN) un observatoire du littoral a été mis en place en 2004 à l'échelle nationale. Ses 3 principales missions sont le suivi du littoral, la mutualisation et l'organisation de l'information et la prospective. Pour cela, ils utilisent l'outil de cartographie GEOIDD-Litto (GEOgraphie et Indicateurs liés au Développement Durable sur le Littoral). Cet observatoire participe aussi à un projet européen INTERREG DEDUCE (DEveloppement DURable des Côtes Européennes) qui vise à mettre au point des méthodes de travail et de calcul des 27 indicateurs de suivi de la gestion intégrée des zones côtières développés sous l'égide de la Commission européenne.

Le projet VULSACO¹³⁸ (Vulnérabilité de plages sableuses face aux changements climatiques et aux pressions anthropiques) piloté par le BRGM de 2007 à 2010 a pour but d'identifier et d'estimer, sur les côtes sableuses basses, les indicateurs de la vulnérabilité physique (érosion et submersion marine) à court terme (impact d'une tempête) et à long terme (décennies). L'étude s'est portée sur 4 plages sableuses métropolitaines, à savoir les plages du lido de Sète (34), du Truc Vert (33), de La Tresson (85), et de Dewulf (59). Dans ce cadre ils ont aussi étudié l'influence du changement climatique sur la vulnérabilité des plages sableuses à échéance 2030 et le rôle aggravant ou modérateur que peut avoir le facteur d'occupation humaine du littoral sur cette vulnérabilité

Le projet ANR-VMC MISEEVA (*Marine Inundation hazard exposure modelling and Social, Economic and Environmental Vulnerability Assessment in regard to global changes*) porté par le laboratoire Géomer (UMR LETG) de 2007 à 2010, se proposait de mettre en place une approche transdisciplinaire pour évaluer la vulnérabilité de la zone côtière à l'inondation marine à l'échelle régionale et locale (Languedoc-Roussillon), dans un contexte de changements globaux, aux échéances de 2030 et 2100. Dans ce cadre, les projections climatiques sont basées sur des scénarios climatiques, des hypothèses démographiques et économiques et des perspectives de stratégies d'adaptation au changement climatique en 2100.

Le projet LITEAU-BARCASUB (vulnérabilité du Bassin d'ARCAchon à la SUBmersion marine) en cours de 2009 à 2012 et porté par l'UMR PRODIG (Pole de Recherche pour l'Organisation et la Diffusion de l'Information Géographique), se propose d'apporter une réponse adaptative à long terme au risque de submersion fondée sur la dépoldérisation.

Pour plus d'informations, on peut aussi consulter le recueil des actes du colloque à Orléans en 2010, organisé par le BRGM, dont le thème était : Impacts du changement climatique sur les risques côtiers. Dans le cadre de ce colloque plusieurs études sont présentées avec entre autres :

- les impacts potentiels de conditions météo-marines extrêmes sur une côte basse densément peuplée : le cas du littoral dunkerquois, Nord de la France ;
- Le Havre : une ville côtière soumise aux submersions marines et aux instabilités de falaises littorales. L'objectif est de mieux comprendre quel type de paramètre peut donner lieu à un aléa naturel et conduire à une situation de risque sur le territoire du Havre, les aléas étant liés à l'érosion des falaises de craie et aux submersions marines de la ville basse.

Le projet C3E2 (Conséquences du Changement Climatique sur l'Ecogéomorphologie des Estuaires) en cours de 2010 à 2012 et porté par le laboratoire DYNECO/PHYSED d'Ifremer, se propose de caractériser la réponse de l'estuaire de la Loire au changement climatique. Leur but est ainsi

¹³⁷ <http://www.littoral.ifen.fr/>

¹³⁸ Programme ANR Vulnérabilité, Milieux, Climats : <http://vulsaco.brgm.fr/>

d'évaluer l'effet du changement climatique et des contrôles anthropiques sur les évolutions de la morphologie des estuaires, de leur couverture sédimentaire et de l'organisation du biotope à échéance 2040.

Le projet INTERREG-IVA franco-britannique LICCO (*Living with a Changing COast*) en cours de 2011 à 2014 et coordonné par le Conservatoire du Littoral - délégation Normandie. Ce projet a les mêmes ambitions que le projet européen IMCORE, mais à l'échelle de la Basse-Normandie. L'objectif est d'étudier l'impact du changement global sur la biodiversité littorale, la gestion du trait de côte et son évolution, l'évolution des usages et enfin la gouvernance (jeu d'acteurs et capacités d'adaptation), dans 5 sites normands : la baie des Veys, le val de Saire, le havre de Régneville, l'estuaire de l'Orne, la vallée de la Saône.

➤ A l'échelle européenne

Le programme européen **EUROSION**¹³⁹ piloté par la Direction Générale de l'Environnement de la Commission Européenne de 2002 à 2004, a inventorié au niveau européen les types de côtes, leur degré de protection contre l'érosion et leur évolution sur la base d'interprétation de données satellitaires et sur les contributions des chercheurs locaux. Il a pour objectif d'évaluer les incidences sociales, économiques et écologiques de la dégradation du littoral en Europe. En plus de ses bilans et recommandations (ci-après), EUROSION est à l'origine depuis le début de 2002 d'une large série de produits, incluant des rapports et des bases de données, qui sont accessibles en consultant le site web d'EUROSION :

- la base de données SIG EUROSION, incluant 18 paramètres cartographiques tels que les travaux de défense côtière, la géomorphologie, les tendances d'érosion, etc. ;
- des directives pour incorporer les problèmes d'érosion côtière dans les procédures d'Evaluation de l'Environnement (EA) ;
- des directives pour cartographier les risques de l'érosion côtière ;
- des directives pour évaluer les coûts et les avantages des techniques de gestion du trait de côte ;
- des directives pour la réalisation de systèmes d'information locale consacrés à la gestion du trait de côte ;
- un guide pour la gestion du trait de côte qui résulte de l'étude d'environ 60 expériences de lutte contre l'érosion côtière en Europe. Il ne représente pas la solution de défense aux risques côtiers mais plutôt les succès et les échecs des solutions apportées à l'érosion côtière en Europe.

Le projet européen Interreg IVB **ANCORIM**¹⁴⁰ (Réseau atlantique pour une meilleure gestion et prévention des risques côtiers, en anglais : *Atlantic Network for coastal risk management*) débuté en 2009 et coordonné par le Conseil Régional d'Aquitaine, se propose de contribuer au renforcement des capacités d'action des acteurs du littoral des régions atlantiques en matière de gestion et prévention des risques côtiers, notamment en lien avec le changement climatique. Ce projet met à disposition des utilisateurs :

- les différents outils du projet, à contenu technique et méthodologique
- un inventaire des principales ressources scientifiques et techniques existantes dans l'espace atlantique susceptibles de constituer un appui à la décision pour la gestion des risques côtiers
- un annuaire des acteurs du littoral dans les différentes régions partenaires du projet
- des outils innovants conçus pour la transmission d'informations scientifiques à l'attention d'un public non scientifique

¹³⁹ <http://www.euroSION.org>

¹⁴⁰ <http://ancorim.aquitaine.fr/>

- des études de cas mises en œuvre dans différents territoires pilotes du projet, avec la mise en évidence d'éléments de transférabilité potentielle à d'autres contextes européens en matière scientifique et de gouvernance.

6.3. Les impacts du changement climatique et des événements climatiques extrêmes sur la biodiversité marine et côtière

La conjonction des modifications du niveau de la mer, des caractéristiques physico-chimiques des masses d'eau, de la circulation hydrodynamique (courants) et l'occurrence d'événements extrêmes vont avoir des conséquences importantes sur les écosystèmes marins côtiers et estuariens à différentes échelles (d'un estuaire à un bassin ou une mer). Les changements attendus se déclinent notamment en termes de biodiversité (du gène à la communauté) avec des conséquences sur le fonctionnement des populations et des peuplements, la productivité des écosystèmes et les services écosystémiques associés (voir pour revue par exemple, Hoegh Guldberg et Bruno, 2010 ; Brierley et Kingsford, 2009 ; Walther *et al.*, 2009 ; Helmuth *et al.*, 2006).

Par ailleurs, la biodiversité est soumise à de nombreuses pressions, d'origine anthropique ou naturelle, désignées par le terme de « changement global ». Ces pressions incluent notamment la pollution, l'apparition d'espèces invasives, la surexploitation et la dégradation des ressources naturelles. Les changements climatiques sont l'une des sources de pression sur les écosystèmes, sur leur biodiversité et sur les biens et services qu'ils fournissent. Étant donné la multiplicité et l'interactivité des pressions exercées sur les écosystèmes mondiaux, il est difficile de quantifier les incidences des changements climatiques. C'est pourquoi, beaucoup d'études intègrent les impacts du changement global en général, sans être forcément spécifiques au changement climatique. Toutefois il faut noter, que des changements du climat se sont déjà produits au cours de l'histoire et que les espèces ont développé une capacité à s'adapter, qui les aidera à atténuer les impacts des changements climatiques à venir. Cependant, l'ampleur et la vitesse des changements climatiques futurs ne sont pas vraiment estimées et la capacité des espèces à s'adapter est compromise par les nombreuses autres pressions.

L'environnement marin attendant au massif armoricain présente une situation originale concernant les effets des changements climatiques sur la biodiversité. La région bretonne est en effet une importante zone de transition biogéographique¹⁴¹ à l'échelle de l'Atlantique Nord. En « séparant » la façade atlantique de la Manche-mer du Nord française (Fig. 91), le massif armoricain se situe à la frontière entre les provinces boréale¹⁴² et lusitanienne¹⁴³. En d'autres termes, et pour reprendre la terminologie Européenne (notamment celle utilisée dans le cadre de la convention OSPAR et du CIEM), deux écorégions sont délimitées au niveau de la pointe bretonne, les mers Celtiques et l'Atlantique Nord Est. Dans de telles régions, de nombreuses espèces trouvent leur limite de distribution géographique. Deux points importants découlent de cette situation :

(1) Les eaux environnantes la péninsule armoricaine se caractérisent par une forte diversité biologique ; à titre d'exemple, on rencontre (Dauvin, 1999) dans la seule région de Roscoff-baie de Morlaix quasiment autant d'espèces d'amphipodes (N=202) que sur l'ensemble de la Manche

¹⁴¹ Zone de transition biogéographique : zone entre provinces biogéographiques adjacentes où il y a un changement de la composition des peuplements (et notamment des espèces dominantes) et où de nombreuses espèces trouvent leur limite de distribution géographique. Ce sont donc des zones particulièrement sensibles à des modifications environnementales qu'elles soient naturelles ou d'origine anthropique.

¹⁴² Zone comprenant les mers Celtiques, mer du Nord, mer Baltique et mer Norvégienne.

¹⁴³ Zone comprenant les eaux de la côte Ouest de la péninsule Ibérique et de la France (du détroit de Gibraltar au golfe de Gascogne).

(N=255) en comparaison du nombre trouvé en baie de Seine (N=130), golfe Normand-Breton (N=176) ou région de Plymouth (N=176) ;

(2) La Manche Ouest est une zone où se concentrent de nombreuses limites d'espèces (Cabioch *et al.*, 1977). Beaucoup d'espèces boréales et des eaux froides trouvent ici leur limite sud (ex. les forêts de certaines grandes algues brunes) alors que les espèces des eaux tempérées-chaudes y trouvent leur limite nord (ex. sardines). Les communautés biologiques des côtes bretonnes sont donc a priori particulièrement sensibles aux changements environnementaux d'origine naturelle ou anthropique.

Ces zones de transition biogéographique, telle que représentées par les eaux entourant le massif armoricain, sont ainsi des lieux privilégiés d'observation des modifications de la biodiversité en réponse à des changements environnementaux (ex. disparition des espèces qui trouvent leur limite sud de distribution en Bretagne). **La plupart des séries d'observations biologiques dans les eaux voisines du massif armoricain n'ont toutefois pas une durée suffisante pour permettre de dissocier les modifications liées à la variabilité climatique naturelle et celles dues au réchauffement climatique, à l'exception peut être des séries CPR-SAFHOS et de quelques séries d'observations réalisées sur les côtes nord de la Manche (Grande-Bretagne)** (Tréguer *et al.*, 2009).

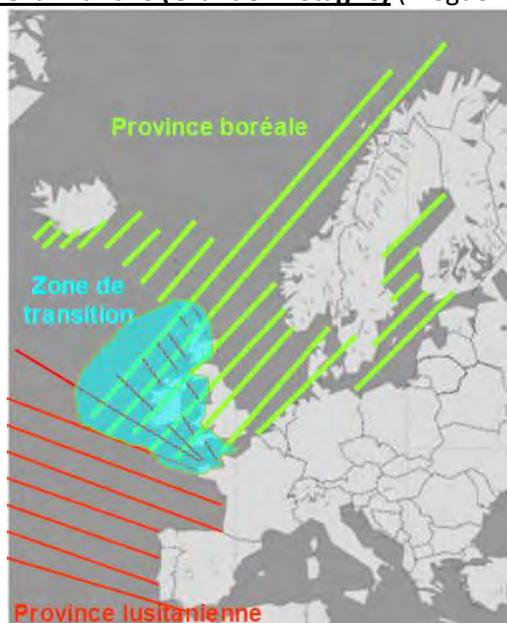


Figure 91 : Représentation dans l'Atlantique Nord Est actuel de la province boréale, de la province lusitanienne et de leur zone de transition autour de la Bretagne (Briggs, 1974).

Les principaux impacts attendus et observés du changement climatique sur la biodiversité marine et côtière sont listés ci-après. Ils sont en grande partie basés sur une étude bibliographique réalisée par Tréguer *et al.* (2009), qui s'est attachée à la recherche de faits documentés aux dépens d'approches plus interprétatives. Nous l'avons enrichie avec quelques résultats publiés dans ces deux dernières années, et complétée avec une section dédiée aux conséquences du changement climatique sur les populations de poissons et les ressources halieutiques. Nous conseillons également la lecture du rapport coordonné par N. Massu et G. Landmann, récemment publié (2011) par le GIP ECOFOR, et réalisé à la demande du Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement. Ce rapport est une synthèse bibliographique sur les connaissances actuelles concernant les impacts du changement climatique sur la biodiversité en France métropolitaine. Un chapitre de cet ouvrage, rédigé par Philippe Gros (Ifremer, Brest) est consacré aux écosystèmes marins.

6.3.1. Impacts du changement climatique

➤ Modification de la productivité primaire

La productivité primaire marine et le cycle biologique marin sont des éléments importants du système climatique. Steinacher *et al.* (2009) ont réalisé une étude multi-modèle afin de projeter l'évolution de la production primaire (PP) au 21^{ème} siècle. Pour cela, ils ont utilisé 3 modèles climatiques (Institut Pierre Simon Laplace, Institut Max-Planck pour la Météorologie, *National Center for Atmospheric Research*) selon le scénario A2 du GIEC.

Ces modèles prédisent une diminution de la PP moyenne globale entre 7 et 20 % d'ici 2100 (scénario A2 ; Fig. 92). Cette évolution moyenne globale diffère selon les régions biogéographiques (Behrenfeld *et al.*, 2006). Ainsi, c'est dans les régions peu productives tropicales que la diminution de PP est la plus forte, l'augmentation de la stratification verticale liée au réchauffement des eaux de surfaces accroît le piégeage des nutriments en profondeur, sous la thermocline, où l'absence de lumière ne permet pas la PP. De ce fait, dans les zones océaniques tropicales quasi désertiques où la stratification est quasi-permanente et la PP très faible, celle-ci a déjà diminué de 15 % au cours des dernières décennies (Polovina *et al.*, 2008). Dans les régions les plus productives (comme les latitudes modérées de l'Atlantique Nord), la PP va aussi diminuer suite à une forte limitation en nutriments, principalement causée par une stratification accrue et un ralentissement de la circulation océanique générale (Richardson et Schoeman, 2004). Dans les régions polaires, l'augmentation de la température et de la disponibilité en lumière (par la fonte des glaciers) augmentera modérément la PP (Steinacher *et al.*, 2009).

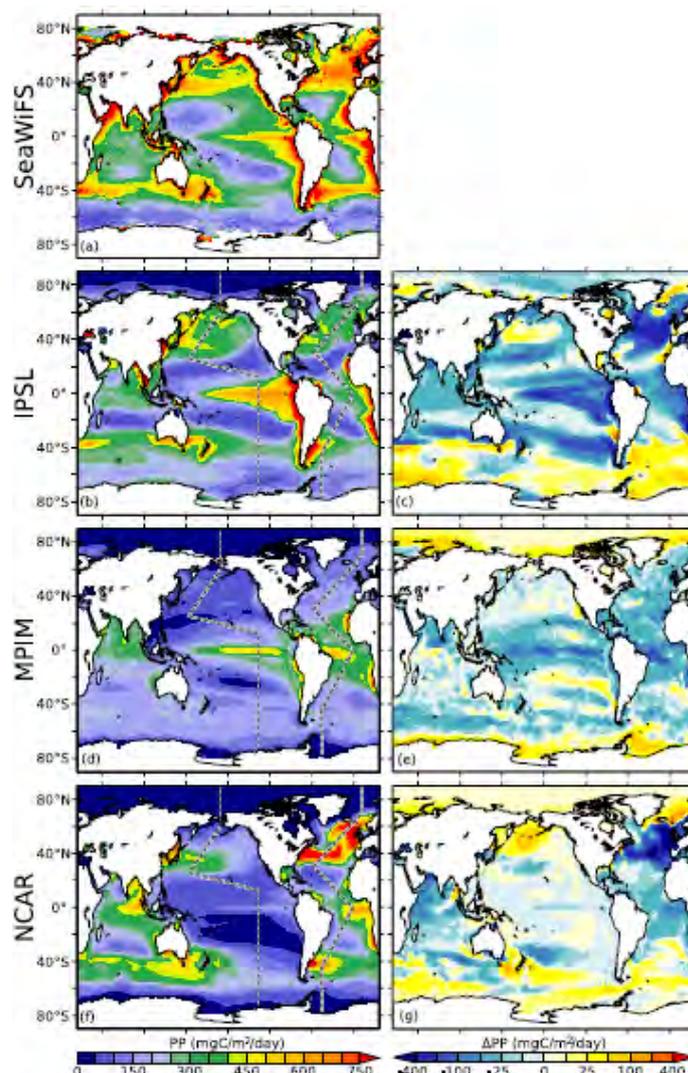


Figure 92 : Evolution de la moyenne annuelle de la PP observée de 1860-1869 (gauche) par SeaWiFS ; Behrenfeld *et al.*, 2006 ; Behrenfeld et Falkowski, 1997 (a) et projetée pour 2090-2099 selon A2 (droite) par l'IPSL (b, c), le MPIM (d, e) et le NCAR (f, g). Les modifications 2090-2099 sont indiquées sur une échelle exponentielle et représentent la différence entre 2090-2099 et 1860-1869 (Steinacher *et al.*, 2009).

Malgré l'accord général sur ces tendances, l'analyse montre aussi des divergences entre les modèles, mettant en évidence les domaines où des recherches supplémentaires sont nécessaires. En particulier, d'importantes différences apparaissent quant à l'évaluation de l'impact du retrait des glaces de mer (notamment dans l'océan Arctique) et sur la simulation du cycle biogéochimique du fer (Buesseler *et al.*, 2008). Ces résultats sont aussi en contradiction avec l'étude de Sarmiento *et al.* (2004). En effet ces derniers prédisaient une augmentation de la PP moyenne globale de 0,7 à 8,1 % et non une diminution. Cependant, dans cette dernière étude, le cycle des nutriments et les concentrations de nutriments ne sont pas explicitement pris en compte (Steinacher *et al.*, 2009). Pour progresser dans la recherche, il serait donc nécessaire de mieux intégrer les zones côtières et de combiner les observations par satellite, sur le terrain et en laboratoire.

Par ailleurs, ces projections, basées sur le couplage d'analyse de séries chronologiques et de modélisation, restent très incertaines (Boyce *et al.*, 2011), n'existent qu'à une échelle globale et négligent les zones côtières, où les modèles ont du mal à reproduire les observations (Steinacher *et al.*, 2009). Ces auteurs déconseillent (i) de moyenniser les résultats des modèles climatiques, car les imperfections liées à chaque modèle influenceraient la moyenne multi-modèle et (ii) d'extrapoler ces résultats à un niveau plus local. De plus, en milieu côtier, l'effet d'une augmentation des températures de surface sur la stratification des eaux interagit avec l'effet des apports d'eaux douces

sur leur structure verticale et les concentrations en nutriments. Des eaux stratifiées mais enrichies par les apports terrigènes pourraient devenir plus productives voire eutrophes (Gross, 2009 ; Hoegh-Guldberg et Bruno, 2010). De ce fait les interactions entre enrichissement et réchauffement auront dans le futur une influence considérable (Gros, 2011) sur l'occurrence d'épisodes anoxiques (carences en oxygène des fonds marins du fait de la demande biologique générée par la consommation de cet excès de matière organique) et leurs conséquences écologiques (mortalités massives d'animaux du fait de l'action conjuguée des carences en oxygène et de besoins métaboliques supérieurs quand la température augmente ; Portner et Knust, 2007).

A une échelle plus locale, dans le cadre du projet RECLAIM¹⁴⁴, il a été prédit une augmentation de la PP dans la mer de Barents (où la glace de mer disparaît) et la mer de Norvège, probablement en raison d'une augmentation de la température. **A l'inverse, cette approche prédit une diminution de la PP dans le golfe de Gascogne, probablement due à un accroissement de la stratification provoquée par le réchauffement**, ainsi que des changements dans la distribution (dérive vers le Nord pour certaines espèces) et la structure des communautés planctoniques. Les projections réalisées par plusieurs modèles biophysiques pour la mer du Nord montrent que la PP marine serait fortement affectée par les variations du rayonnement solaire, et dans une moindre mesure par la vitesse du vent et les températures de l'air (Fig. 93).

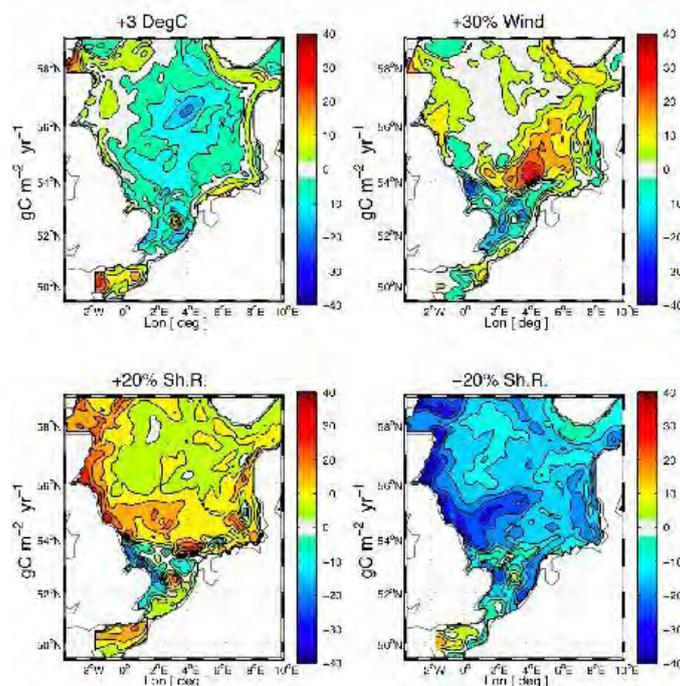


Figure 93 : Variations de la production primaire en réponse à une augmentation de 3°C de la température de l'air (en haut à gauche), une augmentation de 30 % de la vitesse du vent (en haut à droite) et une augmentation de 20 % (en bas à gauche) ou une diminution de 20% (en bas à droite) du rayonnement solaire, prédit par le modèle biophysique Ecosmo (source : Drinkwater *et al.*, 2009 cités dans RECLAIM¹⁴⁵).

Par conséquent, si des tendances nettes se dessinent à certaines latitudes, **il n'est pas possible de dresser une perspective très claire de l'évolution de la production primaire sous les latitudes tempérées, et notamment en Bretagne. A ce jour, dans l'Atlantique Nord Est et les zones côtières proches de la Bretagne, les données disponibles depuis les années 1950 ont permis de démontrer une augmentation des stocks de phytoplancton en mer du Nord.** Par ailleurs, sur l'Atlantique Nord Est, ces dernières décennies ont été marquées par une augmentation des

¹⁴⁴ <http://www.climateandfish.eu/>
¹⁴⁵ <http://www.climateandfish.eu/>

microalgues flagellées au détriment des diatomées, siliceuses (Rijnsdorp *et al.*, 2010), en lien avec la stratification thermique accrue des eaux (Gros, 2011). Les interactions complexes entre stratification des eaux, disponibilité en énergie lumineuse et production primaire ne permettent pas à ce jour de l'évolution future de la production primaire pour les eaux bordant la Bretagne.

➤ **Modifications de la composition des écosystèmes : modification de la productivité, de l'abondance et de la répartition biogéographique des espèces**

Les changements climatiques ont des effets sur la biodiversité en termes de composition des populations et peuplements (i.e. nombre, type, abondance des individus et des espèces) car ils affectent les capacités des organismes à croître, se développer et se reproduire dans le milieu, qui en retour vont (i) s'acclimater (changement physiologique et phénotypique), (ii) s'adapter (changement évolutif ou/et (iii) s'échapper (déplacement des espèces). Les conséquences sur la biodiversité sont ainsi diversifiées allant de la modification de la productivité des écosystèmes à des évolutions de l'aire de distribution des espèces. En milieu marin, ces changements répondent à de nombreux processus dont :

(i) des limitations dans les ressources nutritives : la production des différents niveaux de la chaîne trophique, depuis les consommateurs primaires jusqu'aux carnivores dépend de la production primaire (Ware et Thompson, 2005). De ce fait, les variations de production primaire liées au réchauffement se diffusent vers les échelons trophiques supérieurs, notamment en Atlantique Nord (Richardson et Schoeman, 2004) ;

(ii) des contraintes écologiques telle qu'une moindre disponibilité d'habitats sous l'effet par exemple de l'érosion ou d'endiguement (en vue de la protection du littoral) ;

(iii) des contraintes physiologiques par exemple affectant le développement de certains stades du cycle de vie (ex. effet de la température sur les larves des invertébrés ; O'Connor *et al.*, 2007) ;

(iv) des modifications phénologiques (e.g. Genner *et al.*, 2010b), notamment le décalage des périodes de reproduction qui peuvent induire des limitations dans le recrutement des juvéniles ainsi que des limitations dans l'accès aux ressources nutritives (effet dit de « match/mismatch »). Hiscock *et al.* (2004) notent une série de mécanismes liés aux augmentations de température au moment de la reproduction et de la dispersion larvaire qui devraient modifier la distribution et l'abondance des espèces en limite sud. Par exemple, un plus grand succès de reproduction, un développement larvaire accéléré et une meilleure survie larvaire.

Ces processus et conséquences attendus sont bien documentés avec le cas des copépodes. Les modifications de production primaire en réponse au changement climatique (cf. paragraphe précédent) vont en effet affecter l'ensemble de la chaîne trophique marine et notamment les échelons supérieurs de la chaîne alimentaire pélagique, et en premier lieu le zooplancton. Ces changements de production liés aux disponibilités nutritives s'accompagnent d'une modification de la répartition biogéographique des peuplements. Les copépodes et en particulier l'espèce *Calanus finmarchicus*, représentent la majeure partie du zooplancton des écosystèmes pélagiques et ont donc un rôle central dans la production secondaire de l'océan Atlantique Nord. Un échantillonneur de plancton en continu (CPR, en anglais : *Continuous Plankton Recorder*) a été développé par la Sir Alister Hardy Foundation for Ocean Science¹⁴⁶ (SAHFOS), à bord des navires traversant l'Atlantique Nord dès les années 1930. Grâce à celui-ci, nous disposons de séries suffisantes pour caractériser l'évolution du macrozooplancton depuis plusieurs décennies et pour montrer les conséquences du réchauffement sur la distribution des espèces planctoniques (Tréguer *et al.*, 2009). Par ailleurs, **au cours des cinq dernières décennies, un déplacement vers le nord des espèces tempérées et**

¹⁴⁶ <http://www.sahfos.ac.uk/sahfos-home.aspx>

subtropicales, corrélé à une augmentation progressive de la présence d'espèces subtropicales dans les régions plus tempérées de l'Atlantique Nord Est a été observé (Fig. 94 gauche). Il faut aussi noter le déclin des espèces subarctiques qui se replient vers le nord et l'ouest. Un autre indicateur a été utilisé pour évaluer ces mouvements d'espèces en mer du Nord, c'est le ratio (%) : espèce tempérée d'eau froide (*C. finmarchicus*) / espèce tempérée d'eau chaude (*C. helgolandicus*). Ces deux espèces ont des limites thermiques de répartition différentes, mais elles peuvent coexister successivement dans l'année, en fonction des températures de l'eau. Il est ainsi observé une augmentation de l'abondance de *C. helgolandicus* en mer du Nord par rapport à celle de *C. finmarchicus* (Fig. 94 droite; Beaugrand *et al.*, 2002).

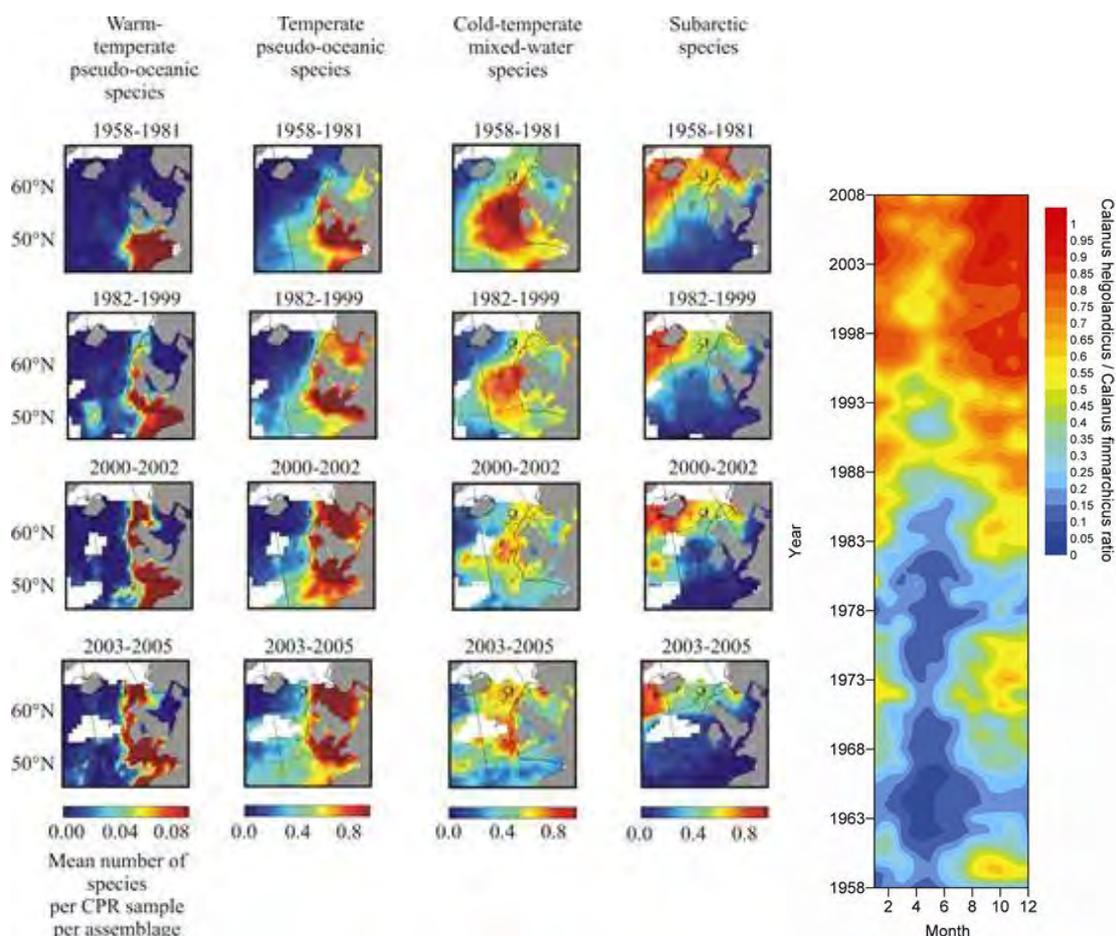


Figure 94 : **Gauche** : Impact du changement climatique sur la répartition de différents groupes de macro-zooplankton dans l'Atlantique du Nord Est, de 1958 à 2005. **Droite** : Ratio entre une espèce de copépode d'eau chaude (*C. helgolandicus*) et une espèce d'eau froide (*C. finmarchicus*), par mois de 1958 à 2008. Les valeurs en rouge indiquent une dominance de l'espèce d'eau chaude et les valeurs en bleu, la dominance de l'espèce d'eau froide. (0 = dominance totale de *C. finmarchicus* ; 1 = dominance total de *C. helgolandicus*) (Beaugrand *et al.*, 2002).

Par ailleurs, depuis les années 1960, la biomasse totale de *Calanus sp.* aurait diminué de 70 % en mer du Nord (Fig. 95). En effet, en 1962, *C. finmarchicus* représentaient 80 % du total des *Calanus sp.*, alors qu'ils ne représentaient que 20 % du genre au début des années 2000 (Reid *et al.*, 2003). L'étude de Helaoüet *et al.* (2011) avait pour but de prédire la future répartition spatiale et les changements d'abondance de *C. finmarchicus* dans un contexte de réchauffement climatique. Ils ont ainsi prédit qu'à la fin du siècle, cette espèce pourrait être à l'extérieur de sa niche thermique pendant 8 mois lors d'années chaudes et pendant 5 mois lors d'années froides. Le stress physiologique induit par la hausse de température est prévu d'affecter consécutivement la reproduction, la croissance, l'alimentation et la survie des individus.

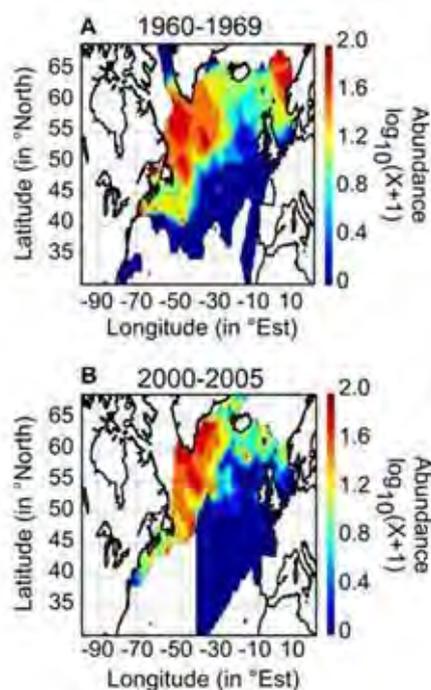


Figure 95 : Cartes de distribution du copépode *Calanus finmarchicus* en Atlantique Nord durant les années 1960 (A) et au cours des années 2000 (B) (Helaouët *et al.*, 2011).

Globalement, les données disponibles depuis les années 1950 montrent une diminution des biomasses de zooplancton à l'ouest des îles britanniques en mer Celtique, tendance confirmée sur une série plus courte au sud du golfe de Gascogne (Rijnsdorp *et al.*, 2010). Par contre, la tendance est inverse pour l'Atlantique Nord Est dans son ensemble. Bien qu'en phase avec celle de la production primaire, l'évolution des biomasses zooplanctoniques reste donc à ce jour sujette à caution au large des côtes bretonnes. Comme pour le phytoplancton, les séries de données démontrent un changement dans la dynamique temporelle du zooplancton, avec notamment un développement printanier plus précoce. La modification des périodes de développement et des aires de distribution des copépodes et notamment la disparition de *C. finmarchicus*, espèce consommée par les larves de poisson, pourraient entraîner d'importantes conséquences sur les niveaux trophiques supérieurs, en particulier sur les stocks de poissons exploités et les oiseaux marins (Ware et Thompson, 2005 ; Chassot *et al.*, 2010).

Grâce aux données du CPR, les effets du changement climatique ont pu être bien documentés sur les copépodes et être à la base de prévisions pour les changements à venir. Documenter et prévoir ces effets sur des macro-organismes, notamment les macro-algues et invertébrés rassemblant de nombreuses espèces structurantes, ingénieurs ou clés des écosystèmes marins côtiers bretons, est beaucoup plus complexe. En effet, ces organismes sont souvent longévifs avec des temps de génération qui peuvent être de plusieurs années : les très longues séries temporelles qui permettraient de prendre en compte ces longs cycles et durée de vie manquent sur ces organismes. Néanmoins, outre des modèles et des approches expérimentales qui sont des moyens indirects d'étudier l'effet des changements climatiques, il existe quelques données permettant de prévoir les évolutions des peuplements côtiers.

Les modifications de l'aire de distribution des espèces ont été par exemple documentées chez la grande algue brune *Alaria esculenta*, qui a quasiment disparue du nord de la péninsule britannique depuis les années 1990 ainsi que dans certaines localités du sud. Une influence directe du changement des températures des eaux anglaises est le facteur avancé pour expliquer les changements : une température de 16°C est un seuil limite pour l'acquisition de la maturité sexuelle de cette algue (Helmuth *et al.*, 2006). Les travaux réalisés sur des séries biologiques de longue durée

sur les côtes anglaise de la Manche (Hawkins *et al.*, 2003 ; Hiscock *et al.*, 2004 ; Mieszkowska *et al.*, 2005) permettent également de documenter des effets intéressants sur les balanes. Ainsi, l'abondance des balanes *Chtamalus sp.*, favorisées par les eaux chaudes, est corrélée positivement avec les températures alors que l'abondance des espèces affines des eaux froides telles que *Semibalanus balanoides* est corrélée négativement avec ces températures. Les corrélations les plus importantes sont trouvées avec un retard de 1-2 ans, qui correspond au temps de génération de ces balanes : les températures influencent directement les étapes du cycle de vie entre le développement gonadique et le recrutement. Par ailleurs, *S. balanoides* est de moins en moins présente dans le Sud Ouest de l'Angleterre depuis les années 2000 et sa limite méridionale a remonté vers le golfe du Gascogne. Toutefois, cette étude a été réalisée sur une courte période (10 ans) qui ne permet pas d'observer un signal du changement climatique dans ces modifications.

L'exemple précédent sur les balanes permet déjà de souligner les effets attendus des modifications climatiques sur la phénologie (i.e. saisonnalité du cycle de vie des espèces). La distribution des larves d'échinodermes en Manche occidentale et en mer d'Iroise en est un exemple également démonstratif. **A partir d'un suivi réalisé entre 1970 et 2005 (grâce aux données issues du CPR), les abondances mensuelles moyennes des larves d'échinodermes observées indiquent que celles-ci sont présentes plus tôt dans l'année (environ 2 mois) au cours de la période 1988-2005 comparativement à la période 1970-1987** (Fig. 96 gauche ; Ayata, 2010). Ces décalages phénologiques ont été également observés pour de nombreux taxons planctoniques en mer du Nord dans l'analyse réalisée par Edwards et Richardson (2004) (Fig. 96 droite). Ces derniers auteurs ont souligné que l'importance des changements s'opérant simultanément avec des modifications biogéographiques pourrait être l'origine de « mismatch » trophiques majeurs entraînant des modifications fonctionnelles de l'ensemble de l'écosystème en mer du Nord.

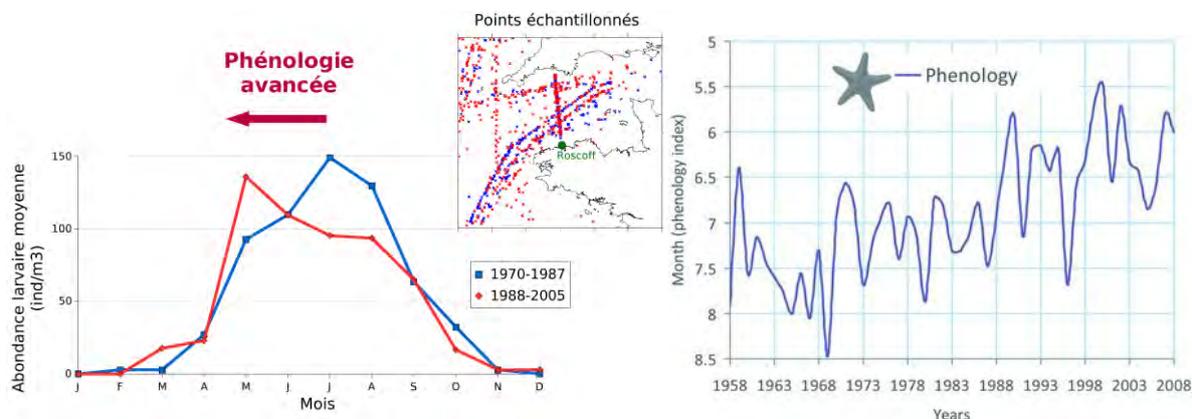


Figure 96 : Abondances moyennes mensuelles des larves d'échinodermes dans les échantillons récoltés par le CPR en Manche occidentale et en mer d'Iroise entre pour les périodes 1970-1987 et 1988-2005 (gauche ; Ayata, 2010) et abondances moyennes annuelles des larves d'échinoderme en mer du Nord de 1958 à 2008 (droite ; Edwards et Richardson, 2004). Données mises à disposition par la SAHFOS.

L'augmentation de température des océans pourrait ainsi être à l'origine d'émissions plus précoces des pontes et larves. Cette augmentation est également associée à une diminution de la durée de vie larvaire (O'Connor *et al.*, 2007 ; Duarte, 2007 ; Ayata, 2010). Or, la diminution de la durée de vie larvaire est susceptible d'avoir d'importantes implications sur la connectivité¹⁴⁷ des populations (Duarte, 2007 ; Lett *et al.*, 2010). Duarte (2007) propose ainsi que l'influence de la température sur la durée de vie larvaire pourrait se traduire par une diminution des distances de dispersion de 45 % en moyenne avec une augmentation thermique de 4°C. Ayata *et al.* (2010) ont modélisé l'effet de la diminution de la durée de vie larvaire, ainsi que l'effet de décalage des mois d'émission larvaire, sur la dispersion réalisée par des larves d'invertébrés émises dans différentes

¹⁴⁷ La connectivité de deux populations est le degré d'échanges de migrants entre ces deux populations.

localités au nord du golfe de Gascogne. Le choix de ces sites d'émission avait pour objectif de déterminer si les changements simulés affectent la dispersion des larves entre les deux provinces biogéographiques (et donc entre l'Atlantique et la Manche, au nord et sud de la Bretagne). Les modèles confirment les hypothèses à savoir un effet du décalage phénologique et de la durée de vie larvaire sur la dispersion des larves et donc la connectivité des populations. En particulier, une diminution de la durée de vie larvaire en induisant une diminution de la distance de dispersion se traduit par une augmentation des migrations à l'échelle locale et une diminution à une échelle régionale. Une phénologie avancée induit également sous certains scénarios une inversion du sens de la dispersion avec un accroissement des interactions avec des populations septentrionales (Fig. 97 ; Ayata *et al.*, 2010).

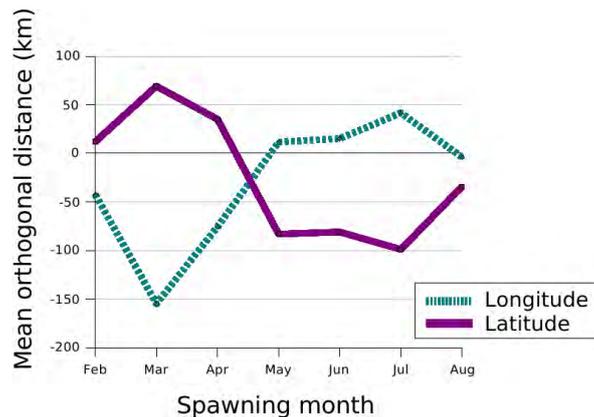


Figure 97 : Evolution saisonnière du sens et de la direction du transport larvaire : distances moyennes de transport latitudinal et longitudinal pour une population. Une distance de transport latitudinal positif et une distance de transport longitudinal négatif indiquent un transport vers le Nord Ouest, l'inverse indiquant un transport vers le Sud Est. Résultats obtenus sans comportement natatoire (dispersion passive) et pour une durée de vie larvaire de 4 semaines (figure issue de Ayata, 2010 modifiée par Ayata *et al.*, 2010).

Cette approche par modélisation constitue une première étape dans l'analyse des impacts du changement climatique sur la dispersion des larves d'organismes marins. Selon Lett *et al.* (2010), pour obtenir de meilleures analyses, il serait nécessaire d'avoir des modèles trophiques et hydrodynamiques à l'échelle régionale, qui devraient intégrer l'influence de différentes variables (température, circulation, comportement des larves, etc.) et des scénarios climatiques réalistes sur les processus se produisant pendant la phase larvaire (transport, croissance, mortalité, etc.) et à l'âge adulte (Fig. 98).

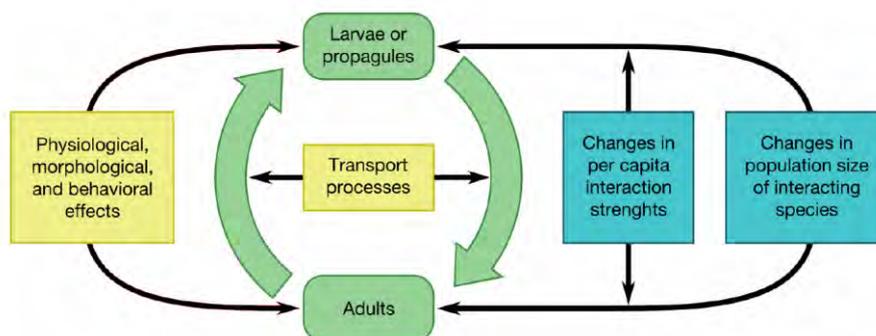


Figure 98 : Effets potentiels du changement climatique sur une population marine. Le cycle de vie de cet organisme est en vert. Les effets du changement climatique sont en jaune (effets directs) et bleu (effets indirects) (figure issue de Harley *et al.*, 2006 adaptée par Lett *et al.*, 2010).

Ainsi concernant les effets des changements climatiques sur la composition et le fonctionnement des écosystèmes côtiers, malgré les nombreuses incertitudes liées aux manques de données expérimentales ou d'observation, il apparaît déjà de nombreux effets bien documentés. On

retiendra ici en particulier (1) des modifications d'aires de distribution des espèces accompagnées (2) d'un changement des communautés au profit d'espèces plus méridionales ou d'espèces dont le cycle de vie saisonnier (ponte, vie larvaire, sédentarisation) sera plus précoce et/ou plus court et (3) des modifications de connectivité des populations, et donc du potentiel de colonisation, de renouvellement et d'adaptation des populations aux changements environnementaux. Il reste néanmoins de grandes zones d'incertitude et notamment concernant les capacités et vitesses d'acclimatation et d'adaptation des organismes en réponse à l'évolution des conditions environnementales.

➤ **Conséquences du changement climatique sur les peuplements ichthyologiques et l'exploitation halieutique**

Les poissons ont fait l'objet de nombreuses études et suivis qui permettent d'illustrer et démontrer les effets du changement climatique sur des espèces marines côtières. Ces études permettent de confirmer les (trop rares) observations et les résultats des modèles utilisés pour les invertébrés et algues marines présentés dans la section précédente.

- Changement d'abondance locale et de répartition biogéographique des espèces de poissons

Chaque espèce de poisson possède, malgré des adaptations locales des populations (i.e. des spécificités à l'échelle d'une population), un optimum thermique (par ex. une température moyenne annuelle des eaux de fond de l'ordre de 7°C pour la morue ; Planque et Frédou, 1999) et une gamme plus ou moins étendue de tolérance en deçà et au-delà (variable au cours de la vie et particulièrement limitée lors de la reproduction ; Gros, 2011) et d'amplitude différente selon les espèces. Si la température moyenne est inférieure à cet optimum, un réchauffement a un effet positif alors que cet effet est négatif si la température moyenne est supérieure (Fig. 99).

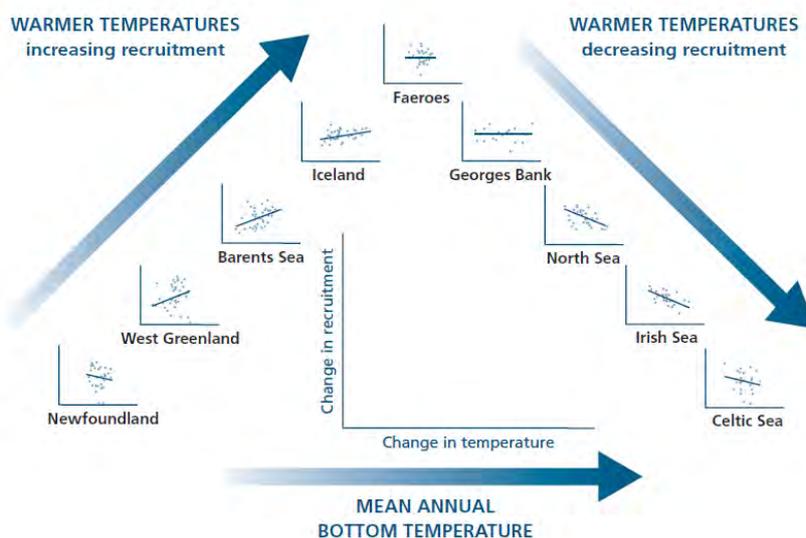


Figure 99 : Relation température, succès du recrutement pour différentes populations de morue sous des conditions thermiques variables (Planque et Frédou, 1999).

En réponse, les populations de poissons voient leur répartition modifiée par l'évolution de la température des eaux. Perry *et al.* (2005) ont mis en évidence que la latitude moyenne de différentes espèces de poissons est liée positivement à la température en mer du Nord, c'est-à-dire qu'on trouve ces poissons plus au nord les années chaudes. Parallèlement, pour une espèce donnée, les

populations situées dans les eaux chaudes ont tendance à régresser et les populations des eaux froides à augmenter en réponse au réchauffement (Drinkwater, 2005).

Aux limites thermiques de répartition des espèces, ce processus explique les disparitions d'espèces boréales et les apparitions d'espèces méridionales. Ainsi, des études réalisées par Ifremer ont montré, dès les années 1990, un déplacement vers le nord le long des côtes européennes, de deux espèces à affinité tropicale, *Zenopsis conchifer* et *Cyttosis roseus* (Fig. 100). **De 1967 à 1995, la limite nord de la répartition de l'espèce *Z. conchifer* s'est déplacée du golfe de Cadix au nord de l'Irlande. De 1962 à 1995, la limite nord de la répartition de l'espèce *C. roseus* est remontée en latitude du golfe de Cadix au sud de l'Irlande** (Quéro *et al.*, 1998).

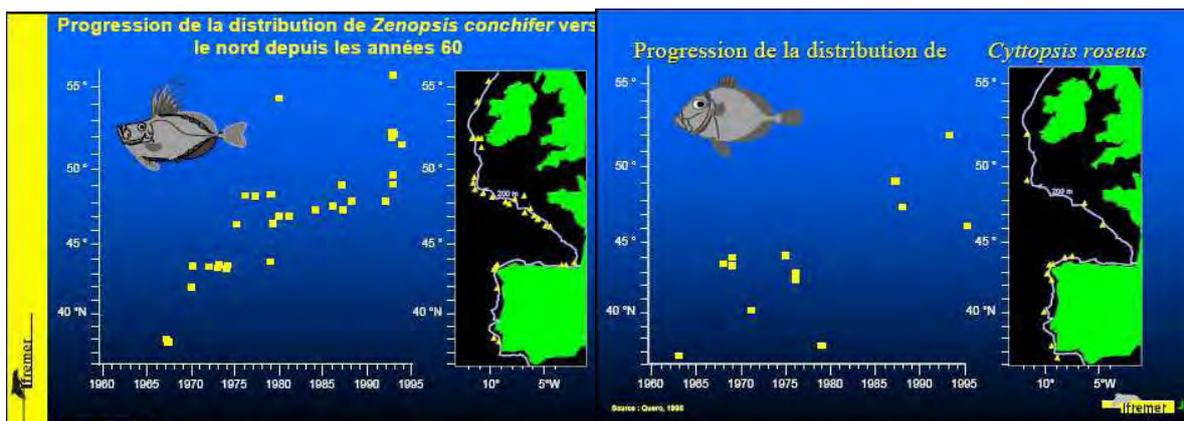


Figure 100 : Distribution de *Z. conchifer* (1967-1995) et *C. roseus* (1962-1995) le long des côtes européennes (Quéro *et al.*, 1998).

Une étude plus récente (Nicolas *et al.*, 2011) a comparé la distribution d'espèces de poissons, dans les années 1970 à celle d'aujourd'hui, dans 55 estuaires le long de la façade atlantique européenne (du Portugal à l'Ecosse). Parmi les 15 espèces les plus communes, 11 montrent une distribution différente à celle du passé et se sont déplacées vers le nord (Fig. 101). Par ailleurs, sur 10 espèces subtropicales, 6 ont été enregistrées au-delà de leur limite nord de répartition.

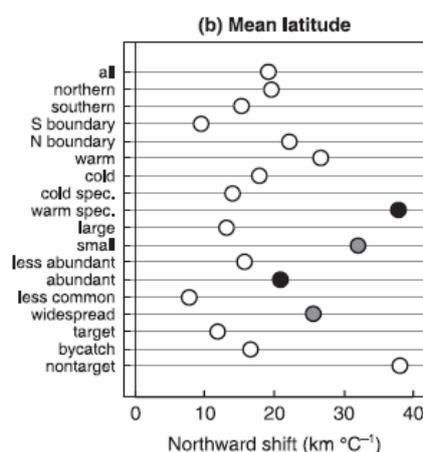


Figure 101 : Sensibilité à la température de la réponse géographique des assemblages de poissons, changement en km par degré de réchauffement ($\text{km } ^\circ\text{C}^{-1}$) (Nicolas *et al.*, 2011).

Si les peuplements ichthyologiques se déplacent vers le nord pour répondre au réchauffement, ces processus expliquent aussi les changements locaux d'abondance. VanHal *et al.*, (2010) ont observé que l'abondance de deux petites espèces de poissons plats lusitaniens (la solenette, *Buglossidium luteum* et l'arnoglosse lanterne, *Arnoglossus Laterna*) a augmenté dans la mer du Nord depuis 1980, indiquant à la fois une expansion vers le nord et une augmentation de la densité locale (Fig. 102). Ces espèces originaires de la péninsule ibérique sont donc maintenant

abondantes en mer du Nord, où elles se reproduisent désormais avec succès. Ce processus a été confirmé en analysant les évolutions d'abondance des poissons démersaux¹⁴⁸ en mer du Nord entre 1980 et 2004 (Dulvy *et al.*, 2008) en fonction de leur répartition biogéographique initiale.

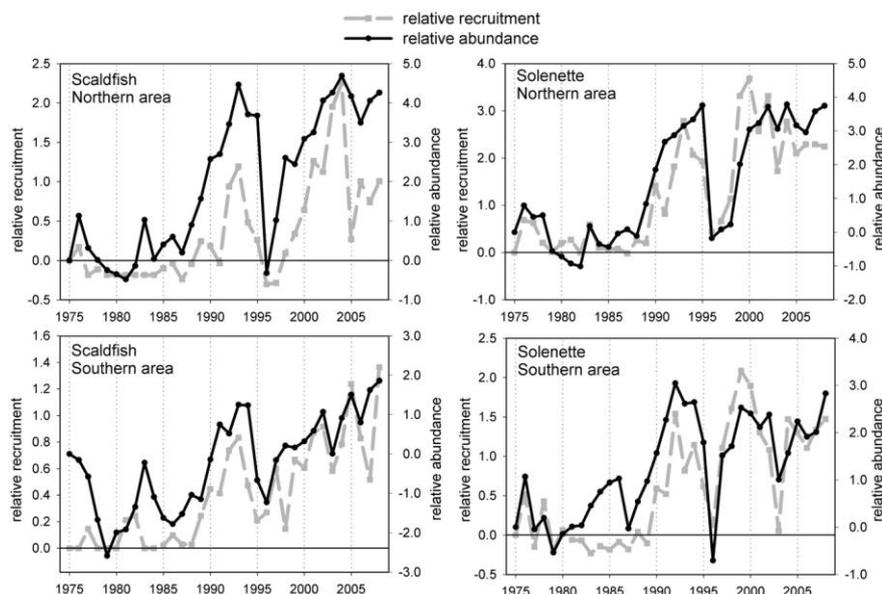


Figure 102 : Recrutement par rapport à l'âge 1 (pointillés gris) et l'abondance relative des adultes (ligne noire) pour l'arnoglosse lanterne (gauche) et le solenette (droite) dans la zone nord (haut) et la zone sud (bas) de la mer du Nord entre 1970 et 2008 (vanHal *et al.*, 2010).

Localement, Engelhard *et al.* (2009) dans le cadre du projet RECLAIM ont observé une **augmentation de l'abondance du Saint-Pierre (*Zeus faber*), une espèce lusitanienne, dans les mers proches de la péninsule bretonne (golfe de Gascogne, mers celtiques, Manche, mer du Nord) entre 1978 et 2005** (Fig. 103).

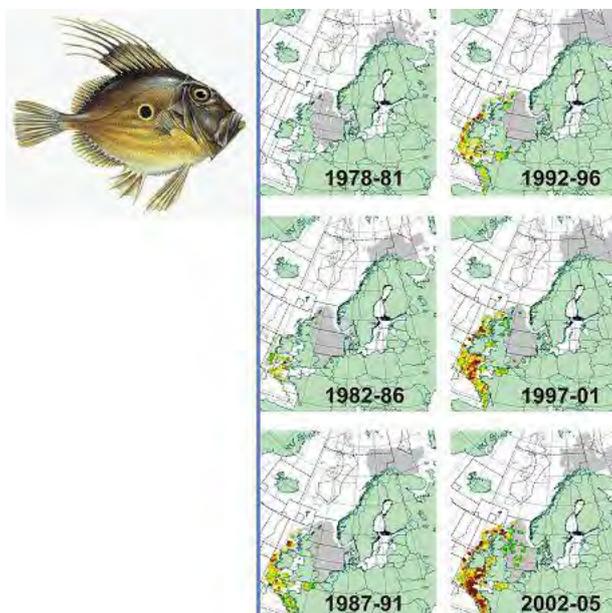


Figure 103 : Variation en abondance et distribution dans l'Atlantique Nord-Est, de *Zeus faber*, une espèce lusitanienne entre 1978 et 2005 (source : Engelhard *et al.*, 2009 cités dans RECLAIM¹⁴⁹).

¹⁴⁸ Les poissons démersaux sont ceux vivant à proximité du fond par opposition à pélagique pour les poissons vivant plus en surface.

¹⁴⁹ <http://www.climateandfish.eu/>

Blanchard et al. (2005) ont par ailleurs observé une augmentation de l'abondance de *Capros Aper* dans le golfe de Gascogne entre 1973 et 2001, liée à l'augmentation de la température pendant la période de reproduction. Plus généralement, un déplacement vers le nord similaire a été observé pour les poissons plats dans le golfe de Gascogne entre 1987 et 2006 (Hermant et al., 2010). Sur 20 espèces recensées sur ce secteur au cours de cette période, 12 présentent des évolutions significatives : 6 espèces méridionales ont vu leur abondance augmenter et 6 espèces boréales ont régressé dans le même temps. Hermant et al. (2010) ont par ailleurs mis en évidence l'impact du réchauffement sur les premiers stades du cycle de vie, constatant que pour les espèces ayant quasiment disparu du golfe de Gascogne, la chute d'abondance des juvéniles précédait celle des adultes de plusieurs années. Par conséquent, la dérive vers le nord de ces espèces n'est pas liée à un déplacement des poissons mais à l'arrêt du renouvellement des populations au niveau de la ponte, en lien avec une moindre tolérance thermique en période de reproduction (Gros, 2011), et/ou de la survie des jeunes stades.

Ces modifications d'abondance ont des conséquences significatives sur l'exploitation halieutique. **Ainsi, la très forte raréfaction de la limande et de la plie dans le golfe de Gascogne a affecté des pêcheries conséquentes au préalable. Inversement, le développement des encornets ou encore du rouget barbet en Manche a généré de nouveaux revenus pour les pêcheurs locaux** et ces espèces, rares il y a quelques décennies de la Bretagne Nord au Pas de Calais, sont aujourd'hui structurantes pour l'exploitation (Rijnsdorp et al., 2010).

Il faut par ailleurs noter que **la réponse des populations de poissons au réchauffement climatique dépend de leur niveau d'exploitation par la pêche, la surexploitation ayant pour conséquence d'exacerber leur sensibilité** (Brander, 2005). Ainsi, une population surexploitée présente une structure démographique altérée, basée uniquement sur les juvéniles et les jeunes adultes. Or, les populations de poissons marins présentent la particularité de fluctuations interannuelles du recrutement (i.e. abondance de juvéniles intégrant la population adulte pour une année donnée) très importantes (de l'ordre de 1 à 20). Les fluctuations du recrutement influencent d'autant plus l'abondance globale d'une population que celle-ci repose uniquement sur un nombre limité de jeunes classes d'âge. En conséquence, le changement climatique, qui affecte le recrutement (Hermant et al., 2010), a des conséquences plus fortes sur des populations surexploitées (Gros, 2011). Par ailleurs, les jeunes femelles de poissons marins ont une saison de ponte plus restreinte que les femelles plus âgées, et généralement plus tardive dans la saison. Une population surexploitée pond de ce fait sur une saison plus restreinte, ce qui augmente le risque que les conditions hydroclimatiques ne soient pas favorables au succès du recrutement (Perry et al., 2010 ; Planque et al., 2011).

Les travaux prospectifs sur ces questions de dérive polaire des populations (Drinkwater, 2005) et des peuplements ichtyologiques ont récemment émergé. Cheung et al. (2009) ont projeté les effets du changement climatique, selon plusieurs scénarios du GIEC, sur la distribution de 1066 espèces de poissons et invertébrés marins (Fig. 104). Cette étude montre que les phénomènes d'immigration locale (arrivée de nouvelles espèces) seront très importants sous les hautes latitudes (Arctique, océan Austral) ; que les extinctions locales (départ d'espèces d'une région donnée vers une autre) seront très nombreuses dans l'Atlantique Nord, les tropiques et l'océan Austral ; que le turn-over¹⁵⁰ local, principalement dominé par des invasions de nouvelles espèces, sera très fort dans l'Arctique et les régions subpolaires. Il en résulte une modification majeure des peuplements et de la biodiversité au niveau du compartiment ichtyologique à l'échelle planétaire. **En ce qui concerne les eaux adjacentes au nord-ouest de la France, le phénomène le plus marquant semble devoir être celui d'extinctions locales assez nombreuses d'espèces de poissons. Toutefois, ce constat est à considérer avec prudence puisqu'en mer du Nord, l'arrivée d'espèces auparavant limitées plus au**

¹⁵⁰ Le turn-over représente le renouvellement des espèces par des phénomènes d'invasion et d'extinction locale.

sud se traduit déjà par une forte augmentation de la diversité spécifique des peuplements ichtyologiques (Rijnsdorp *et al.*, 2010).

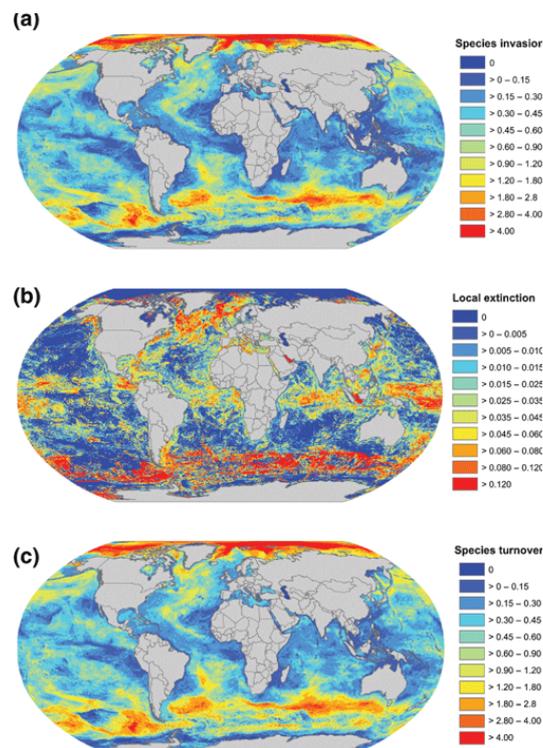


Figure 104 : Projections globales de l'impact du changement climatique sur la biodiversité marine pour l'horizon 2050, selon le scénario A1B du GIEC. Les impacts sont exprimés en termes d'immigration locale (a), d'extinction locale (b) et du taux de turn-over local (c), pour 1066 espèces de poissons et invertébrés marins. Le % de changement est exprimé pour l'horizon 2050 par rapport à l'écart avec la période 2001-2005 (Cheung *et al.*, 2009).

La séparation des espèces en groupes pélagiques et démersaux, montre que les changements de distribution au niveau global seront plus élevés pour les espèces pélagiques (Fig. 105). Les mers européennes seront particulièrement touchées par leur déplacement vers les pôles (Pereira *et al.*, 2010).

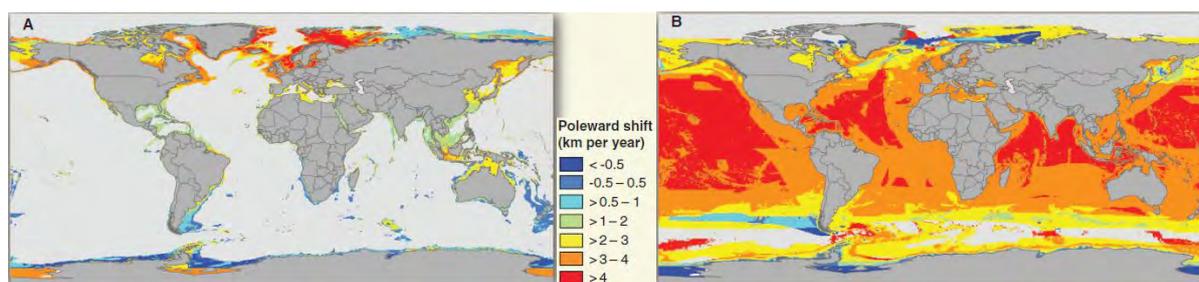


Figure 105 : Projections globales du déplacement vers les pôles pour 1066 espèces de poissons et invertébrés marins entre 2005 et 2050, selon le scénario A1B du GIEC. (A) pour les espèces démersales, (B) pour les espèces pélagiques (Pereira *et al.*, 2010).

Cependant, il ne faut pas oublier que ces projections ont été réalisées à un niveau global et qu'elles ne peuvent pas être extrapolées à un niveau plus local. Par ailleurs, les modèles comportent beaucoup d'incertitudes et nécessitent d'être améliorés (Cheung *et al.*, 2009). Ils ne prennent en effet pas en compte :

- les interactions entre les espèces ;
- les possibles adaptations génotypiques ou phénotypiques des espèces face au changement climatique ;
- les modifications chimiques de l'océan (acidification par exemple) ;

- les facteurs anthropiques qui pourront évoluer à l'avenir.

Une étude a été réalisée par Petitgas *et al.* (2009) dans le golfe de Gascogne afin d'analyser l'évolution des petits poissons pélagiques pour un scénario de réchauffement de 2,5°C de la température de fond de l'eau. **Ils ont ainsi montré une augmentation de l'abondance moyenne de la population d'anchois avec des maxima le long des côtes et un déplacement vers le Nord de la zone, en lien avec le changement climatique** (Fig. 106).

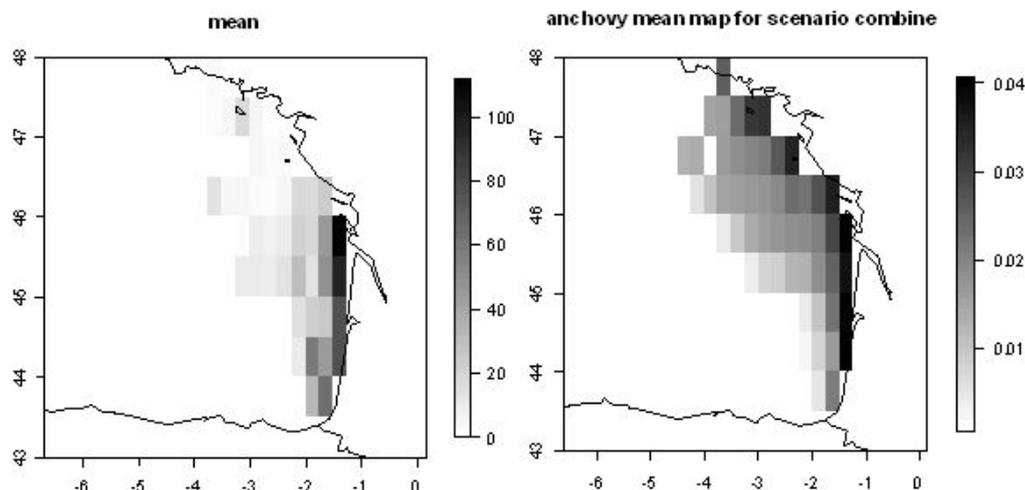


Figure 106 : Modélisation de la répartition des anchois dans le golfe de Gascogne, pour la période actuelle (gauche) et en 2050 avec le changement climatique (droite) (source : Petitgas *et al.*, 2009 cités dans RECLAIM¹⁵¹).

- Plongée en profondeur des espèces

Dulvy *et al.*, (2008) ont étudié un autre indicateur du réchauffement des eaux, la plongée en profondeur des poissons. **Ils ont ainsi observé qu'en mer du Nord, en moyenne, les différents assemblages de poissons démersaux sont descendus en profondeur de environ 3,6 m par décennie, en corrélation avec une augmentation de la température de fond en hiver de +1,6°C en 25 ans** (Fig. 107).

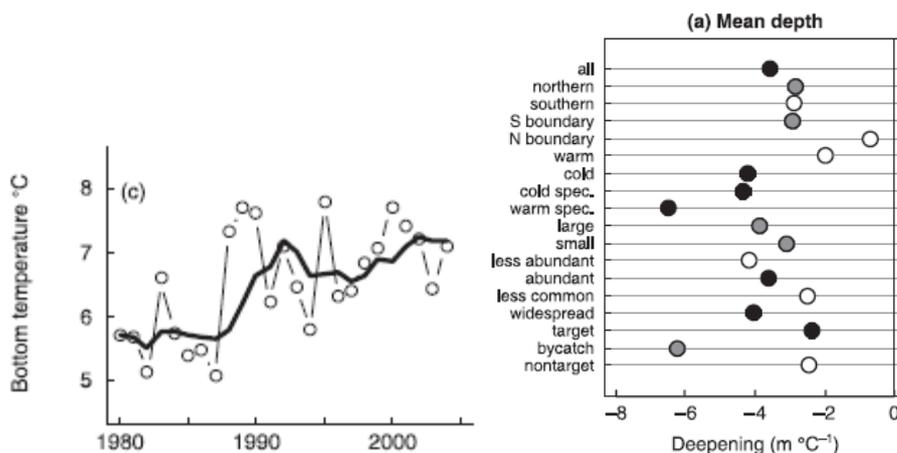


Figure 107 : **Gauche** : évolution de la température moyenne de fond en hiver (janvier-mars) de la mer du Nord entre 1980 et 2004. **Droite** : Sensibilité à la température de la réponse géographique des assemblages de poissons, plongée en profondeur en m par de gré de réchauffement (m.°C⁻¹). Les points noirs indiquent une significativité statistique à p<0,001 et les points gris à p<0,01 (Dulvy *et al.*, 2008).

¹⁵¹ <http://www.climateandfish.eu/>

Ce phénomène est particulièrement marqué pour les juvéniles de plie en mer du Nord, puisque les jeunes stades de cette espèce ont largement déserté leurs zones traditionnelles de nourriceries, très côtières et estuariennes, pour coloniser des secteurs situés plus au large. Ce processus attribué en partie au réchauffement des eaux côtières est considéré comme un facteur majeur ayant contribué à rendre inefficace la « plaice box », zone de réserve mise en place dans les années 1990 pour protéger les juvéniles de plies, favoriser le renouvellement de la population de mer du Nord et augmenter à terme les possibilités d'exploitation cette ressource.

- Impacts du réchauffement sur la croissance des poissons et la structure en taille des peuplements ichthyologiques

Baudron *et al.* (2011) ont analysé l'effet de la température sur la croissance de l'églefin (*Melanogrammus aeglefinus*) en mer du Nord de 1970 à 2006. Ils montrent que l'augmentation des températures en mer du Nord est corrélée avec une croissance plus rapide du haddock dans les 1^{ers} stades de vie mais à une taille moyenne plus petite à l'âge adulte, en lien à une maturité plus précoce. Teal *et al.* (2008) sont parvenues au même constat en ce qui concerne la croissance des juvéniles de sole et la plie, avec un effet positif du réchauffement des eaux côtières. Tresher *et al.* (2007) ont généralisé ce constat, depuis la côte jusqu'aux grands fonds avec des effets positifs en surface mais moins systématiquement en profondeur où les températures ne sont pas croissantes partout.

Toutefois il ne faut pas oublier que ces régions sont soumises à la pêche commerciale, qui exerce une pression sélective vers les individus à croissance lente, et que le réchauffement peut modifier la disponibilité en nourriture, influençant la croissance. Cette tendance à une croissance plus rapide dans des eaux plus chaudes n'est donc pas systématique

Par ailleurs, cette augmentation de croissance se couple avec les remplacements d'espèces évoqués au préalable. Des poissons méridionaux à croissance rapide mais à cycle de vie plus court et à taille maximale plus faible, remplacent des poissons boréaux plus grands à croissance lente. Ce patron général de distribution d'espèces aux caractéristiques différentes le long de gradients latitudinaux de température qui évoluent vers les pôles est lié aux caractéristiques bioénergétiques des poissons (van der Veer *et al.*, 2003). Il a été vérifié à l'échelle planétaire (Pauly, 1994).

Cette observation a été complétée localement par Genner *et al.* (2010a) **à l'échelle des peuplements ichthyologiques, à long terme (1911-2007) sur un assemblage de poissons démersaux en Manche occidentale. Ils ont ainsi observé une baisse continue de l'abondance et de la taille des grandes espèces ainsi qu'une augmentation de l'abondance des espèces de petite taille, en corrélation avec l'augmentation des températures** (Fig. 108). Blanchard *et al.* (2005) ont confirmé cette tendance en constatant la diminution du spectre de taille du peuplement ichthyologique dans le golfe de Gascogne. Sur ce même secteur le remplacement de la limande et de la plie par le cétéau (Désaunay *et al.*, 2006) illustre ce processus pour les poissons plats commerciaux.

A long terme, ces effets induits par le climat, à la fois sur la croissance individuelle et la maturité à l'échelle des populations mais aussi au niveau des communautés (remplacement d'espèces boréales de grande taille par des espèces méridionales plus petites) pourraient avoir d'importantes répercussions sur les stocks et les pêcheries.

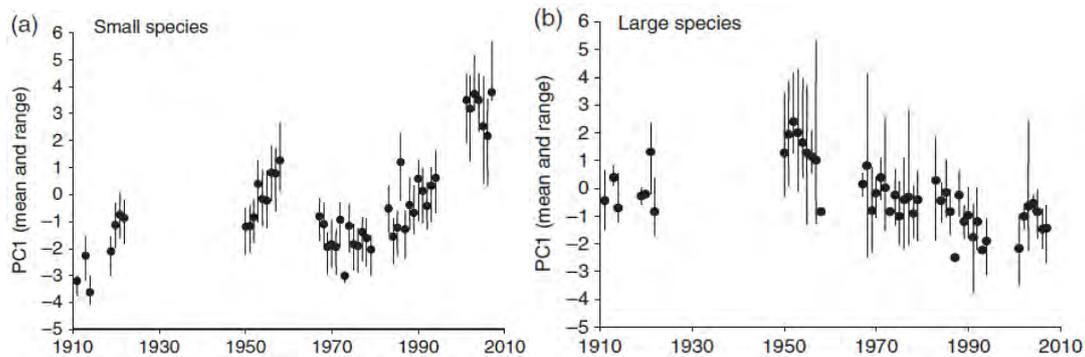


Figure 108 : Changements temporels de la structure des espèces de petite taille (a) et des espèces de grande taille (b) dans les assemblages de poissons en Manche occidentale de 1910 à 2010. Les tendances correspondent aux moyennes annuelles des captures par unité d'effort (CPUE, en anglais : *catch per unit effort*) (Genner *et al.*, 2010a).

- Effets écosystémiques et conséquences du changement climatique sur les peuplements des poissons et l'exploitation halieutique

Beaugrand *et al.* (2003) suggèrent que l'effet indirect de la température au travers de la dérive vers le nord des espèces tempérées de copépodes, est un facteur déterminant de l'abondance des larves de cabillaud et du recrutement en mer du Nord (Fig. 109). Faute d'une adaptation rapide, les larves de cabillaud ne trouvent plus sur leurs aires de développement au bon moment la nourriture adéquate (phénomène dit de « mismatch »). Ce déséquilibre de la chaîne trophique entraîne un dépérissement des larves qui se répercute sur les stocks adultes et les pêcheries de cabillaud. Une telle perturbation se couple à la surexploitation des stocks pour expliquer l'effondrement des pêches de cabillaud de l'Atlantique Nord (Tréguer *et al.*, 2009).

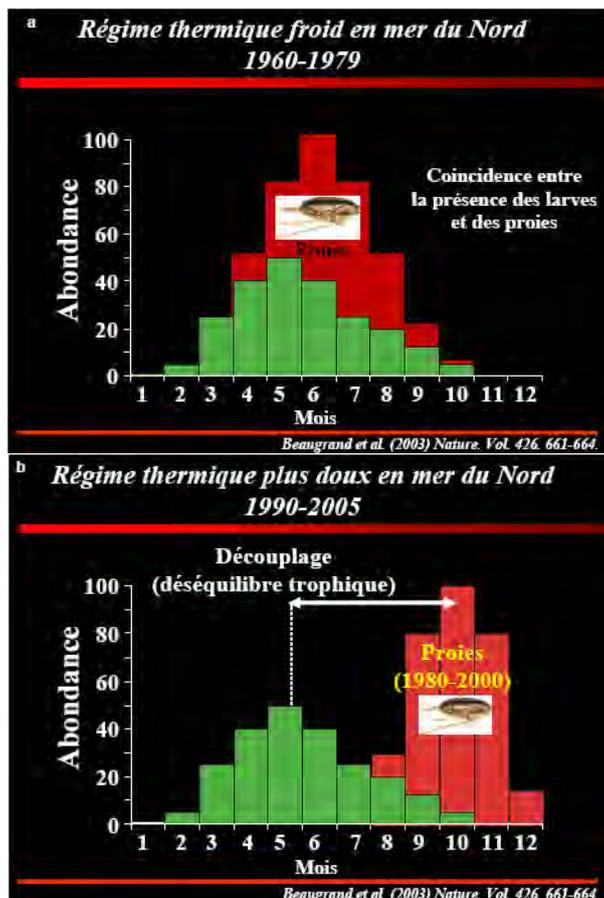


Figure 109 : Evolution mensuelle moyenne de l'abondance des copépodes et des larves de cabillaud en mer du Nord, entre un régime thermique froid en 1960-1979 (gauche) et un régime thermique plus doux en 1990-2005 (droite). Dans les conditions thermiques normales, l'évolution temporelle des larves de morue et des copépodes-proies coïncide (« match »). En régime thermique plus doux, l'aire de répartition habituelle des copépodes-proies habituelle est dérivée vers le nord ; sur les aires de reproduction des larves de morue, se développent d'autres copépodes mais avec un cycle temporel décalé (« mismatch ») et des qualités nutritives différentes (Beaugrand *et al.*, 2003).

Beaugrand et Kirby (2010) ont appuyé cette hypothèse en montrant que l'abondance du plancton était fortement corrélée à la variance observée des stocks de cabillaud ; cette influence s'effectuant principalement pendant la phase larvaire du cabillaud (Fig. 110). Ils ont aussi noté que l'un des facteurs déterminants une forte abondance en cabillaud était la présence d'au moins 50 % de *C. finmarchicus* dans la biomasse planctonique totale. Cette espèce ayant une valeur énergétique importante, sa disparition en mer du Nord (Helaoüet *et al.*, 2011) a donc un impact sur l'abondance du cabillaud dans cette région. Des études sur les contenus stomacaux des larves de cabillaud permettraient de confirmer cette hypothèse.

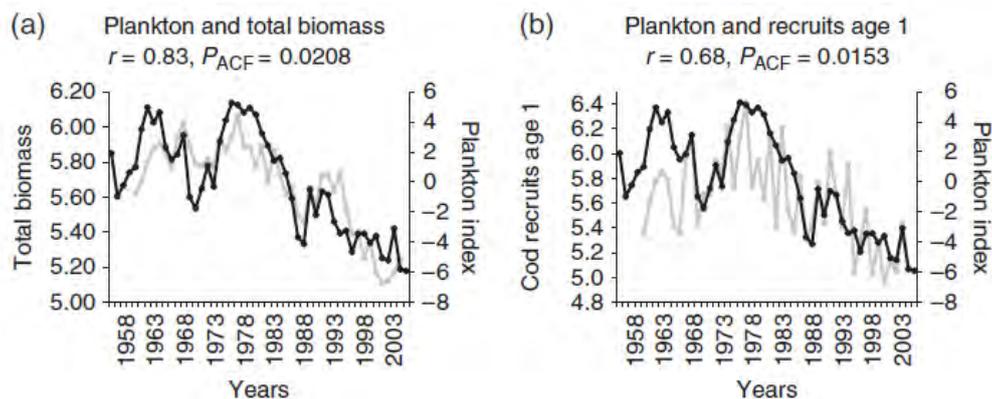


Figure 110 : Relations entre les fluctuations du plancton (1958-2007 ; en noir), la biomasse totale (a) du cabillaud (1963-2007 ; en gris) et son recrutement à l'âge 1 (b) (Beaugrand et Kirby, 2010).

Ces processus, ainsi que les modifications de production primaire et son influence sur la production biologique de l'ensemble de la chaîne alimentaire (Chassot *et al.*, 2010) vont affecter l'exploitation halieutique. **Les conséquences écosystémiques du réchauffement global et leurs répercussions sur les activités de pêche restent toutefois peu évidentes à caractériser à ce jour** (Sherman, 2009). Si certaines tendances paraissent se dessiner (par ex. diminution de la production halieutique dans les zones tropicales ; FAO, 2009), la situation des ressources vivantes marines exploitées par la pêche et des activités qui s'y rapportent restent entachées d'incertitudes très fortes (Overland *et al.*, 2010), *a fortiori* au niveau local. Ces incertitudes sont notamment liées au caractère brusque de l'évolution des écosystèmes (Gros, 2011), qui peuvent présenter des changements de régime rapides en réponse à une pression (changement climatique ou autre effet) après des périodes de stabilité apparente (Rijnsdorp *et al.*, 2010).

Une fois encore, au niveau des peuplements et des écosystèmes, il faut souligner les interactions entre les effets du réchauffement climatique et ceux de l'exploitation halieutique. Ainsi, l'évolution de la disponibilité en proies pour les larves de poissons, en lien au réchauffement, a des effets plus marqués sur des populations dont la saison de ponte est réduite du fait d'une biomasse féconde constituée uniquement de jeunes femelles. Par ailleurs, l'exploitation réduit la structure de la chaîne alimentaire au sein des écosystèmes marins, les grands prédateurs faisant l'objet d'un ciblage préférentiel qui réduit leur biomasse et peut engendrer par effet cascade une augmentation de leurs proies (Pauly *et al.*, 1998). La diminution de grands prédateurs à vie longue se traduit alors par un accroissement de la proportion d'espèces plus petites, situées plus bas dans la chaîne alimentaire. Cette pression vient exacerber les effets du réchauffement du fait de deux processus majeurs : ce remplacement d'espèces va dans le même sens que l'effet direct d'un accroissement des températures et la sensibilité de ces petites espèces au réchauffement est plus forte. Les effets conjugués du changement climatique et de la surexploitation pourraient conduire à des évolutions brusques des écosystèmes, avec des conséquences majeures sur les ressources vivantes et leur exploitation. De ce fait, comme cela a pu être observé dans certains écosystèmes marins (Benguela, mer Noire), la conjonction d'une forte pression d'exploitation et du réchauffement pourrait conduire à une réduction des espèces benthodémersales au profit des petits pélagiques, voire à un basculement vers des écosystèmes dominés par les méduses (Gros, 2011).

Considérant l'effet des changements climatiques sur les peuplements ichtyologiques et l'exploitation halieutique, **l'ensemble des résultats obtenus renforce l'idée qu'un certain nombre d'espèces de poissons a migré vers le nord au cours des 20-40 dernières années, entraînant une modification de leur abondance ainsi que de l'exploitation de ces ressources. Ces résultats restent toutefois basés sur des séries de données de durée trop courte pour pouvoir attribuer ce déplacement uniquement au changement climatique.** Le climat, par son effet indirect (augmentation de la température de l'eau) sur le plancton peut exercer un impact sur les stocks de

poissons (exemple du cabillaud), ce qui peut compliquer la gestion des espèces. Par ailleurs, le déplacement des espèces vers le nord et l'arrivée de nouvelles espèces en provenance du sud peuvent modifier les interactions entre espèces (compétition, prédation) et la structure des peuplements ichtyologiques. Toutefois, les espèces de poissons subissent d'autres contraintes anthropiques telles que la surpêche, mais aussi la contamination ou l'enrichissement de l'eau et la dégradation des habitats. **Ces pressions interagissent avec le changement climatique et en amplifient les effets ; il est de ce fait difficile de déconvoluer leur influence sur les changements observés, d'autant que ces changements peuvent être rapides et conduire à un changement d'état des écosystèmes.**

➤ Prolifération d'espèces invasives

Le changement climatique n'est qu'une facette du changement global. Comme montré dans la section précédente avec le cas des ressources halieutiques, la réponse des organismes marins aux changements climatiques dépend des autres changements induits par les activités humaines au premier rang desquels se trouvent la pêche et les introductions d'espèces exotiques. Carlton (2000) liste ainsi une série d'attendus relatifs aux invasions biologiques en relation avec les différentes composantes du changement global dont le changement climatique. Les effets les plus importants sont notamment (1) l'augmentation d'abondance et l'accroissement des aires colonisées par des espèces non-indigènes introduites depuis des régions plus chaudes, en effet, ces espèces peuvent bénéficier des conditions thermiques qui leur sont plus favorables car plus proches des conditions rencontrées dans leur aire d'origine, (2) de façon réciproque, on peut également s'attendre à la disparition ou la diminution d'abondance des espèces non-indigènes introduites depuis des régions froides et (3) l'hybridation entre des espèces introduites et locales conduisant à la disparition des espèces locales (phénomènes dit de « gene swamping »). Dans les sections précédentes, nous avons pu voir l'importance des effets de la température sur la reproduction et le développement larvaire. Or en milieu marin, la phase larvaire joue un rôle clé dans l'installation des espèces non-indigènes au travers de la « pression en propagule¹⁵² » (Simberloff, 2009 ; Occhipinti-Ambrogi, 2007).

Une étude menée sur les côtes américaines par Stachowicz *et al.* (2002) a par exemple montré qu'une augmentation de température favorisait un recrutement plus précoce d'ascidies introduites en comparaison d'espèces locales. Ce recrutement plus précoce limite la disponibilité en habitat pour les recrues des autres espèces. Parmi les espèces étudiées par ces auteurs, aux USA, se trouve l'ascidie coloniale *Botrylloides violaceus* également introduite en Europe et qui fait l'objet de suivis et d'étude dans le cadre du projet Européen Marinexus¹⁵³. Dans le cadre de ce programme, un focus particulier est fait sur les habitats artificiels (ex. marinas, ports, digues, brise-lames) qui sont des lieux privilégiés d'installation d'espèces non-indigènes car point d'entrée de ces espèces par le trafic maritime (ballast et fouling) et peuvent agir comme des relais pour la colonisation de sites naturels. Conduisant à une dégradation ou une disparition des habitats naturels, ces habitats artificiels peuvent, en synergie avec les changements climatiques, diminuer les capacités compétitives des espèces locales, favorisant l'installation de nouvelles espèces. Dans le cadre du projet Marinexus, il a été ainsi montré la large prévalence de l'espèce *B. violaceus* ainsi que d'une espèce d'ascidie solitaire originaire de l'hémisphère Sud (J. Bishop et F. Viard, données non publiées). Quant aux risques de dilution des génomes d'espèces natives du fait de leur hybridation avec des espèces introduites, on peut citer le cas de l'introduction de l'espèce *Ciona intestinalis* type A, originaire du Pacifique et largement introduite en Méditerranée, plus récemment introduite en

¹⁵² La pression en propagule définit le nombre et la fréquence des événements d'introduction et le nombre de propagules introduites à chacun des événements d'introduction ; les propagules étant tout ou partie d'un organisme capable de réaliser le cycle de vie d'un organisme, par exemple les larves des invertébrés marins ou les spores des algues.

¹⁵³ <http://www.marinexus.org/>

Bretagne et qui s'hybride avec l'espèce locale *Ciona intestinalis* type B, espèce des eaux tempérées froides (Nydam et Harrison, 2010).

Un autre exemple démontrant l'interaction entre activités humaines et changement climatique peut être cité avec le cas du mollusque *Cyclope neritea*. Ce gastéropode originaire de Méditerranée est apparu sur les côtes atlantiques françaises (bassin d'Arcachon) dans les années 1970, puis s'est propagé vers le nord dans les années 1980-90, jusqu'en baie de Morlaix en 2000 (Bachelet *et al.*, 2004). Cette expansion rapide s'est toujours faite dans des zones à proximité de parcs conchylicoles. L'utilisation de séquences mitochondriales (gène COI ; Simon-Bouhet *et al.*, 2006) et de marqueurs microsatellites (Simon-Bouhet, 2006) a permis de mettre en relation cette expansion vers le nord avec des effets d'introduction (échanges de naissains d'huîtres entre bassins conchylicoles) depuis différentes sources (génétiquement différenciées) localisées dans l'aire naturelle de cette espèce (Fig. 111). Par ailleurs, **les patrons de diversité génétique nucléaire observés le long des côtes françaises suggèrent que l'augmentation des températures dans le golfe de Gascogne a favorisé l'installation durable de populations denses et stables dans les 20 dernières années** (Simon-Bouhet *et al.*, 2006).

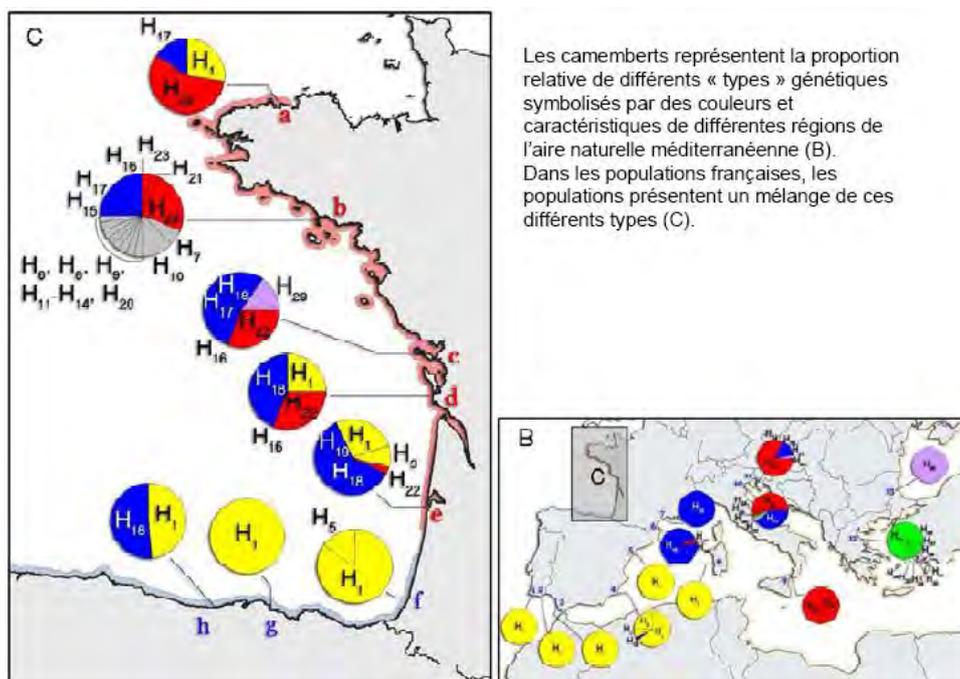


Figure 111 : Evolution de l'expansion vers le nord du gastéropode d'origine méditerranéenne *C. neritea*, le long des côtes atlantiques (A ; du bassin d'Arcachon à la baie de Morlaix) et méditerranéennes (B) de 1970 à 2000 (Simon-Bouhet *et al.*, 2006).

Dans le cas de *C. neritea*, l'introduction a été accidentelle mais en relation avec des introductions volontaires à des fins aquacoles. En effet, le gastéropode a certainement été introduit depuis la Méditerranée avec des naissains de l'huître Pacifique (*Crassostrea gigas*) ou des transferts de palourdes japonaises (*Ruditapes philippinarum*). L'huître creuse du Pacifique, *C. gigas*, est elle-même un très bon exemple des relations entre invasions biologiques et changements globaux. Cette huître a été introduite massivement en France dans les années 1970, à des fins de mise en culture afin de pallier l'effondrement des stocks de deux autres espèces, l'huître portugaise (*Crassostrea angulata*, espèce introduite en Europe au 17^{ème} siècle) et l'huître plate (*Ostrea edulis*) espèce indigène mais qui a subi les effets de sur-exploitation et de maladies. Aujourd'hui, *C. gigas* constitue 70 % de la conchyliculture française (Programme PROGIG). *C. gigas* a d'abord été introduite massivement dans l'étang de Thau et sur la façade atlantique, où seuls deux bassins ostréicoles du sud de la Loire (Marennes-Oléron et bassin d'Arcachon) ont vu l'espèce s'implanter durablement et

établir des populations naturelles (Fig. 112). Les conditions environnementales favorables ont conduit au développement de populations spontanées dans le milieu naturel, qui ont proliféré jusqu'en Bretagne et en Normandie, d'abord très ponctuellement à l'occasion de périodes estivales favorables dans quelques sites très abrités : fonds de baies (ex. rade de Brest), rias (Aven, Belon), estuaires (Trieux). Puis le phénomène s'est accéléré et actuellement on peut observer une véritable invasion de cette espèce de la façade Atlantique aux Pays-Bas, en passant par la Manche.

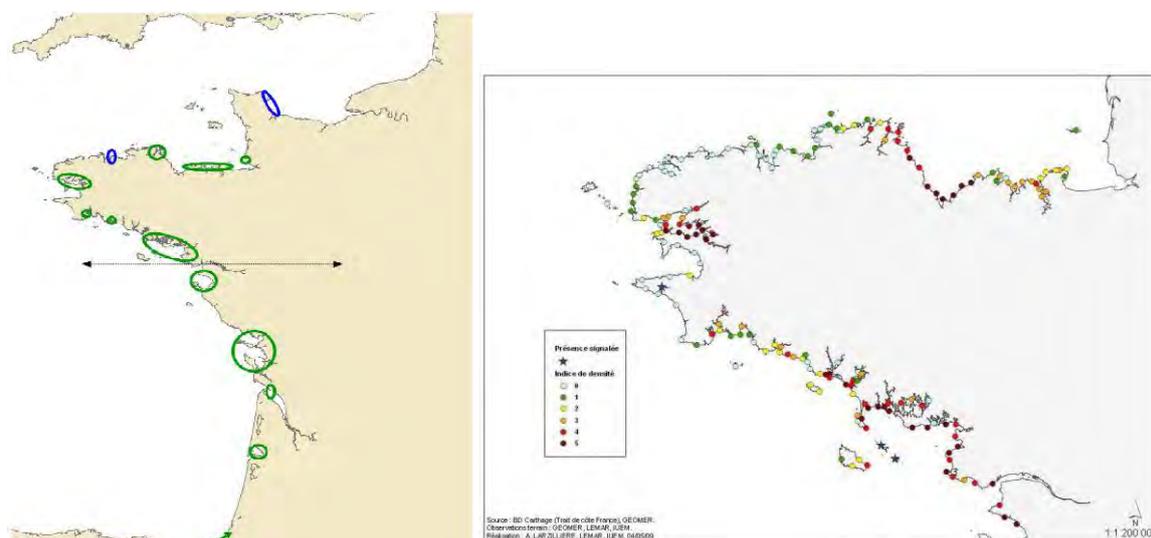


Figure 112 : **Gauche** : Premiers sites colonisés par l'huître creuse en France en 1990. **Droite** : Bilan de la colonisation des côtes bretonnes par *C. gigas*. L'indice de densité 1 correspond à une densité $<0,01 \text{ ind.m}^{-2}$, 2 entre 0,01 et 1 ind.m^{-2} , 3 entre 1 et 10 ind.m^{-2} , 4 entre 10 et 100 ind.m^{-2} et 5 entre 100 et $1\,000 \text{ ind.m}^{-2}$ (Lejart, 2009).

Chez cette espèce, une température seuil minimale est nécessaire au déclenchement estival de l'émission des gamètes et les températures hivernales et de début de printemps conditionnent l'initiation de la gamétogenèse et la cinétique du développement gonadique. Si les conditions favorables à sa prolifération (hiver plus doux et été plus chaud) ne sont pas encore réunies chaque année en rade de Brest et plus largement en Bretagne, **le réchauffement des eaux côtières, depuis le début des années 1990, a accéléré le phénomène de prolifération de *C. gigas* sur les côtes bretonnes.** Seule la région des Abers dans le Finistère nord, où les températures estivales de l'eau dépassent rarement les $17,5^{\circ}\text{C}$ est encore indemne de cette invasion. Ce lien entre réchauffement et prolifération mis en évidence par le projet PROGIG est soutenue par ailleurs par Cognie *et al.* (2006) et Diederich (2005) pour expliquer la prolifération de *C. gigas* en Baie de Bourgneuf et en mer de Wadden, respectivement (Lejart, 2009).

Les études documentant les effets du changement climatique sur la réussite des installations d'espèces non-indigènes et sur leur éventuelle prolifération sont donc encore rares du fait (1) de la récente prise en compte de l'importance des processus d'introductions et d'invasions biologiques, (2) du manque de données d'observations sur le long-terme et (3) des difficultés à trouver une expertise taxonomique suffisante pour identifier de nouvelles espèces introduites puis les suivre. Néanmoins, la littérature fait état de quelques exemples avérés des effets des changements climatiques sur la distribution et ou le fonctionnement des populations d'espèces introduites avec des interactions potentiellement nombreuses (ex. compétition trophique ou spatiale) avec des espèces locales.

➤ **Résumé sur les impacts du réchauffement climatique sur la biodiversité marine et côtière**

Les données actuelles montrent que le réchauffement en cours des eaux environnantes du massif armoricain serait impliqué dans la modification des aires de répartition et les cycles de

reproduction de plusieurs espèces de copépodes, invertébrés et poissons. Parmi les impacts majeurs concernant le fonctionnement des écosystèmes marins, il peut être retenu (Tréguer *et al.*, 2009) :

- des projections de baisse et de changement qualitatif de la production primaire en Atlantique, avec des répercussions sur l'ensemble de la chaîne alimentaire ;
- des décalages des périodes de reproduction et des modifications de l'intensité des événements de recrutement chez divers invertébrés et poissons ;
- un découplage phénologique dans les interactions spécifiques conduisant à des effets dits de « mismatch » entre proies et prédateurs (ex. copépode-cabillaud) ;
- l'installation facilitée et/ou la prolifération d'espèces introduites accidentellement ou délibérément à des fins d'exploitation (gastéropode, huître creuse) ;
- la modification des aires de distribution pour une des raisons citées ci-dessus ou pour des effets plus globaux de non adaptation et/ou non tolérance des espèces à des changements de température ;
- des conséquences sur la composition spécifique de la production halieutique, sans qu'une tendance ne se dégage sur le niveau global de cette production malgré les inquiétudes liées à la diminution possible de la production primaire ;
- des changements dans la dynamique des écosystèmes et la biodiversité marine en lien à l'effet conjugué des changements de production biologique et de composition spécifique des peuplements et des communautés du fait de la dérive polaire de la distribution des espèces. Ces évolutions liées au changement climatique peuvent de plus être exacerbées au sein d'écosystèmes rendus moins résilients par d'autres pressions anthropiques, liées notamment à l'exploitation des ressources vivantes, à l'aquaculture ou à l'artificialisation des milieux côtiers.

Toutefois, certaines séries de mesure sont de trop courte durée pour pouvoir attribuer la modification observée à une ou des causes précises, notamment au changement climatique seul. Ces impacts peuvent en effet résulter de synergie et interagir avec d'autres pressions anthropiques (surpêche, urbanisation du littoral, dégradation des habitats, etc.) conduisant à une déstabilisation du fonctionnement des écosystèmes côtiers. **Il est difficile de dissocier dans les changements observés, la part de variabilité attribuable à la variabilité naturelle, au changement climatique ou aux forçages anthropiques. Poursuivre l'acquisition de longues séries chronologiques est ainsi une nécessité.**

6.3.2. Impacts de l' « acidification » des océans

En plus d'un réchauffement des eaux, le domaine pélagique devra composer avec l'impact du CO₂ anthropique influençant directement le pH des océans. Alors que les conséquences chimiques de l' « acidification » des océans sont prévisibles, **les réponses potentielles des organismes et des écosystèmes au phénomène sont encore hautement spéculatives, en raison de données limitées et parfois contradictoires** (Gattuso *et al.*, 2009). L' « acidification » des océans a le potentiel d'affecter le processus de calcification de certains organismes (coccolithophoridés, foraminifères, coraux, algues benthiques, mollusques, etc.). Bien qu'il s'agisse d'un stade critique pour le maintien des populations, peu d'études se sont intéressées au stade larvaire qui est potentiellement plus sensible aux modifications du milieu (Tréguer *et al.*, 2009).

Les données enregistrées par le CPR dans l'Atlantique Nord ont permis de réaliser un atlas de calcification du plancton (McQuatters-Gollop *et al.*, 2010), afin d'observer les effets de l' « acidification » des océans sur différents organismes à structure calcaire.

Concernant les coccolithophoridés qui sont un groupe de phytoplancton qui contribue à la production mondiale et aux flux verticaux de CaCO₃ dans les océans (pompe à carbone inorganique),

les données du CPR montrent une augmentation de la fréquence d'occurrence¹⁵⁴ des coccolithophoridés dans la plupart des régions de l'Atlantique Nord depuis le milieu des années 1990 (Fig. 113 ; McQuatters-Gollop *et al.*, 2010). Toutefois, des études précédentes montrent des résultats contradictoires, indiquant que des recherches supplémentaires sont nécessaires sur les effets de l'« acidification » des océans sur les coccolithophoridés.

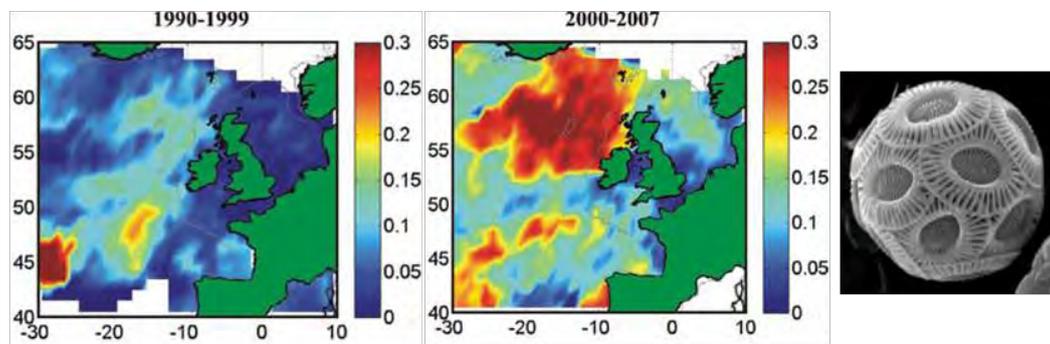


Figure 113 : Cartes de distribution des coccolithophoridés (fréquence d'occurrence en %) selon des échantillons CPR pour les périodes 1990-1999 et 2000-2005 (McQuatters-Gollop *et al.*, 2010).

Par ailleurs, une augmentation de nombreuses espèces de phytoplancton (diatomées, dinoflagellés, etc.) a aussi été projetée, lesquelles peuvent compenser par des mécanismes complexes la faible affinité de la RubisCO¹⁵⁵ pour le CO₂. La réponse du phytoplancton à l'augmentation du CO₂ (diminution du pH) dépend dans une large mesure des mécanismes physiologiques de l'absorption et l'assimilation du carbone inorganique intracellulaire (Riebesell et Tortell, dans Gattuso et Hansson, 2011). Par conséquent l'impact direct d'un accroissement de la concentration en CO₂ sur la photosynthèse des diatomées marines serait vraisemblablement limité, voire favoriserait la productivité de certaines espèces telles que les cyanobactéries fixatrices d'azote (par exemple le genre *Trichodesmium sp.*; Martin *et al.*, 2008 ; Gros, 2011). De plus, l'« acidification » des océans pourrait altérer la composition et succession des espèces phytoplanctoniques à l'origine des réseaux trophiques (ex. bloom en Atlantique Nord) (Riebesell et Tortell, dans Gattuso et Hansson, 2011).

Beaucoup moins d'informations sont disponibles sur les effets de l'« acidification » des océans sur le zooplancton, la majorité des études portent sur les foraminifères et les ptéropodes qui produisent des coquilles calcaires (Riebesell et Tortell, dans Gattuso et Hansson, 2011).

Les foraminifères sont des protistes qui utilisent le CaCO₃ pour produire leur coquille. Avec les coccolithophoridés, ils sont responsables de plus de 90 % de la production pélagique de carbonates, soit environ 50 % de la production globale. Il est supposé que le taux de calcification des foraminifères diminuera avec l'« acidification » des océans. Cependant les mesures du CPR montrent une variabilité régionale de leur occurrence. La mer du Nord a connu une augmentation de la fréquence des foraminifères depuis les années 1980, tandis que les régions océaniques ont connu des périodes de hausse et de baisse entre 1960 et 2007 (Fig. 114 ; McQuatters-Gollop *et al.*, 2010). De plus, N. Keul (Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Allemagne) ayant exposé une espèce de foraminifère (*Ammoniac tepida*) à de l'eau de mer ± acide et en faisant varier les concentrations en ions carbonates, a observé le maintien de la croissance de cette espèce, sans pouvoir toutefois l'expliquer (Source : Balcerak, 2011 cité dans EPOCA¹⁵⁶).

¹⁵⁴ La fréquence d'occurrence correspond à la fréquence d'apparition de l'espèce.

¹⁵⁵ Ribulose-1,5-biphosphate carboxylase/oxygénase, enzyme permettant la fixation du CO₂ dans la biomasse végétale, à l'origine des processus de photosynthèse.

¹⁵⁶ <http://oceanacidification.wordpress.com/2011/12/26/some-species-tolerate-ocean-acidification/#more-8203>

Par ailleurs, la formation de leur coquille et la croissance sont influencées par la température. Ainsi un réchauffement des eaux pourrait conduire à une augmentation des taux de croissance des foraminifères.

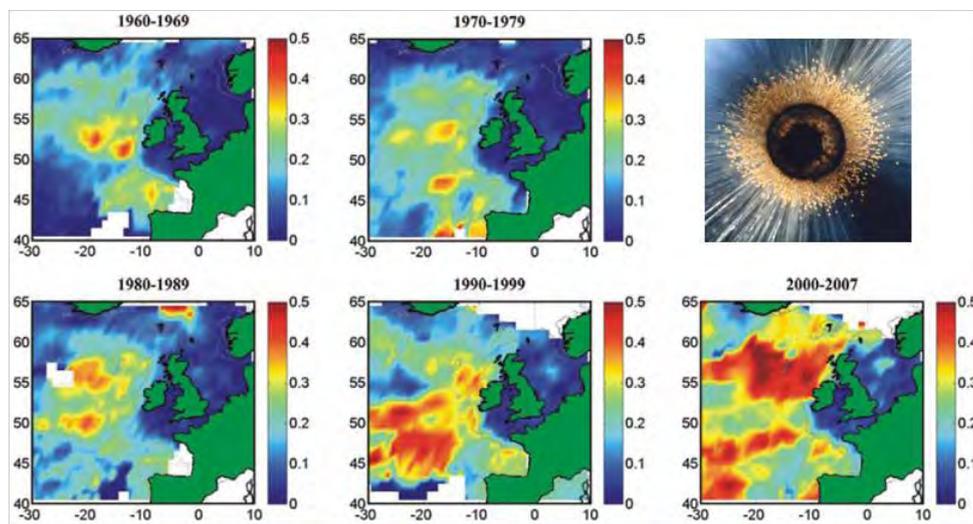


Figure 114 : Cartes de distribution des foraminifères (fréquence d'occurrence en %) selon des échantillons CPR entre 1960 et 2007 (McQuatters-Gollop *et al.*, 2010).

Les larves de ptéropodes (Thecosomata et Gymnosomata) forment des coquilles fragiles (qui disparaissent à l'âge adulte pour *Clione limacina*). Ces coquilles sont produites à partir d'aragonite soluble, ce qui les rend particulièrement vulnérables à l'« acidification » des océans (Martin *et al.*, 2008). Les changements d'abondance des ptéropodes pourraient avoir des répercussions sur les réseaux trophiques et affecter la pompe biologique, en particulier dans les régions polaires. Selon les mesures du CPR pour l'abondance de *C. limacina*, et de *Limacina spp.*, **aucune tendance claire n'est observable dans l'Atlantique Nord, mais certains changements régionaux ont quand même eu lieu depuis 1960 : baisse en mer du Nord de *Clione limacina* (Fig. 115), baisse de *Limacina spp.* à l'ouest de l'Irlande** (Fig. 116 ; McQuatters-Gollop *et al.*, 2010).

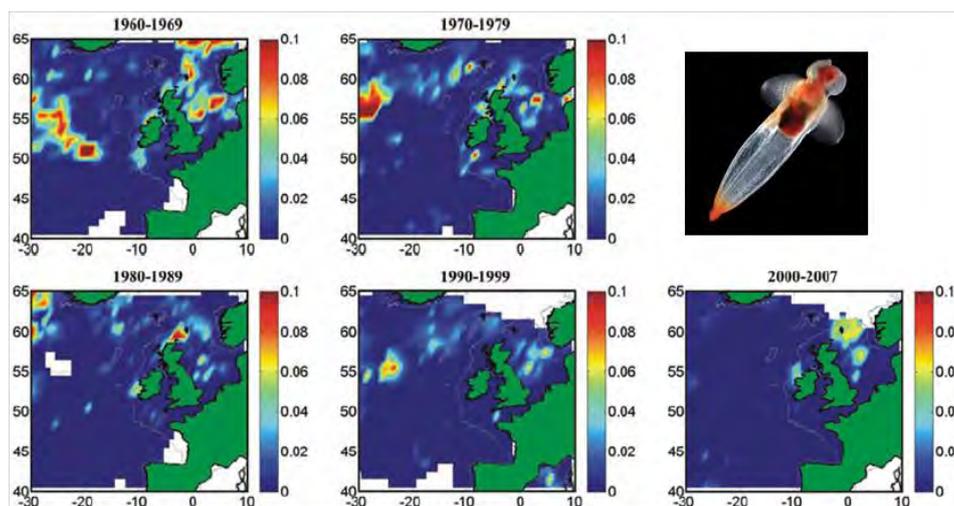


Figure 115 : Cartes de distribution de *Clione limacina* (fréquence d'occurrence en %) selon des échantillons CPR entre 1960 et 2007 (McQuatters-Gollop *et al.*, 2010).

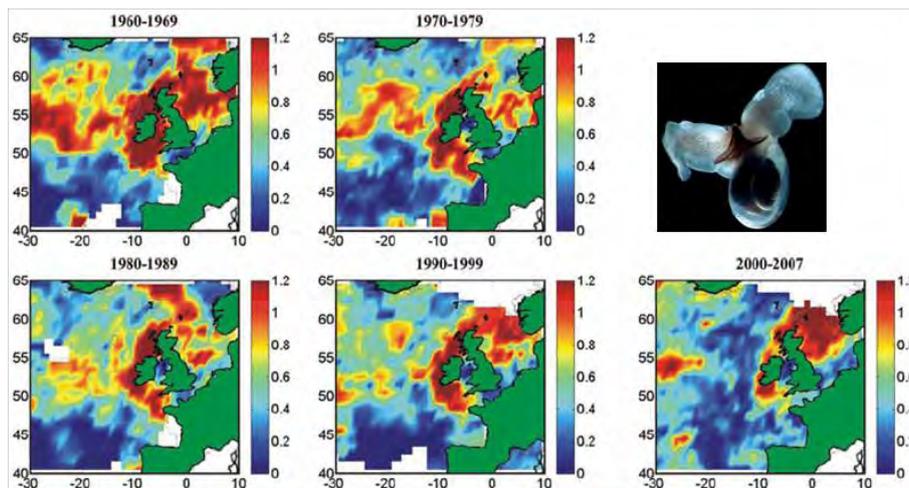


Figure 116 : Cartes de distribution de *Limacina* spp. (fréquence d'occurrence en %) selon des échantillons CPR entre 1960 et 2007 (McQuatters-Gollop *et al.*, 2010).

Les larves d'échinodermes utilisent une forme particulièrement soluble de CaCO_3 pour former leurs squelettes, ce qui peut les rendre particulièrement sensibles à l'« acidification » des océans. Des travaux d'expérimentation ont montré la dissolution des coquilles de certains oursins ainsi qu'une réduction du taux de fertilisation et de la taille larvaire pour une diminution du pH (Fabry *et al.*, 2008). D'autres travaux ont montré une augmentation du taux de calcification des ophiures pour des niveaux plus élevés de CO_2 , au détriment de leur masse musculaire. **Les mesures du CPR montrent une augmentation importante de larves d'échinoderme dans la mer du Nord depuis 1960, avec une plus forte variabilité dans les régions océaniques de l'Atlantique Nord** (Fig. 117 ; McQuatters-Gollop *et al.*, 2010).

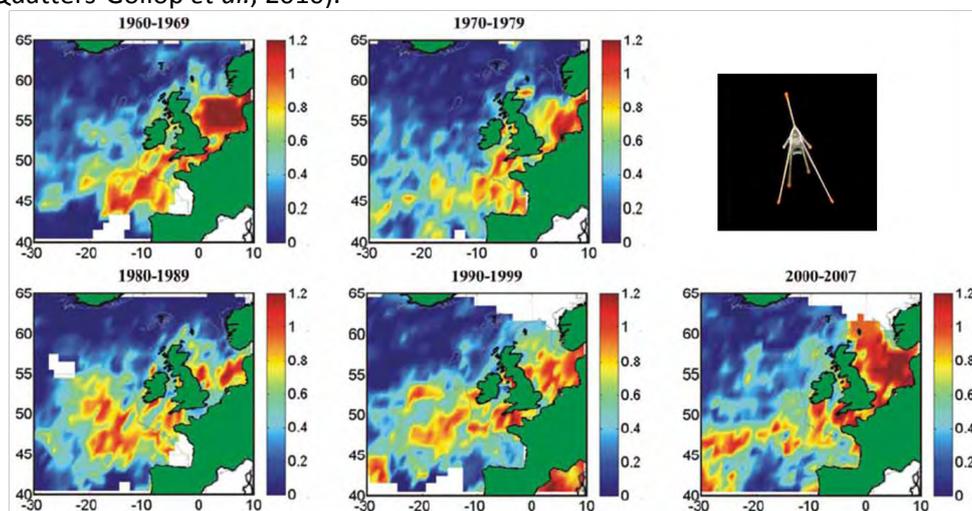


Figure 117 : Cartes de distribution des larves d'échinoderme (fréquence d'occurrence en %) selon des échantillons CPR entre 1960 et 2007 (McQuatters-Gollop *et al.*, 2010).

Des travaux ont indiqué qu'à mesure que le pH diminue, le taux de croissance de la coquille dure des bivalves pourrait diminuer. Une récente étude suggère que d'ici 2100, la calcification pourrait être réduite de 25 % pour les moules et de 10 % pour les huîtres (source : Gazeau *et al.*, 2007 cités dans McQuatters-Gollop *et al.*, 2010). Par ailleurs, les données du CPR montrent que l'abondance des larves de bivalve a diminué depuis les années 1990 en mer du Nord (Fig. 118). L'« acidification » des océans pourrait affecter leur métabolisme, leur réponse immunitaire ou encore leur taux de croissance (Fabry *et al.*, 2008).

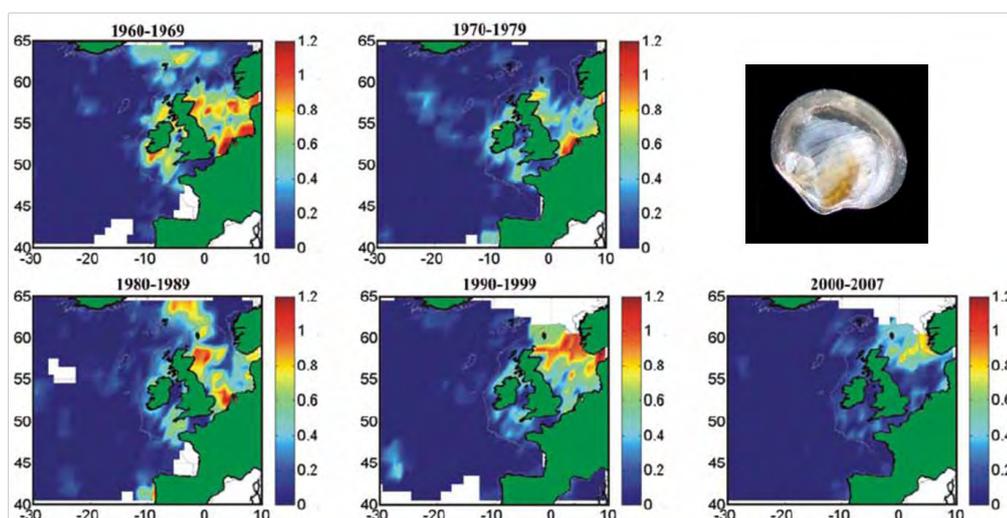


Figure 118 : Cartes de distribution des larves de bivalve (fréquence d'occurrence en %) selon des échantillons CPR entre 1960 et 2007 (McQuatters-Gollop *et al.*, 2010).

Ainsi, les mollusques bivalves seraient très sensibles au CO₂ principalement car ce sont des organismes sessiles¹⁵⁷ et hypométaboliques¹⁵⁸ (Gros, 2011). Cependant, ces hypothèses doivent être considérées avec prudence, des études récentes montrant que certaines espèces sont capables de maintenir, voire augmenter leur calcification nette à des pH plus faibles. Par exemple, une étude réalisée par Rodolfo-Metalpa *et al.* (2011) a montré que certains coraux et mollusques exposés à des teneurs élevées en CO₂ dans des événements volcaniques en Méditerranée (identiques aux teneurs projetées pour les 300 prochaines années), étaient capables de se calcifier et croître à des taux plus rapides que la normale. Cela étant possible grâce aux tissus et couches externes organiques qui jouent un rôle majeur en limitant la dissolution des coquilles et des squelettes. Leur tolérance à l'« acidification » dépendrait donc de leur capacité à maintenir cette protection à des niveaux accrus de CO₂. Toutefois, les effets néfastes du réchauffement climatique sont exacerbés lorsque des températures élevées coïncident avec l'« acidification » des océans.

Les conséquences de l'« acidification » des océans sur les activités conchylicoles restent donc à ce jour, très incertaines.

Andersson *et al.*, dans Gattuso et Hansson (2011) ont listé les impacts observés de l'« acidification » des océans sur un grand nombre d'organismes benthiques marins (algues, bivalves, coraux, crustacés, échinodermes, etc.) exposés à des taux élevés de CO₂, dans différents contextes expérimentaux et durées d'exposition. Ces résultats tendent vers un remplacement des espèces benthiques calcifiantes par des espèces benthiques non-calcifiantes, moins vulnérables à l'« acidification ».

Par ailleurs, l'« acidification » croissante des océans peut compromettre la survie chez les jeunes poissons. Une étude (à paraître dans *Nature Climate Change*) menée par la biologiste A. Frommel (Institut Leibniz des sciences marines de Kiel, Allemagne), a observé sur une espèce de grande importance commerciale, le cabillaud (*Gadus morhua*), une détérioration de certains organes (pancréas, foie, reins) lorsque les larves se développaient dans une eau plus acide, telle que projetée pour les 200 prochaines années. Ceci a aussi été observé dans une autre expérience (à paraître dans *Nature Climate Change*) conduite par le biologiste C. Gobler (Université Stony Brooks à New York, États-Unis) qui a testé des niveaux d'acidité beaucoup plus proches des niveaux actuels et prévus

¹⁵⁷ Un organisme sessile vit fixé sur le substrat.

¹⁵⁸ A métabolisme lent.

pour être atteints au milieu et à la fin du 21^{ème} siècle (Source : S. Foucart, 2011, article dans *Le Monde*, cité dans EPOCA¹⁵⁹).

Les organismes à métabolisme élevé (poissons les plus évolués, mollusques céphalopodes tels que les calmars, nombreuses espèces de crabes) sont au contraire moins sensibles, car ils disposent d'efficaces mécanismes de transport d'oxygène et de CO₂ pour soutenir leur locomotion active (Gros, 2011). Toutefois, chez les céphalopodes, c'est la capacité d'approvisionnement en oxygène qui sera la plus affectée. Par exemple, dans le cas de l'encornet géant du Pacifique (*D. gigas*), la gamme de profondeur habitable de l'espèce peut être réduite par : (i) l'« acidification » et le réchauffement des eaux de surface créant une limite naturelle qui empêcherait ces calmars de pénétrer dans des eaux peu profondes et (ii) l'expansion croissante des zones hypoxiques en eaux profondes liée au réchauffement (Pörtner *et al.*, dans Gattuso et Hansson, 2011).

En conclusion, on peut supposer qu'à terme, l'« acidification » de l'océan représente un risque majeur pour les ressources marines biologiques exploitables de Bretagne, même si actuellement, les observations restent incertaines concernant l'évolution de l'abondance des espèces calcifiantes. Des synthèses récentes réalisées à l'échelle planétaire montrent que des processus d'adaptation et de résilience des populations ne permettent pas à ce jour de dégager de tendance claire sur les conséquences de l'« acidification », ni sur la production primaire ni sur les invertébrés calcifiants (Melzner *et al.*, 2009 ; Hendricks *et al.*, 2010). La variabilité de réponse entre les différents groupes animaux apparaît notamment très forte, y compris au sein des espèces calcifiantes (Kroeker *et al.*, 2010). Alors que des effets avérés ont été mis en évidence sur les zones récifales (Vezina et Hoegh-Guldberg, 2008) et que les conséquences pourraient être importantes aux hautes latitudes (Fabry *et al.*, 2008), ce constat incertain (Schiermeier, 2011 ; Denman *et al.*, 2011) est particulièrement approprié pour les secteurs tempérés, et notamment les côtes bretonnes (Gros, 2011).

6.3.3. Impacts des événements climatiques extrêmes

A l'inverse du réchauffement et de l'« acidification » des océans, peu d'études se sont intéressées aux impacts des événements climatiques extrêmes (inondations, sécheresses) sur le fonctionnement des communautés marines et estuariennes. De plus, les connaissances sur l'évolution des précipitations sont incertaines. Toutefois, il est supposé que le changement climatique devrait augmenter l'ampleur des extrêmes de précipitations, à l'origine de sécheresses et d'inondations. C'est pourquoi, il peut être intéressant de regarder leurs impacts actuels afin de pouvoir imaginer les futurs impacts potentiels.

Dans les estuaires, l'enrichissement lié aux apports terrigènes des bassins versants stimule la production primaire qui alimente de nombreuses communautés d'invertébrés benthiques, eux-mêmes exploités par les poissons et notamment les juvéniles de nombreuses espèces marines dont l'extension spatiale est plus étendue à l'âge adulte (Le Pape *et al.*, 2003a). Cette étroite relation entre le réseau trophique, la densité des juvéniles et l'ampleur des apports en eau douce a été montrée, notamment dans le golfe du Lion (Salen-Picard *et al.*, 2002b) et en baie de Vilaine (Le Pape *et al.*, 2003c ; Kostecki *et al.*, 2010).

➤ Réponse des organismes côtiers aux crues des rivières

¹⁵⁹ <http://oceanacidification.wordpress.com/2011/12/20/lacidification-des-océans-menace-les-poissons-in-french/#more-8123>

Les événements épisodiques tels que des épisodes de pluie extrêmes et les inondations peuvent entraîner le dépôt de sédiments fins et un apport important en nutriments, avec des impacts sur la structure et la fonction des communautés.

L'étude de Cardoso *et al.* (2008) avait pour objectif d'évaluer l'impact des inondations extrêmes sur la dynamique des communautés macrobenthiques dans un estuaire au Portugal et d'évaluer les interactions possibles entre les changements climatiques et un autre facteur de stress anthropique, l'eutrophisation. Pendant la période d'étude, ils ont observé une augmentation des crues extrêmes en hiver, corrélée à une détérioration de l'habitat, une dégradation de la qualité de l'eau et une augmentation de la turbidité par l'eutrophisation. L'intensification des inondations a eu des effets significatifs sur la structure et le fonctionnement des communautés macrobenthiques, entraînant une baisse de la biomasse totale, de la richesse spécifique et une diminution des suspensivores (Fig. 119 ; surtout *Scrobicularia plana* et *Ceratsoderma edule*, des espèces économiquement importantes). Vuorinen *et al.* (1998) ont aussi observé une importante diminution de copépodes en mer Baltique, liée à la dilution de l'eau de mer causée par une augmentation des précipitations et du ruissellement d'eaux douces mais aussi par un manque d'afflux salés de l'Atlantique.

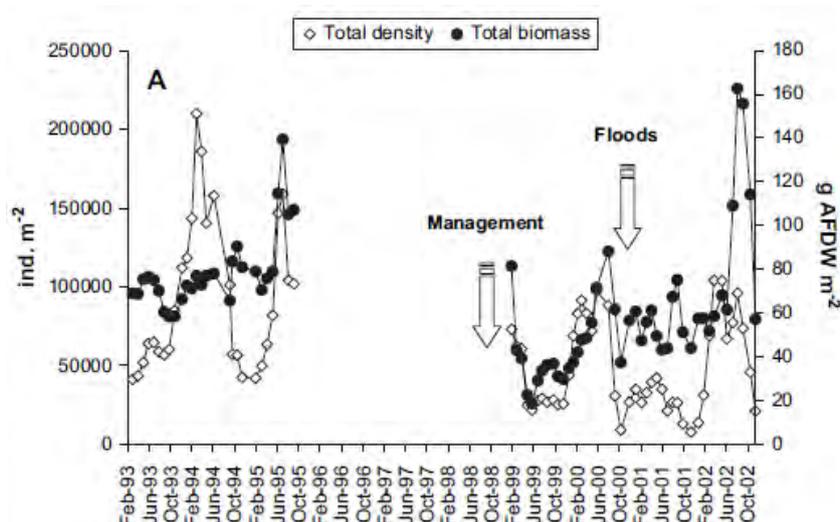


Figure 119 : Variations de la densité et de la biomasse totale de la communauté macrobenthique totale entre 1993 et 2002 (Cardoso *et al.*, 2008).

L'étude de Cardoso *et al.* (2008), montre que l'interaction entre deux facteurs de stress (eutrophisation et inondations) a eu un impact négatif sur la résilience¹⁶⁰ de la macrofaune. En effet, l'impact négatif de l'eutrophisation a contribué à une baisse de la résistance des espèces lors de la crue qui a suivi. Ainsi, même la mise en place du plan de gestion censé restaurer le système n'a pas pu empêcher le déclin des communautés macrobenthiques lors des inondations extrêmes qui ont suivi, entraînant d'importants impacts socio-économiques.

➤ Réponse des organismes aux périodes de sécheresse

Le manque de précipitations entraîne des phénomènes de sécheresse, qui ont une influence sur l'hydrologie, la salinité et les températures en zones côtières. Lors de sécheresses, l'écoulement fluvial est faible et le gradient de salinité augmente.

Le zooplancton est très sensible aux variations climatiques et aux événements extrêmes, et ses modifications pourraient perturber les interactions écologiques entre les niveaux trophiques. L'étude réalisée par Marques *et al.* (2007) visait à évaluer l'impact d'une sécheresse extrême (faible

¹⁶⁰ Représente la capacité de récupération d'une espèce après un stress, pour atteindre son état initial.

débit) sur la communauté de zooplancton de l'estuaire du Mondego au Portugal. Ils ont ainsi comparé l'évolution de cette communauté entre une année tempérée considérée comme normale et une période de sécheresse importante. Les résultats montrent une augmentation progressive de la densité et de la richesse en espèces lors de la sécheresse, en raison d'une intrusion prolongée d'eau de mer à l'intérieur de l'estuaire, favorable à l'arrivée de nouvelles espèces de zooplancton. La composition de la communauté zooplanctonique a également été modifiée, puisque les espèces d'eau douce ont été remplacées par des espèces plus estuariennes.

Ces changements dans la communauté zooplanctonique sont aussi liés à la disponibilité en nourriture (phytoplancton) et vont influencer les interactions entre les niveaux trophiques. Dans le même estuaire et pendant la même période de sécheresse, *Martinho et al.* (2006 ; 2007) ont observé les impacts sur les communautés piscicoles et ont ainsi noté un épuisement des espèces d'eau douce, une réduction des espèces estuariennes et l'arrivée d'espèces marines pendant la période la plus sèche. Par ailleurs, la pression de prédation sur les espèces estuariennes pourrait avoir augmenté en raison de la plus grande abondance d'espèces marines, particulièrement à l'entrée de l'estuaire. Ces résultats corroborent ceux obtenus par *Marques et al.* (2007) concernant l'évolution de la communauté zooplanctonique durant une période sèche et montrent que les précipitations sont un des paramètres importants expliquant la variabilité des communautés, de part les nombreux effets qu'elles induisent sur le milieu.

Cependant, seulement trois années de données ont été analysées dans ces études. Afin d'évaluer si des conditions climatiques extrêmes plus fréquentes et/ou plus intenses ont des impacts à long terme sur la biodiversité des estuaires, il faudrait des données plus longues et plus largement réparties géographiquement. En effet, on ne connaît pas le degré d'adaptabilité du cycle de vie des espèces en réponse à ce type d'événement et les espèces de poissons sont caractérisées par un long temps de réponse à une perturbation. Toutefois, l'effet positif de l'enrichissement d'origine terrigène sur le renouvellement des nombreuses espèces de poissons qui utilisent les secteurs côtiers et estuariens comme zone de nourricerie, notamment en Bretagne (*Le Pape et al.*, 2003abc ; *Kostecki et al.*, 2010), est avéré. La diminution de cet enrichissement du fait de l'effet combiné de sécheresses estivales et de captages accrus d'eaux douces en domaine continental aurait donc des conséquences néfastes sur ces ressources marines et leur exploitation. Ces conséquences sont d'ores et déjà visibles ailleurs, sur l'ensemble de la chaîne trophique (*Wetz et al.*, 2010) ainsi que sur des pêcheries (anchois dans le golfe de Cadix, *Ruiz et al.*, 2009 ; bar en Australie, *Gowns et James*, 2005 ; pêches côtières en Afrique du Sud, *Lamberth et al.*, 2009).

➤ Impacts potentiels de l'élévation du niveau de la mer

Les modifications des côtes provoquées par l'élévation du niveau des mers auront des implications pour la faune et les habitats. A l'inverse du réchauffement global et de l'« acidification » des océans, peu d'études ont été faites sur l'impact de l'érosion sur les organismes marins. En utilisant des exemples tirés de la littérature sur les réponses d'organismes intertidaux à l'érosion de côtes rocheuses, *Jackson et McIlvenny* (2011) ont décrit les conséquences écologiques possibles du retrait de ces côtes en Grande-Bretagne. Supposant que le changement climatique amplifiera le phénomène d'érosion par l'élévation du niveau de la mer, on peut considérer ces exemples comme des hypothèses d'impacts futurs :

- l'accentuation de la pente des plages par l'érosion peut diminuer l'abondance de la méiofaune et de la macrofaune. Par exemple, jusqu'à 22,8 % de la biomasse macrobenthique des sédiments estuariens de l'estuaire du Humber (UK) peut être perdue avec une hausse du niveau des mers de 0,30 m (*Fujii et Raffaelli*, 2008) ;

- les changements de densité et d'abondance des espèces vont modifier les types et l'intensité des interactions entre organismes avec des conséquences pour le réseau trophique. Par

ailleurs, l'érosion du littoral peut aussi provoquer de nouvelles interactions écologiques entre espèces devenues spatialement plus proches ;

- dans certains habitats, la montée des eaux peut augmenter la disponibilité de substrats verticaux, favorisant le développement de certaines espèces (algues, gastéropodes ; Vaselli *et al.*, 2008) ;

- l'érosion des côtes peut avoir un effet sur la prédation entre espèces. Par exemple, les patelles (*Patella vulgata*) ont un rythme d'activité différent selon l'orientation du substrat. Sur substrats verticaux, les patelles ont tendance à devenir plus actives la nuit et à être ainsi moins vulnérables à leur principal prédateur qui est actif le jour. Une augmentation de leurs habitats sur substrats verticaux favoriserait une meilleure survie des patelles.

6.4. Conclusion concernant les impacts du changement climatique et de l'« acidification » des océans sur la biodiversité marine et côtière

La biodiversité subit les effets de multiples pressions parmi lesquelles se trouve le changement climatique. Certains impacts du changement climatique sont actuellement observés dans les eaux proches du massif armoricain, mais d'autres restent encore incertains. Cette incertitude est principalement liée :

- au manque de longues séries d'observations permettant de distinguer la variabilité naturelle de celle induite par le changement climatique ;
- au manque de connaissances concernant la vitesse et l'ampleur de l'évolution des paramètres physiques et chimiques du milieu marin ;
- au manque de connaissances sur la capacité d'adaptation des espèces aux modifications environnementales induites par le changement climatique ;
- à toutes les rétroactions climatiques difficilement prévisibles ;
- aux futures actions d'adaptations de l'homme.

Par leur évolution et leur adaptation, les espèces ont répondu dans le passé aux changements environnementaux naturels. La question est à présent de savoir si ces espèces pourront faire face aux changements actuels qui se produisent sur des échelles de temps plus courtes. Leur capacité d'adaptation à une perturbation va notamment dépendre (Tréguer *et al.*, 2009) :

- des temps de génération (plus ils sont courts, plus l'adaptation sera rapide ; c'est notamment le cas des organismes planctoniques) ;
- de la plasticité phénotypique, c'est-à-dire de l'ajustement phénotypique aux conditions environnementales (elle est particulièrement importante pour les organismes occupant des environnements hétérogènes et à fort taux de dispersion, cf. Hollander, 2008) ;
- de la variation génétique pré-existante dans les populations, variation sur laquelle peut agir la sélection naturelle favorisant des individus plus performants dans les nouvelles conditions climatiques ;
- des cycles de vie : chez les espèces à fort taux de dispersion, par exemple présentant des larves pélagiques à longue durée de vie, l'arrivée récurrente de migrants en provenance de zones « froides » peut empêcher l'adaptation locale à des températures plus élevées, (cf. Sanford *et al.* 2006 pour le crabe *Uca pugnax* dans l'Atlantique Nord Ouest) ;
- d'interactions avec d'autres sources de pressions anthropiques qui affectent la capacité des populations marines à s'adapter aux changements climatiques (pertes de diversité liées à l'exploitation, à la dégradation des habitats) et qui peuvent interagir sur les effets attendus (effets de

l'enrichissement en sels nutritifs et des captages d'eau douce sur l'évolution de la production primaire).

S'il n'est à ce jour pas possible de dresser un bilan quantitatif des changements attendus, il n'en reste pas moins certain que des changements qualitatifs vont affecter les communautés marines en Bretagne. Le remplacement d'espèces à affinités sub-boréales par des espèces subtropicales est en cours et va se poursuivre, affectant l'ensemble de la chaîne alimentaire, des producteurs primaires aux prédateurs, ainsi que l'exploitation des ressources vivantes.

➤ Programmes de recherche finalisés et en cours

Le projet européen EU-FP7 RECLAIM¹⁶¹ (*Resolving Climatic Impacts on fish stocks*) porté par l'Institute for Marine Resources & Ecosystem Studies (IMARES, Pays-Bas) entre 2007 et 2009, avec la participation de l'Ifremer, a étudié l'impact du changement climatique sur la productivité et la répartition des populations de poissons et crustacés. Il a aussi passé en revue les forces et les faiblesses des connaissances scientifiques actuelles dans le but de détecter les lacunes et de fournir des conseils judicieux, des recommandations et des hypothèses de travail pour de futures recherches. Sur le site du projet, sont proposés les documents finaux qui peuvent apporter des informations supplémentaires puisque les zones d'études choisies comprennent les eaux proches de la péninsule bretonne (Manche, mer du Nord, golfe de Gascogne, etc.).

Le projet européen EU-FP7 MEECE¹⁶² (*Marine Ecosystem Evolution in a Changing Environment*) en cours de 2008 à 2012 et porté par le Plymouth Marine Laboratory (PML, UK) avec la participation française des UMR LEMAR et LPO et du Commissariat à l'Energie Atomique (CEA), étudie les réponses potentielles des écosystèmes marins face au changement climatique. Dans ce cadre, ils se proposent de réaliser des projections multi-modèles au 21^{ème} siècle, de l'évolution des communautés planctoniques et benthiques dans les mers de l'Atlantique Nord-Est.

Le projet ANR EVOLFISH¹⁶³ (Effets du réchauffement global et de la contamination locale sur les réponses évolutives de deux poissons côtiers) en cours de 2009 à 2012 et porté par le LEMAR se propose d'étudier les réponses possibles et la résilience de deux espèces de poissons plats, la sole et le flet, face aux impacts du réchauffement climatique et de la pollution, du Portugal (estuaire du Mondego) aux côtes françaises (baie de Vilaine et baie de Seine). Pour cela, ils utilisent une approche physiologique, génétique et écotoxicologique.

Le projet européen EU-FP7 ECKNOWS¹⁶⁴ (*Effective use of ecosystem and biological knowledge in fisheries*) en cours de 2010-2013 et porté l'Université d'Helsinki avec la participation française de l'UMR ESE, étudie par la méthodologie bayésienne, les processus biologiques des stocks halieutiques. Dans ce cadre, la thèse de F. Massiot-Granier (2010-2013) analyse la réponse des populations de saumon atlantique au changement global, par une approche démographique par modélisation hiérarchique.

Le projet européen EU-FP7 Euro-BASIN¹⁶⁵ (*Basin-scale Analysis, Synthesis & Integration*) en cours de 2010 à 2014 est porté par le NERC (Danemark) avec la participation française du LEMAR, de l'Université Pierre et Marie Curie (UPMC) et du Collecte Localisation Satellites (CLS). Il cherche à

¹⁶¹ <http://www.climateandfish.eu/default.asp?ZNT=S0T1O13>

¹⁶² <http://www.meece.eu/>

¹⁶³ <http://www-iuem.univ-brest.fr/UMR6539/recherche/equipe-4/projets/evolfish>

¹⁶⁴ <http://www.ecoknows.eu/>

¹⁶⁵ <http://www.euro-basin.eu/>

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

comprendre et prédire la structure des populations et la dynamique du plancton et des espèces de poissons dans l'Atlantique Nord Est, face à la variabilité climatique et au changement climatique.

Le projet européen EU-FP7 VECTORS¹⁶⁶ en cours de 2011 à 2015 est coordonné par le PML (UK) avec la participation française de l'Ifremer. Ce projet vise à améliorer les connaissances sur les différentes pressions actuelles et potentielles et les vecteurs de changement l'environnement, qu'ils agissent directement (transport maritime vecteur d'espèces invasives, le changement climatique et l'acidification des océans, l'exploitation intensive des ressources halieutiques, etc.) ou indirectement (atténuation des émissions de GES, la pression démographique qui accroît l'habitat côtier, le tourisme et les activités récréatives, etc.) sur les écosystèmes marins.

On peut noter que peu de ces programmes sont relatifs à l'environnement côtier. En effet, actuellement, les recherches sur l'impact du changement climatique au niveau des zones côtières sont beaucoup moins développées que celles concernant les grands espaces marins, ce qui constitue un manque important pour notre région. Ce type d'études nécessiterait donc d'être mieux intégré dans les futurs programmes de recherche.

¹⁶⁶ <http://www.marine-vectors.eu/>

CONCLUSION DE LA 2^{EME} PARTIE : LES EFFETS ET IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE EN BRETAGNE

L'évolution des ressources naturelles bretonnes jusqu'à aujourd'hui est difficile à mettre en relation avec le changement climatique. Concernant les sols et la ressource en eau, les différentes projections réalisées mettent en avant leur fragilité face au changement climatique et aux événements extrêmes. L'agriculture en Bretagne ne devrait pas subir de dégradation ni d'amélioration générale des possibilités de culture, mais il faut plutôt s'attendre à ce qu'un ensemble de facteurs, dont elles dépendent, soit modifié (confort hydrique et thermique, « jours disponibles », etc.). On peut aussi s'attendre à une augmentation de la faisabilité de cultures actuellement peu présentes en Bretagne, telles que des espèces originaires du Sud, ceci étant aussi prédit pour les vignes et les forêts. Toutefois, concernant le siècle à venir, les peuplements forestiers bretons ne devraient pas subir de forts dommages ou modifications. A l'échelle de la région, ce sont surtout les faibles réserves d'eau dans les sols bretons et l'accroissement des sécheresses déjà observé qui sont à surveiller pour les ressources continentales.

Etant donné l'importance du milieu marin pour la Bretagne, de part son vaste linéaire côtier et les nombreuses activités économiques en lien avec la mer, il était important d'en étudier les impacts liés au changement climatique. Même si à l'échelle de l'Atlantique Nord, des modifications à long terme ont été observées (réchauffement des eaux de surface, acidification des océans), il n'existe actuellement pas de preuve scientifique liant la variabilité observée au niveau des milieux côtiers et marins bretons au changement climatique en cours, mis à part l'élévation du niveau de la mer observée depuis 300 ans à Brest. Aucune relation n'est constatée entre l'intensité et la fréquence des risques d'érosion et de submersion et le changement climatique ; toutefois, l'hypothèse est émise que ces risques puissent s'aggraver dans le futur. Concernant la biodiversité marine, s'il n'est à ce jour pas possible de dresser un bilan quantitatif des changements attendus, il n'en reste pas moins certain que des changements qualitatifs vont affecter les communautés marines en Bretagne. Le remplacement d'espèces à affinités sub-boréales par des espèces subtropicales est en cours et va se poursuivre, affectant l'ensemble de la chaîne alimentaire, des producteurs primaires aux prédateurs, ainsi que l'exploitation des ressources vivantes.

Ces changements observés et projetés sur les ressources naturelles continentales et marines sont entourés d'incertitudes et nécessiteraient : (1) de plus longues séries d'observations qui permettraient d'effacer la variabilité naturelle, (2) plus de connaissances concernant la vitesse et l'ampleur du changement climatique à venir, les capacités d'adaptation des espèces, les rétroactions climatiques difficilement prévisibles, et enfin les futures actions d'adaptations de l'Homme.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

Agreste, 2011. Statistique agricole annuelle 2010, n° 25. DRAAF Bretagne.

Amigues J.P., Debaeke P., Itier B., Lemaire G., Seguin B., Tardieu F., et A. Thomas (ed.), 2006. Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA, France, 72 p.

Gis Sol. 2011. L'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 188 p.

Ayata S.-D., 2010. Importance relative des facteurs hydroclimatiques et des traits d'histoire de vie sur la dispersion larvaire et la connectivité à différentes échelles spatiales (Manche, Golfe Gascogne). Thèse de doctorat, Océanographie Biologique, Université Pierre et Marie Curie.

Ayata S.-D., Lazure P., and E. Thiébaud, 2010. How does the connectivity between populations mediate range limits of marine invertebrates? A case study of larval dispersal between the Bay of Biscay and the English Channel (North-East Atlantic). *Progress in Oceanography*, 87(1-4): 18-36.

B

Bachelet G., Simon-Bouhet B., Desclaux C., Garcia-Meunier P., Mairesse G., de Montaudouin X., Raigné H., Randriambao K., Sauriau P.-G., and F. Viard, 2004. Invasion of the eastern Bay of Biscay by the nassariid gastropod *Cyclope neritea*: origin and effects on resident fauna. *Marine Ecological Progress Series*, 276: 147-159.

Badeau V., Dupouey J.-L., et M.L. Desprez-Loustau, 2004. Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières françaises et distribution géographique et impact des champignons pathogènes forestiers - Simulation des effets d'un changement climatique, volets D1 et D2 dans Rapport final du projet CARBOFOR : Séquestration de Carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles. Coordinateur : D. Lousteau, 137pp.

Barnett T.P., Pierce D.W., AchutaRao K.M., Gleckler P.J., Santer B.D., Gregory J.M., and W.M. Washington, 2005. Penetration of Human-Induced Warming into the World's Oceans. *Science*, 309 (5732): 284-287.

Baudron A. R., Needle C. L., and C. T. Marshall, 2011. Implications of a warming North Sea for the growth of haddock *Melanogrammus aeglefinus*. *Journal of Fish Biology*, 78: 1874–1889.

Beaugrand G., Reid P.C., Ibanez F., Lindley J.A., and M. Edwards, 2002. Reorganization of North Atlantic marine copepod biodiversity and climate. *Science*, 296: 1692-1694.

Beaugrand G., Brander K.M., Lindley J.A., Souissi S., and P.C. Reid, 2003. Plankton effect on cod recruitment in the North Sea. *Nature*, 426: 661–664.

Beaugrand G., and R.R. Kirby, 2010. Climate, plankton and cod. *Global Change Biology*, 16: 1268–1280.

Behrenfeld M.J., Siegel R.T., O'Malley D.A., McClain C.R., Sarmiento J.L., Feldman G.C., Milligan A.J., Falkowski P.G., Letelier R.M., and E.S. Boss, 2006. Climate-Driven Trends in Contemporary Ocean Productivity. *Nature*, 444: 752-55.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Beltrando G. et E. Briche, 2010. « Changement climatique et viticulture en Champagne : du constat actuel aux prévisions du modèle ARPEGE-Climat sur l'évolution des températures pour le 21^{ème} siècle », *EchoGéo*, n° 14.

Beltrando G., 2011. Changements climatiques simulés pour le 20^{ème} siècle et évolutions possibles de la forêt française (métropole). Actes du 24^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie « Climat montagnard et risques », Rovereto, Italie.

Blanchard F., and F. Vandermeirsch, 2005. Warming and exponential abundance increase of the subtropical fish *Capros aper* in the Bay of Biscay (1973-2002). *Comptes Rendus Biologies*, 328(5): 505-9.

Boé J., 2007. Changement global et cycle hydrologique : Une étude de régionalisation sur la France. Thèse de doctorat, Physique du climat, Université Paul Sabatier, Toulouse III.

Bonnardot V., Cautenet S., Planchon O., et H. Quénol, 2011. Simulations climatiques méso-échelle : comparaison de données observées et simulées en vue d'une intégration de scénarios de changement climatique. Actes du 24^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie « Climat montagnard et risques », Rovereto, Italie.

Bonnefoy C., Quénol H., Barbeau G., et M. Madelin, 2010a. Analyse climatique à l'échelle des coteaux du Layon. VIII International Terroir Congress.

Bonnefoy C., Quénol H., Planchon O. et G. Barbeau, 2010. « Températures et indices bioclimatiques dans le vignoble du Val de Loire dans un contexte de changement climatique », *EchoGéo*, n° 14.

Bonnot-Courtois C., 2010. Le littoral des Côtes d'Armor entre érosion marine et continentale. Recueil des actes des journées « Impacts du changement climatique sur les risques côtiers », Orléans, France.

Boyce D.G., Lewis M.R., and B. Worm, 2010. Reply on global phytoplankton trends. *Nature*, 472: E8-E9.

Braconnot P., Dufresne J.-L., Salas y Méliá D., et L. Terray, 2007. Analyse et modélisation du changement climatique. 2^{ème} édition du Livre blanc Escrime.

Brander K.M., 2005. Cod Recruitment Is Strongly Affected by Climate When Stock Biomass Is Low. *ICES Journal of Marine Science*, 62(3): 339-43.

Bretagne Environnement / Edition 2011. L'environnement en Bretagne, cartes et chiffres clés.

Briche E., Bonnefoy C., Cautenet S., Bonnardot V., Beltrando G., Madelin M., et H. Quénol, 2011. Simulations du modèle à méso-échelle RAMS à résolution fine lors des épisodes extrêmes de 2003 : application à deux vignobles du nord de la France. Actes du 24^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie « Climat montagnard et risques », Rovereto, Italie.

Brierley A.S., and M.J. Kingsford, 2009. Impacts of climate change on marine organisms and ecosystems. *Current Biology*, 19: 602-614.

Briggs J.C., 1974. Marine zoogeography. New York, McGraw-Hill Book, 475 p.

Brisson, N. et F. Levraut, 2010. Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le Livre Vert du projet CLIMATOR (2007-2010), ADEME, 336 pp.

Buessler K.O., Doney S.C., Karl D.M., Boyd P.W., Caldeira K., Chai F., Coale K.H., de Baar H.J.W., Falkowski P.G., Johnson K.S., Lampitt R.S., Michaels A.F., Naqvi S.W.A., Smetacek V., Takeda S., and A.J. Watson, 2008. Ocean iron fertilization-Moving forward in a sea of uncertainty. *Science*, 319: 162.

C

Cabioch L., Gentil F., Glaçon R., et C. Retière, 1977. Le macrobenthos des fonds meubles de la Manche, distribution générale et écologie. In *Biology of benthic organisms* (Keegan B., O'Ceidigh P., Boaden P., éditeurs). Pergamon Press, pp. 115-128.

Cantat O., Le Gouée P., Bensaïd A., et E. Savouret, 2010. Une méthode originale de spatialisation d'échelle fine des bilans hydriques. Actes du 23^{ième} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie « Risques et changements climatiques », Rennes, France.

Cardoso P.G., Raffaelli D., Lillebø A.I., Verdelhos T., and M.A. Pardal, 2008. The impact of extreme flooding events and anthropogenic stressors on the macrobenthic communities' dynamics. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76: 553-565.

Carlton J. T., 2000. Global change and biological invasions in the oceans. Invasive species in a changing world. Mooney H. A. and Hobbs R. J. Washington, USA, Island Press: 31-53.

CESR de Bretagne, 2009. Pouvoirs et démocratie en Bretagne, à l'épreuve du changement climatique, à l'horizon 2030. Rapport du Conseil économique et social de Bretagne.

CGDD, 2011. Commissariat Général du Développement Durable. Impacts à long terme du changement climatique sur le littoral métropolitain. Mission prospective.

Charles E., Idier D., Thiébot J., Le Cozannet G., Pedreros R., Arduin F., et S. Planton, 2010. Tendances et variabilité des caractéristiques des vagues dans le Golfe de Gascogne de 1958 à 2001. Recueil des actes des journées « Impacts du changement climatique sur les risques côtiers », Orléans, France.

Chassot E., Bonhommeau S., Mélin F., Watson R., Gascuel D., and O. Le Pape, 2010. World fish catch primary production constrains fisheries catches. *Ecology Letters*, 13: 495-505.

Chatry C., Le Gallou J.-Y., Le Quentrec M., Lafitte J.-J., Laurens D., et B. Creuchet, 2010. Rapport final de la mission interministérielle : Changement climatique et extension des zones sensibles aux feux de forêts.

Cheung W.W.L., Lam V.W.Y., Sarmiento J.L., Kearney K., Watson R., and D. Pauly, 2009. Projecting global marine biodiversity impacts under climate change scenarios. *Fish and Fisheries*, 10: 235-251.

Church J., and N. White, 2011. Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century, *Surveys in Geophysics*, 32: 1-18.

CLIMASTER. « Le climat change dans le grand ouest, évaluation, impact, perception ». Presses Universitaires de Rennes, à paraître.

Clus-Auby C., Paskoff R. et F. Verger, 2004. Impact du changement climatique sur le patrimoine du conservatoire du littoral, scénarios d'érosion et de submersion à l'horizon 2100.

Cognie B., Haure J. and L. Barille, 2006. Spatial distribution in a temperate coastal ecosystem of the wild stock of the farmed oyster *Crassostrea gigas* (Thunberg). *Aquaculture*, 259: 249-259.

Costa S., 1995. Vulnérabilité des villes côtières de Haute-Normandie et de Picardie face élévation du niveau marin Hommes et Terres du Nord. *Les milieux littoraux*, 1-2 : 48-57.

Costa S., 1998. Élévation du niveau marin et stratégies de réponse : le cas du littoral normano-picard. *Annales de Géographie*, 107(600): 179-200.

CRPF, 2005. Schéma régional de gestion sylvicole de Bretagne « Pour une gestion durable des forêts privées régionales ».

Curry R., Dickson B., and I. Yashayaev, 2003. A change in the freshwater balance of the Atlantic Ocean over the past four decades. *Nature*, 426: 826-829.

D

- Dandin, 2006. Evolution du climat et sécheresses. Congrès de la FNCCR, Bordeaux, France.
- Dauvin J.-C., 1999. Mise à jour de la liste des espèces d'Amphipodes (*Crustacea : Peracarida*) présents en Manche. *Cahiers de Biologie Marine*, 40: 165-183.
- Décamps *et al.*, 2010. Evénements climatiques extrêmes, Réduire les vulnérabilités des systèmes écologiques et sociaux, Éditions EDP Sciences, Rapport sur la Science et la Technologie, Collection RST, n° 29, 240 p.
- Denman K., Christian J.R., Steiner N., Portner H.O., and Y. Nojiri, 2011. Potential Impacts of Future Ocean Acidification on Marine Ecosystems and Fisheries: Current Knowledge and Recommendations for Future Research. *ICES Journal of Marine Science*, 68(6): 1019-29.
- Déqué, 2004. Les scénarios climatiques de réchauffement. Projet IMFREX.
- Désaunay Y., Guérault D., Le Pape O., and J.C. Poulard, 2006. Changes in northern / southern flatfish species over 20 years in a coastal nursery area (bay of Vilaine) and on the whole continental shelf of the Bay of Biscay. *Scientia Marina*, 70S1 : 193-200.
- Diederich S., Nehls G., van Beusekom J.E.E., and K. Reise, 2005. Introduced Pacific oysters (*Crassostrea gigas*) in the northern Wadden Sea: invasion accelerated by warm summers? *Helgoland Marine Research*, 59: 97-106.
- Dieppois B., Durand A., Fournier M., Massei N., Rousseau D., e D. Sebag, 2011. Variabilités climatiques au Nord-Ouest de l'Europe et relations avec l'Atlantique Nord depuis la fin du 17^{ème} siècle. Actes du 24^{ième} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie « Climat montagnard et risques », Revoreto, Italie.
- Drinkwater D., 2005. The Response of Atlantic Cod to Future Climate Change. *ICES Journal of Marine Science*, 62(7): 1327-1338. 2005.
- Duarte C. M., 2007. Marine ecology warms up to theory. *Trends in Ecology & Evolution*, 22(7): 331-333.
- Dubreuil V., Lejeune C., et J. Mounier, 1996a. Changements climatiques régionaux dans la France de l'Ouest. Actes du Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Strasbourg, France.
- Dubreuil V., Huon F., et C. Lejeune, 1996b. Les précipitations intenses en Bretagne. *Norois*, n°170, pp. 395-406.
- Dubreuil V., 1997. La sécheresse dans la France de l'Ouest : une contrainte climatique trop souvent oubliée. *Sécheresse*, 1- 8 : 47-55.
- Dubreuil V., Mounier J., et C. Lejeune, 1998: L'accentuation récente du déficit estival dans la France océanique. Publications de l'Association Internationale de Climatologie, 11 : 151-157.
- Dubreuil V., 2005 : Un risque climatique à géographie variable : la sécheresse dans la France de l'ouest. Dans « Les risques climatiques », sous la direction de D.Lamarre, Belin-Sup, GDR RICLIM, 147-173.
- Dubreuil V., et O. Planchon, 2008. Y aura-t-il encore un climat breton ? *Bretagne(s)*, 10 : 36-41.
- Dubreuil V., et O. Planchon, 2009. Bilan d'un siècle d'observation des sécheresses et des types de circulations atmosphériques associées à Rennes. *Geographia Technica*, numéro spécial.
- Ducharne, F. Habets, M. Déqué, L. Evaux, A. Hachour, A. Lepaillier, T.Lepelletier, E. Martin, L. Oudin, C. Pagé, P. Ribstein, E. Sauquet, D. Thiéry, L. Terray, P. Viennot, J. Boé, M. Bourqui, O. Crespi, S. Gascoin and J. Rieu, 2009. Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme, Rapport final du projet RExHySS, Programme GICC, 62 pp.

Ducharne A., Sauquet E., Habets F., Déqué M., Gascoin S., Hachour A., Martin E., Oudin L., Pagé C., Terray L., Thiéry D., et P. Viennot, 2011. Évolution potentielle du régime des crues de la seine sous changement climatique.

Duchêne E., et C. Schneider, 2004. Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace. *Forest Meteorology*, 124 : 81-97.

Dulvy N.K., Rogers S.I., Jennings S., Vanessa S., Dye S.R., and H.R. Skjoldal, 2008. Climate change and deepening of the North Sea fish assemblage: a biotic indicator of warming seas. *Journal of Applied Ecology*, 45: 1029–1039.

Durand-Dastès F., 2004. « À propos des notions de type de temps et de type de circulation », *Norois*, 191 : 2.

E

Edwards M., and A.J. Richardson, 2004. Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch. *Nature*, 430(7002): 881-884.

Esnault, S., 2004. Etude chronologique des températures de la mer sur l'ouest de la France. Département Statistique et Traitement des Données de l'IUT Vannes. 104 pp.

F

Fabry V.J., Seibel B.A., Feely R.A., and J.C. Orr, 2008. Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes. *ICES Journal of Marine Science*, 65: 414-432.

FAO, 2009. Climate Change Implications for Fisheries and Aquaculture. Overview of Current Scientific Knowledge. *Fao fisheries and aquaculture technical paper*, 530: 221.

Feely R.A., Doney S.C., and S.R. Cooley, 2009. Ocean acidification: Present conditions and future changes in a high-CO₂ world. *Oceanography*, 22(4): 36–47.

Few R., Ahern M., Matthies F., et S. Kovats, 2004. Floods, Health and Climate Change: Global Flood Risk and Response. Tyndall Centre for Climate Change Research. Working paper 63.

Fischer G., Shah M., Tubiello F.N., et H. van Velhuizen, 2005. Socio-economic and climate change impacts on agriculture: an integrated assessment, 1990-2080. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Science*, 360 : 2067-2073.

Fujii T., and D. Raffaelli, 2008. Sea-level rise, expected environmental changes, and responses of intertidal benthic macrofauna in the Humber estuary. *UK. Marine Ecology Progress Series*, 371: 23-35.

G

Gattuso J.-P., Hansson L., and the EPOCA Consortium, 2009. European Project on Ocean Acidification (EPOCA): Objectives, products, and scientific highlights. *Oceanography*, 22(4): 190–201.

Gattuso J.-P., and Hansson L. (eds.), 2011. Ocean acidification. Oxford University Press, New York, 352pp

Genner M.J., Sims D.W., Southward A.J., Budd G.C., Masterson P., McHugh M., Rendle P., Southall E.J., Wearmouth V.J. and S.J. Hawkins, 2010a. Body size-dependent responses of a marine fish assemblage to climate change and fishing over a century-long scale. *Global Change Biology*, 16: 517–527.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Genner M.J., Halliday N.C., Simpson S.D., Southward A.J., Hawkins S.J., and D.W. Sims, 2010b. Temperature-driven phenological changes within a marine larval fish assemblage. *Journal of Plankton Research*, 32(5): 699-708.

GIEC, 2001 : Changements climatiques 2001: Rapport de synthèse. Résumé à l'intention des décideurs. Contribution des Groupes de travail I, II et III au troisième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Équipe de rédaction principale, Albritton *et al.*

GIEC, 2007. Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri R.K. et Reisinger A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse, ..., 103 pages.

Gros P., 2011. Ecosystèmes marins, chapitre 5 in: CCBio, Connaissances des impacts du changement climatique sur la biodiversité en France métropolitaine - synthèse de la bibliographie. Massu N. et Landmann G., coord., Ecofor, 179pp.

Gross L., 2009. Metabolism Predicts Ecological Response to Warming. *PLoS Biology*, 7(8).

Growns I., and M. James, 2005. Relationships Between River Flows and Recreational Catches of Australian Bass. *Journal of Fish Biology*, 66(2): 404-416.

H

Harley C.D.G., Randall Hughes A., Hultgren K.M., Miner B.G., Sorte C.J.B., Thornber C.S., Rodriguez L.F., Tomanek L., and S.L. Williams, 2006. The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecology Letters*, 9: 228–241.

Hawkins S.J., Southward A.J., and M.J. Genner, 2003. Detection of environmental change in a marine ecosystem evidence from the western English Channel. *The Science of The Total Environment*, 310: 245-256.

Hebert L., Kermadi S., et N. Jacob-Rousseau, 2011. Le réchauffement climatique : impacts sur la phénologie de la vigne et des vergers du sud de la France. Actes du 24^{ième} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie « Climat montagnard et risques », Revoreto, Italie.

Helaouët P., Beaugrand G., and P.C. Reid, 2011. Macrophysiology of *Calanus finmarchicus* in the North Atlantic Ocean. *Progress in Oceanography*, 91(3): 217-228.

Helmuth B., Mieszkowska N., Moore P., and S.J. Hawkins, 2006. Living on the Edge of Two Changing Worlds: Forecasting the Responses of Rocky Intertidal Ecosystems to Climate Change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 37: 373-404.

Hendricks I.E., Duarte C.M., and M. Alvarez, 2010. Vulnerability of Marine Biodiversity to Ocean Acidification: A Meta-Analysis. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 86: 157-64.

Hermant M., Lobry J., Poulard J.C., Désaunay Y., Bonhommeau S., and O. Le Pape, 2010. Impact of warming on abundance and occurrence of flatfish populations in the Bay of Biscay (France). *Journal of Sea Research*, 64: 45–53.

Hiscock K., Southward A., Tittley I., and S. Hawkins, 2004. Effects of changing temperature on benthic marine life in Britain and Ireland. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 14(4): 333-362.

Hoegh-Guldberg O., and J.F. Bruno, 2010. The Impact of Climate Change on the World's Marine Ecosystems. *Science*, 328: 1523-28.

Hollander J., 2008. Testing the grain-size model for the evolution of phenotypic plasticity. *Evolution*, 62: 1381-1389.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

I

ICES, 2006. Report of the Working Group on Fish Ecology. ICES CM 2006/G: 06.

IFEN, 2006. La lettre thématique mensuelle de l'Institut français de l'environnement. Territoires, n° 113.

J

Jackson A.C., and J. McIlvenny, 2011. Coastal squeeze on rocky shores in northern Scotland and some possible ecological impacts. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 400(1-2): 314-321.

Josse J., 2010, Influence du changement climatique sur les zones humides. INRA. Rapport interne (VR3 CLIMASTER).

Jouan D., 2003. Les indicateurs climatiques de grande échelle et la variabilité des tempêtes sur le territoire français. Publication de l'Association Internationale de Climatologie, Vol. 15.

Jouan D., 2005. Les trajectoires des dépressions dans l'Atlantique Nord d'après les données de réanalyse ERA 15: 1979-1993.

Jouzel, 2011. Scénarios climatiques : indices sur la France métropolitaine pour les modèles français ARPEGE-Climat et LMDz et quelques projections pour les DOM-COM.

K

King D. A., 2004. Climate Change Science: Adapt, Mitigate, or Ignore? *Science*, 303.

Kostecki C., Le Loc'h F., Roussel J.M., Desroy N., Huteau D., Riera P., Le Bris H., and O. Le Pape, 2010. Dynamics of an estuarine nursery ground: the spatio-temporal relationship between the river flow and the food web of the juvenile common sole (*Solea solea*, L.) as revealed by stable isotopes analysis. *Journal of Sea Research*, 64: 54-60.

Kroeker K.J., Kordas R.L., Crim R.N., and G.G. Singh., 2010. Meta-Analysis Reveals Negative Yet Variable Effects of Ocean Acidification on Marine Organisms. *Ecology Letters*, 13(11): 1419-36.

L

Lamberth S.J., Drapeau L., and G.M. Branch, 2009. The Effects of Altered Freshwater Inflows on Catch Rates of Non Estuarine Dependent Fish in Multispecies Nearshore Fisheries. *Estuarine Coastal Shelf Science*, 84: 527-38.

Lamy C., et V. Dubreuil, 2010. Impact des sécheresses en Bretagne sur le bilan hydrique : modélisation à partir du climat d'années passées. Actes du 23^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie « Risques et changements climatiques », Rennes, Italie.

Lamy C., et V. Dubreuil, 2011. Modélisation du bilan hydrique en Bretagne dans le contexte du changement climatique : cas du scénario A1B. Actes du 24^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie « Climat montagnard et risques », Revoreto, Italie.

Landmann G., Massu N., Badeau V., Frascaria Lacoste N., Fernandez J., et F. Gosselin, 2011. Les écosystèmes forestiers, chapitre 3.1 in : CCBio, Connaissances des impacts du changement climatique sur la biodiversité en France métropolitaine - synthèse de la bibliographie. Massu, N. et G. Landmann, coord., Ecofor, 179pp.

Le Gouée P., et D. Delahaye, 2008 : Modélisation et cartographie de l'aléa érosion des sols et des espaces de ruissellement dans le Calvados. Rapport d'étude, Conseil général du Calvados, Chambre d'agriculture du Calvados, DIREN de Basse-Normandie et AUP, 240p.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Le Gouée P., Delahaye D., Bermond M., Marie M., Douvinet J., et V. Viel, 2010. SCALES: a large-scale assessment model of soil erosion hazard in Basse-Normandie (northern-western France). *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(8): 887–901.

Le Gouée P., Cantat O., Bensaïd A., Savouret E., 2010. Evaluation et cartographie de la sécheresse des sols forestiers normands à l'horizon 2100 : des connaissances nouvelles pour une gestion durable des forêts. Actes, Festival de Géographie, FIG (VR1+VR2+VR3).

Lejart M., 2009. Etude du processus invasif de *Crassostrea gigas* en Bretagne : Etat des lieux, dynamique et conséquences écologiques. Thèse de doctorat, Biologie marine, Université de Bretagne Occidentale.

Lemasson L., 1999. Vents et tempêtes sur le littoral de l'ouest de la France : variabilité, variation et conséquences morphologiques, 186 p. Thèse de Doctorat, Géographie, Université de Rennes.

Le Pape O., Chauvet F., Mahévas S., Lazure P., Guérault D., and Désaunay Y., 2003a. Quantitative description of habitat suitability for the juvenile common sole (*Solea solea*, L.) and contribution of different habitats to the adult population in the Bay of Biscay (France). *Journal of Sea Research*, 50: 139-149.

Le Pape O., Chauvet F., Désaunay Y., and G. Guérault, 2003b. Relationship between interannual variations of the river plume and the extent of nursery grounds for the common sole (*Solea solea*, L.) in Vilaine Bay. Effects on recruitment variability. *Journal of Sea Research*, 50: 177-185.

Le Pape O., Désaunay Y., and D. Guérault, 2003c. Relationship between fluvial discharge and sole (*Solea solea*, L.) recruitment in the Bay of Biscay (France). Study of an estuarine nursery ground and application on a stock scale. *ICES Marine Science Symposia*. « Hydrobiological Variability in the ICES Area 1990 – 1999 » 219: 241-248.

Lett C., Ayata S.-D., Huret M., and J. Irisson, 2010. Biophysical modelling to investigate the effects of climate change on marine populations dispersal and connectivity. *Progress in Oceanography*, 87(1–4): 106–113.

Levitus S., Antonoc J., Boyer T., and C. Stephens, 2000. Warming of the world ocean. *Science*, 287: 2225-2229.

Levitus S., Antonov J.I., Boyer T.P., Locarnini R.A., Garcia H.E., and A.V. Mishonov, 2009. Global ocean heat content 1955-2008 in light of recently revealed instrumentation problems. *Geophysical Research Letters*, 36.

Llovel W., 2010. Hausse du niveau de la mer et impact du changement climatique global. Thèse de doctorat, Océanographie spatiale, Université Paul Sabatier - Toulouse III.

Lobell D.B., Field C.B., Cahill K.N., et C. Bonfils, 2006. Impacts of future climate change on California perennial crop yields: Model projections with climate and crop uncertainties. *Agricultural and Forest Meteorology*, 141: 208-18.

Loustau D., Déqué M., Ciais P., et H. Davi, 2004. Modélisation des impacts du changement climatique sur le bilan de carbone et la production des forêts en France, Volet C dans Rapport final du projet CARBOFOR : Séquestration de Carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles. Coordinateur : D. Lousteau, 137pp.

Lozano I., Devoy R.J.N., May W., et U. Andersen, 2004. Storminess and vulnerability along the Atlantic coastlines of Europe: analysis of storm records and of a greenhouse gases induced climate scenario. *Marine Geology*, 210: 205–225.

M

Marchand J.-P., Planchon O. et V. Bonnardot, 2010. Le climat vécu, une aide à la détermination des climats passés : les hivers à Laval (1481-1537). 23^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie « Risques et changements climatiques », Rennes, Italie.

Marchand J.-P., Bonnardot V., Planchon O., et V. Dubreuil, 2011. La vigne, le vin et le climat vus par un notable lavallois au début du 16^{ème} siècle. Actes du 24^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie « Climat montagnard et risques », Revoreto, Italie.

Marques S.C., Azeiteiro U.M., Martinho F., and M.A. Pardal, 2007. Climate variability and planktonic communities: The effect of an extreme event (severe drought) in a southern European estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 73: 725-734.

Martin S., Gazeau F., Orr J., and J.-P. Gattuso, 2008. Ocean acidification and its consequences. Lettre pigb-pmrc France n°21 - Changement global.

Martinho F., Leitão R., Viegas I., Neto J.M., Dolbeth M., Cabral H.N., and M.A. Pardal, 2007a. The influence of an extreme drought event in the fish community of a southern Europe temperate estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 75: 537–546.

Martinho F., Dolbeth M., Viegas I., Teixeira C., and H.P.M. Cabral, 2009. Environmental effects on the recruitment variability of nursery species. *Estuarine, Coastal and shelf science*, 83: 460-468.

Massu N., et G. Landmann, Eds. 2001. Connaissances des impacts du changement climatique sur la biodiversité en France métropolitaine, synthèse de la bibliographie, ECOFOR.

McCabe G.J., Clark M.P., and M.C. Serreze, 2001. Trends in Northern Hemisphere Surface Cyclone Frequency and Intensity. *American Meteorological Society*.

McDonald R.E., 2010. Understanding the impact of climate change on Northern Hemisphere extra-tropical cyclones. *Climate Dynamics*.

McQuatters-Gollop A., Burkill P.H., Beaugrand G., Johns D.G., Gattuso J.-P., and M. Edwards, 2010. Atlas of Calcifying Plankton: Results from the North Atlantic Continuous Plankton Recorder survey. 20p. Sir Alister Hardy Foundation for Ocean Science, Plymouth, UK.

MEDDTL, 2007. Changement climatique et prévention du risque sur le littoral-Les Actes. Séminaire sur la prévention des risques naturels majeurs.

Meehl G.A., Stocker T.F., Collins W.D., Friedlingstein P., Gaye A.T., Gregory J.M., Kitoh A., Knutti R., Murphy J.M., Noda A., Raper S.C.B., Watterson I.G., Weaver A.J., and Z.-C. Zhao, 2007: Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Melzner F., Gutowska M., Langenbuch M., Dupont S., Lucassen M., Thordyke M.C., Bleich M., and H.O. Portner. Physiological Basis for High CO₂ Tolerance in Marine Ectothermic Animals: Pre-Adaptation Through Lifestyle and Ontogeny. *Biogeosciences*, 6: 2313-31.

Mercier H., Lherminier P., et Gourcuff C., 2008. Les courants de l'Atlantique Nord – le projet OVIDE. La Houille Blanche/n° 02.

Mérot P., Squidant H., Arousseau P., Hefting M., Burt T., Maitre V., Kruk M., Butturini A., Thenail C., and V. Viaud, 2003. Testing a climato-topographic index for predicting wetlands distribution along an European climate gradient. *Ecological Modelling*, 163: 51-71.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Mieszowska N., Kendall M.A., Hawkins S.J., Leaper R., Williamson P., Hardman-Mountford N.J., and A.J. Southward, 2006. Changes in the range of some common rocky shore species in Britain—a response to climate change? *Hydrobiologia*, 555: 241–251.

Moatar F., Vidal J.P., et G. Billen, 2010. Impact du changement climatique sur l'hydrosystème Loire : HYDROlogie, régime thermique, QUALité. Plan Loire grandeur nature - 9 février 2010.

Morellato D., Benoit M., and A.-L. Tiberi-Wadier, 2010. Etats de mer et changement climatique - simulations des états de mer dans l'Océan Atlantique de 1960 à 2100 pour trois scénarios de changement climatique. Recueil des actes des journées « Impacts du changement climatique sur les risques côtiers », Orléans, France.

Mounier J., Dubreuil V., et F. Le Henaff, 1993. Sécheresse et rivières en Bretagne occidentale. Dans « L'eau, la terre et les hommes: hommage à R. Frécaut », Presses Universitaires de Nancy, pp.263-272.

Mounier J., Dubreuil V., et C. Lejeune, 1998. Variabilité inter-annuelle et variations actuelles du climat dans le domaine océanique. *Societa Geografica Italiana*, rsn 0391-5190.

N

Nicholls R.J., Wong P.P., Burkett V.R., Codignotto J.O., Hay J.E., McLean R.F., Ragoonaden S., and C.D. Woodroffe, 2007: Coastal systems and low-lying areas. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Parry M.L., Canziani O.F., Palutikof J.P., van der Linden P.J., and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 315-356.

Nicolas D., Chaalali A., Drouineau H., Lobry J., Uriarte A., Borja A., and P. Boet, 2011. Impact of global warming on European tidal estuaries: some evidence of northward migration of estuarine fish species. *Regional Environmental Change*, 11: 639–649.

Nydam M.L., and R.G. Harrison, 2010. Polymorphism and divergence within the ascidian genus *Ciona*. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 56: 718–726.

O

Occhipinti-Ambrogi A., 2007. Global change and marine communities: Alien species and climate change. *Marine Pollution Bulletin*, 55(7-9): 342-352.

O'Connor M. I., Bruno J. F., Gaines S. D., Halpern B. S., Lester S. E., Kinlan B. P., and J. M. Weiss, 2007. Temperature control of larval dispersal and the implications for marine ecology, evolution, and conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 104(4): 1266–1271.

ONF, 2007. Office national des forêts, Direction technique. Forêts et milieux naturels face aux changements climatiques. Rendez-vous techniques de l'ONF, hors-série n° 3. 102 p.

Ottersen G., Planque B., Belgrano A., Post E., Reid P.C., and C. Nils, 2001. Ecological effects of the North Atlantic Oscillation. *Oecologia*, 128: 1-14.

Overland J.E., Alheit J., Andrew B., Hurrell J.W., Mackas D.L., and A.J. Miller, 2010. Climate controls on marine ecosystems and fish populations. *Journal of Marine Systems*, 79(3-4SI): 305-315.

P

Pagé C., et L. Terray, 2011. Nouvelles projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21^{ème} siècle : les scénarii SCRATCH2010. *Climate Modelling and Global Change*, TR/CMGC/10/58.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Pall P., Aina T., Stone D.A., Stott P.A., Nozawa T., Hilbert A.G.J., Lohmann D., et M.R. Allen, 2011. Anthropogenic greenhouse gas contribution to flood risk in England and Wales in autumn 2000. *Nature*, 470.

Pasco R., Donato V., Philippe M., Cassé M., Herry J., Bailly D., et S. Julien, 2011. Visualisation de l'élévation du niveau de la mer dans le golfe du Morbihan. Projet Interreg 4B ENO IMCORE.

Pauly D., 1994. A Framework for Latitudinal Comparisons of Flatfish Recruitment. *Netherlands Journal of Sea Research*, 32: 107-18.

Pauly D., Christensen V., Dalsgaard J., Froese R., and F. Torres, 1998. Fishing Down Marine Food Webs. *Science*, 279: 860-863.

Pereira H. M., Leadley P.W., Proença V., Alkemade R., Scharlemann J.P.W., Araújo M.B., Balvanera P., Biggs R., Cheung W.W.L., Chini L., Cooper H.D., Gilman E.L., Guénette S., Hurtt G.C., Huntington H.P., Mace G.M., Oberdorff T., Revenga C., Rodrigues P., Scholes R.J., Sumaila U.R., and M. Walpole, 2010. Scenarios for global biodiversity in the 21st century. *Science*, 330: 1496–1501.

Perry A.L., Low P.J., Ellis J.R., and J.D. Reynolds, 2005. Climate change and distribution shifts in marine fishes. *Science*, 308: 1912-1915.

Perry R.I., Cury P., Brander K., Jennings S., Möllmann C., and B. Planque, 2010. Sensitivity of Marine Systems to Climate and Fishing: Concepts, Issues and Management Responses. *Journal of Marine Sciences*, 79(3-4): 427-435.

Pirazzoli P.A., Regnaud H., et L. Lemasson, 2004. Changes in storminess and surges in western France during the last century. *Marine Geology*, 210(1-4): 307– 323.

Pirazzoli P.A., Costa S., Dornbusch U., et A. Tomasin, 2006. Recent evolution of surge-related events and assessment of coastal flooding risk on the eastern coasts of the English Channel. *Ocean Dynamics*, 56: 498–512.

Planque B., and T. Fredou, 1999. Temperature and the Recruitment of Atlantic Cod (*Gadus Morhua*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 56: 2069-77.

Planque B., Gohin F., Jégou A.M., Lazure P., Petitgas P., and I. Puillat, 2003. Large-scale hydrodynamics variability in the Bay of Biscay. The 1990s in the context of interdecadal changes. *ICES Marine Science Symposia*, 219: 61-70.

Planque B., Bellier E., and C. Loots, 2011. Uncertainties in projecting spatial distributions of marine populations. *ICES Journal of Marine Science*, 68(6): 1045-1050.

Planton S., 2002. Le changement climatique et la probabilité des tempêtes sur l'Atlantique Nord. *Annales des Mines*.

Planton S., 2006. Les conséquences du changement climatique à l'échelle régionale. Conférence SUPAERO : L'homme et le Climat : Certitudes et Interrogations.

Polovina J.L., Howell E.A., and M. Abecassis, 2008. Ocean's Least Productive Water Area Expanding. *Geophysical Letter*, 35.

Pörtner H.O., and R. Knust, 2007. Climate Change Affects Marine Fishes Through the Oxygen Limitation of Thermal Tolerance. *Science*, 315: 95-97.

Pouvreau N., 2008. Trois cents ans de mesures marégraphiques en France: outils, méthodes et tendances des composantes du niveau de la mer au port de Brest. Thèse de doctorat, Géophysique, Université de la Rochelle.

Q

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Quadfasel D., 2005. Oceanography: The Atlantic heat conveyor slows. *Nature*, 438 : 565-566 (Abstract).

Quéro J.-C., Du Buit M.-H., et J.-J. Vayne, 1998. Les observations de poissons tropicaux et le réchauffement des eaux dans l'Atlantique européen. *Oceanologica Acta*, 21(2): 345-351.

R

Regnauld H., et V. Dubreuil, 1998. L'élévation du niveau marin dans l'Ouest français : signification climatique et conséquences morphologiques. *Annales de Géographie*, 600: 117-13.

Regnauld H., Hubert-Moy L., et J. Musereau, 2004. Risque littoral, évolution climatique et naturalité du dommage. L'information géographique - n° 1.

Reid P.C., Edwards M., Beaugrand G., Skogen M., and D.Stevens, 2003. Periodic changes in the zooplankton of the North Sea during the twentieth century linked to oceanic inflow. *Fisheries Oceanography*, 12: 260–269.

Reid P.C., Lewis-Brown E., Meredith M.P., Sparrow M., Andersson A.J., Antia A., Bates N.R., Bathmann U., Beaugrand G., Brix H., Dye S., Edwards M., Furevik T., Gangstř R., Hátún H., Hopcroft R.R., Kendall M., Kasten S., Keeling R., Le Quéré C., Mackenzie F.T., Malin G., Mauritzen C., Olafsson J., Paull C., Rignot E., Shimada K., Vogt M., Wallace C., Wang Z., Washington R., and A.C. Fischer, 2009. Impacts of the Oceans on Climate Change. *Advances in Marine Biology*, 56: 1-150.

Ribes A., 2009. Détection statistique des changements climatiques. Thèse de doctorat, Mathématiques – statistiques, Université de Toulouse III – Paul Sabatier.

Richardson A.J., and D.S. Schoeman, 2004. Climate Impact on Plankton Ecosystems in the North East Atlantic. *Science*, 305(56-90): 1609-1612.

Rijnsdorp A.D., Peck M.A., Engelhard G.H., Mollmann C., and J.K. Pinnegar, 2010. Resolving Climate Impacts on Fish Stocks. *ICES Cooperative Research Report*, 301: 371p.

Rodolfo-Metalpa R., Houlbrèque F., Tambutté E., Boisson F., Baggini C., Patti F.P., Jeffree R., Fine M., Foggo A., Gattuso J.-P., and J.M. Hall-Spencer, 2011. Coral and mollusc resistance to ocean acidification adversely affected by warming. *Nature Climate Change*, 1: 308–312.

Roman-Amat B., 2007. Préparer les forêts françaises au changement climatique. Rapport à MM. les Ministres de l'Agriculture et de la Pêche et de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables.

Ruiz J., Gonzalez-Quiros R., Prieto L., and G. Navarro, 2009. A Bayesian Model for Anchovy (*Engraulis encrasicolus*): the Combined Forcing of Man and Environment. *Fisheries Oceanography*, 18(1): 62-76.

S

Salen-Picard C., 2002b. Fluctuations of macrobenthic populations: a link between climate-driven river run-off and sole fishery yields in the Gulf of Lions. *Oecologia*, 133: 380–388.

Sanford E., Holzman S.B., Haney R.A., Rand D.M., and M.D. Bertness, 2006. Larval tolerance, gene flow, and the northern geographic range limit of fiddler crabs. *Ecology*, 87(11): 2882-2894.

Sarmiento J. L., Slater R., Barber R., Bopp L., Doney S.C., Hirst A.C., Kleypas J., Matear R., Mikolajewicz U., Monfray P., Soldatov V., Spall S.A., and R. Stouffer, 2004. Response of ocean ecosystems to climate warming. *Global Biogeochemical Cycles*, 18(GB3003): 23 pp.

Saunders M.A. and A.S. Lea, 2008. Large contribution of sea surface warming to recent increase in Atlantic hurricane activity. *Nature*, 451: 557-561.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

SCDB, 2010. Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique. Synthèse scientifique des impacts de l'acidification des océans sur la biodiversité marine: Montréal, Cahier technique n°46, 61 p.

Schiermeier Q., 2006. A sea change. *Nature*, 439: 256-260.

Schiermeier Q., 2011. Earth's Acid Test. *Nature*, 471: 154-56.

Seager R., 2006. The Source of Europe's Mild Climate. *American Scientist*. "The notion that the Gulf Stream is responsible for keeping Europe anomalously warm turns out to be a myth".

Seguin B., 2010. Le changement climatique : conséquences pour l'agriculture et la forêt. *Rayonnement du CNRS*, n° 54.

Sherman K., et G. Hempl (éd.), 2009. The UNEP Large Marine Ecosystem report: A perspective on changing conditions in LMEs of the world's regional seas. Rapport et études du PNUÉ sur les mers régionales, n°182. Nairobi, Kenya : Programme des Nations Unies pour l'environnement.

Simberloff D., 2009. The role of propagule pressure in biological invasions. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40(1).

Simon-Bouhet B., Garcia-Meunier P., et F. Viard, 2006. Multiple introductions promote range expansion of the mollusc *Cyclope neritea* (Nassariidae) in France: evidence from mitochondrial sequence data. *Molecular Ecology*, 15: 1699–1711.

Simon-Bouhet B., 2006. Approches théoriques et empiriques des processus d'invasions biologiques en milieu marin : le cas de *Cyclope neritea*. Thèse de doctorat, Biologie Evolutive et Ecologie, Université de La Rochelle.

Stachowicz J.J., Terwin J.R., Whitlatch R.B., and R.W. Osman, 2002. Linking climate change and biological invasion: ocean warming facilitates non indigenous species invasions. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 99: 15497-15500.

Steinacher M., Joos F., Frölicher T.L., Plattner G.-K., and S.C. Doney, 2009. Projected 21st century decrease in marine productivity: a multi-model analysis. *Biogeoscience*, 6: 515.

Suarez S., Fichaut B., et L. Sparfel, 2008. « Méthode d'évaluation du risque de submersion des côtes basses appliquée à la plage du Vougot, Guissény (Bretagne) ». *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 4 :2007.

Sun X., and K. Matsumoto, 2009. Effects of Sea Ice on Atmospheric PCO₂: a Revised View and Implications for Glacial and Future Climates. *Journal of Geophysical Research*, 115.

Sündermann J., Beddig S., Huthnance J., and C.N.K. Mooers, 2001. Impact of Climate Change on the Coastal Zone: Discussion and Conclusions. *Climate Research*, 18: 1-3.

T

Tasker M.L., 2008. The effect of climate change on the distribution and abundance of marine species in the OSPAR Maritime Area. *ICES Cooperative Research Report*, n°293.

Teal L.R., de Leeuw J.L., van der Veer H.W., and A.D. Rijnsdorp, 2008. Effects of Climate Change on Growth of 0-Group Sole and Plaice. *Marine Ecology Progress Series*, 358: 219-30.

Tréguer P., Lhuillery M., et F.Viard, 2009. Changement climatique et impacts sur les écosystèmes marins de l'ouest de la France, CSEB, Contribution à la réponse du CSEB à une demande du CESR.

Trenberth K.E., Jones P.D., Ambenje P., Bojariu R., Easterling D., Klein Tank A., Parker D., Rahimzadeh F., Renwick J.A., Rusticucci M., Soden B. and P. Zhai, 2007: Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of*

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

Trenberth K.E., 2010. The ocean is warming, isn't it? *Nature*, 465: 304.

Tresher R.E., Koslow J.A., and D.C. Smith, 2007. Depth Mediated Reversal of the Effects of Climate Change on Long Term Growth Rates of Exploited Marine Fish. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 104(18): 7461-7465.

V

van der Veer H. W., Kooijman S., and J. van der Meer, 2003. Body Size Scaling Relationships in Flatfish As Predicted by Dynamic Energy Budgets (DEB Theory): Implications for Recruitment. *Journal of Sea Research*, 50: 255-70.

Van Hal R., Smits K., and A.D. Rijnsdorp, 2010. How climate warming impacts the distribution and abundance of two small flatfish species in the North Sea. *Journal of Sea Research*, 64: 76–84.

Vaselli S., Bertocci I., Maggi E., and L. Benedetti-Cecchi, 2008. Assessing the consequences of sea level rise: effects of changes in the slope of the substratum on sessile assemblages of rocky seashores. *Marine*, 368: 9-22.

Vezina A.F., and O. Hoegh-Guldberg, 2008. Effects of Ocean Acidification on Marine Ecosystems, Introduction. *Marine Ecology Progress Series*, 373: 199-201.

Vuorinen I., Hänninen J., Viitasalo M., Helminen U., and H. Kuosa, 1998. Proportion of copepod biomass declines with decreasing salinity in the Baltic Sea. *ICES Journal of Marine Science*, 55: 767–774.

W

Walther G.-R., Roques A., Hulme P.E., Sykes M.T., Pyšek P., Kühn I., Zobel M., Bacher S., Botta-Dukát Z., Bugmann H., Czúcz B., Dauber J., Hickler T., Jarošík V., Kenis M., Klotz S., Minchin D., Moora M., Nentwig W., Ott J., Panov V.E., Reineking B., Robinet C., Semchenko V., Solarz W., Thuiller W., Vilà M., Vohland K., and J. Settele, 2009. Alien species in a warmer world: Risks and opportunities. *Trends in Ecology & Evolution*, 24(12): 686–693.

Ware D.M., and R.E. Thomson, 2005. Bottom-Up Ecosystem Trophic Dynamics Determine Fish Production in the North Est Pacific. *Science*, 308: 1280-1284.

Wetz M.S., Hutchinson E.A., Lunetta R.S., Paerl H.W., and J.C. Taylor, 2010. Severe Droughts Reduce Estuarine Primary Productivity With Cascading Effects on Higher Trophic Levels. *Limnology and Oceanography*, 56(2): 627-38.

Wing A., 2009. Extratropical Storm Tracks.

Y

Young I., Zieger S. and A. Babanin, 2011. Global trends in wind speed and wave height. *Science*, 332: 451-455.

Z

Zacharioudaki A., Pan S., Simmonds D., Magar V., and D.E. Reeve, 2011. Future wave climate over the west-European shelf seas. *Ocean Dynamics*, 61:807–827.

GLOSSAIRE

Le présent glossaire est principalement issu des sites Ifremer Environnement ENVLIT (<http://envlit.ifremer.fr/infos/glossaire>), Aquaportail (<http://www.aquaportail.com/>) et Wikipedia (http://fr.wikipedia.org/wiki/Wikip%C3%A9dia:Accueil_principal), des rapports du GIEC (2007) et de la CGDD (2011), et enfin du projet CLIMATOR (Brisson et Levraut, 2010).

A

Abiotique : se dit d'un facteur ou processus physique ou chimique de l'environnement (ne fait par conséquent pas intervenir le vivant).

Accrétion : processus d'enrichissement par apport d'éléments matériels.

« **Acidification** » de l'océan : diminution du pH océanique par l'augmentation des ions H⁺, liée à l'augmentation de la dissolution du CO₂ atmosphérique dans les océans.

Adventice : désigne une plante herbacée ou ligneuse indésirable à l'endroit où elle se trouve, désignée dans le langage courant par l'expression « mauvaise herbe ».

Aérosol : ensemble de particules, solides ou liquides, d'une substance chimique donnée en suspension dans un milieu gazeux.

Afforestation : ou boisement est une plantation d'arbres ayant pour but d'établir un état boisé sur une surface longtemps restée dépourvue d'arbre.

Albédo : fraction du rayonnement solaire réfléchi par une surface ou un objet, souvent exprimée en pourcentage. Les surfaces enneigées ont un albédo élevé, les sols de surface ont un albédo élevé à faible et les surfaces couvertes de végétation et les océans ont un albédo faible.

Amendement : produit apporté au sol, généralement en grande quantité, pour en améliorer les qualités physiques.

AMO : *Atlantic Multidecadal Oscillation*. L'Oscillation Atlantique multi-décennale est une variation multi-décennale de 40 à 80 ans, observée dans le Nord de l'Océan Atlantique, qui peut entraîner des variations de température de surface de la mer de l'ordre de 4°C. Elle semble aussi reliée à la variation de la pluviométrie et des températures de l'air

sur de longues périodes dans l'hémisphère Nord, et en particulier en Europe.

Anoxie marine : carences en oxygène des fonds marins du fait de la demande biologique générée par la consommation de cet excès de matière organique.

Anthropique : résultant de l'action de l'Homme ou fait par lui.

Apex : extrémité d'une racine ou d'une tige.

Aquifère : couche de terrain ou une roche, suffisamment poreuse (qui peut stocker de l'eau) et perméable (où l'eau circule librement), pour contenir une nappe d'eau souterraine. Une nappe d'eau souterraine est un réservoir naturel d'eau douce susceptible d'être exploitée.

Arboretum : pépinière où l'on cultive des arbres d'essences diverses.

ARPEGE-Cimat : modèle climatique utilisé par Météo France.

Autochtone : désigne le caractère local d'une espèce.

B

Ballast : compartiment étanche d'un navire, plus ou moins rempli, généralement d'eau de mer, pour servir de lest afin de le stabiliser.

Bassin versant : aire délimitée par des lignes de crête, dans laquelle toutes les eaux tombées alimentent un même exutoire : cours d'eau, lac, mer, océan, etc.

Benthique : qualifie un organisme vivant libre ou fixé au fond des eaux, ayant un lien étroit et permanent avec le fond.

Bilan hydrique : correspond à la variation du stock d'eau de la Réserve en eau des sols entre sa valeur maximale (RU) et sa valeur

minimale, sous l'effet des apports d'eau et de sa consommation par les plantes.

Bioagresseur : organisme vivant (champignon, insecte, mauvaise herbe, bactérie, ...) qui se développe aux dépens des cultures.

Biodégradation : décomposition de matières organiques par des micro-organismes comme les bactéries, les champignons ou les algues.

Biodiversité : diversité totale de tous les organismes et écosystèmes présents à diverses échelles spatiales (depuis les gènes jusqu'aux *biomes* entiers).

Biomasse : masse représentée par un ensemble d'individus vivants.

Biotique : interactions qui existent entre les êtres vivants, animaux et végétaux, présents dans un écosystème donné : compétition alimentaire et spatiale, prédation, symbiose et parasitisme entre autres.

Boréal : relatif au Nord. La province boréale comprend les mers Celtiques, mer du Nord, mer Baltique et mer Norvégienne.

C

C3 / C4 : voir métabolisme carboné.

Calotte polaire : ou inlandsis. Glacier de très grande étendue se présentant sous la forme d'une nappe de glace pouvant atteindre plusieurs milliers de mètres d'épaisseur.

Canicule : canicule : désigne la présence sur du long terme de fortes températures.

Cep : pied de la vigne.

Cépage : type de plant de vigne caractérisé par des particularités propres qui s'expriment au point de vue physique: la forme des feuilles et des grappes, la couleur des raisins à maturité, la composition des raisins, etc.

Céphalopode : classe de mollusques comprenant les poulpes, calamars, seiches, pieuvres et nautilus.

Cerne : ou anneau de croissance, est un cercle concentrique d'un tronc d'arbre, coupé en travers.

Chablis : arbre déraciné sous l'action de différents agents naturels (vent, foudre, neige, chute d'un autre arbre) ou pour des raisons

qui lui sont propres (vieillesse, pourriture, mauvais enracinement), sans intervention de l'homme, du fait d'un orage ou du vent notamment.

Chaîne trophique = relatif à la nutrition. Suite de différents niveaux trophiques, chacun étant le prédateur du précédent : les végétaux (producteur primaire) sont broutés par les consommateurs secondaires (ici herbivores), qui à leur tour sont la nourriture des consommateurs tertiaires (carnivores).

Changement climatique : changements à long terme des valeurs moyennes, accentués par les activités humaines.

Circulation générale : l'atmosphère déclenche des phénomènes dans l'océan par l'action du vent, des précipitations, du rayonnement solaire et l'océan répond en réchauffant ou refroidissant l'atmosphère par l'effet conjugué des températures et des courants océaniques.

Circulation thermohaline : (en anglais, MOC : *Meridional Overturning Cell*) est une circulation verticale, qui en Atlantique Nord se traduit par la formation et la plongée en profondeur d'eaux froides et salées en mer du Groenland, de Labrador et de Norvège.

Climat : description statistique en termes de moyenne et de variabilité des variables météorologiques, sur une longue période (souvent une trentaine d'années).

Conchyliculture : élevage de coquillages ou de tout mollusque bivalve.

Connectivité des populations : degré d'échanges de migrants entre deux populations.

Coteau : côte peu élevée donnant sur une plaine, généralement le flanc d'une petite colline, souvent devenue un terrain vinicole.

Cryosphère : composante du système climatique constituée de la totalité de la neige, de la glace et du gélisol (y compris le pergélisol) au dessus et au dessous de la surface des terres émergées et des océans.

Cyanobactérie : bactérie dont la majorité a la capacité de fixer l'azote atmosphérique. Leur prolifération est souvent stimulée par

l'eutrophisation. Certaines espèces peuvent être toxiques.

Cycle hydrologique : cycle selon lequel l'eau des océans et l'eau présente à la surface des terres émergées s'évapore, se déplace dans l'atmosphère sous la forme de vapeur d'eau, se condense pour former des nuages, retombe sous forme de pluie ou de neige, est interceptée par les arbres et la végétation, s'écoule par ruissellement à la surface des terres émergées, s'infiltré dans les sols, réalimente les nappes souterraines, se déverse dans les cours d'eau et, pour finir, se jette dans les océans, d'où elle s'évapore de nouveau.

D

Débourrement : moment de l'année où les bourgeons végétatifs et floraux des arbres se développent.

Décidus : qui perdent leurs feuilles en automne.

Décote : antonyme de **surcote**.

Déforestation : phénomène de régression des surfaces couvertes de forêt.

Démersal : qualifie une espèce vivant libre à proximité du fond, sans y être liée de façon permanente.

Dendrochronologie : science qui analyse la morphologie des anneaux de croissance (ou cernes) des arbres. Elle permet également de reconstituer les changements climatiques et environnementaux en apportant des indices sur la pluviométrie et la température qu'il faisait au moment où l'arbre produisait un cerne.

Dénitrification : processus bactérien de respiration alternatif. Ce phénomène biologique s'opère généralement, mais pas exclusivement, dans le sol, sous l'action de bactéries spécifiques, satisfaisant leur besoin en oxygène en sol hypoxique ou anoxique, par une désoxygénation des ions nitrates.

Désagrégation = descente d'échelle. Elle peut être statistique ou dynamique (voir chapitre 2.2.3).

Dilatation thermique : en relation avec l'élévation du niveau de la mer, augmentation de volume (et diminution de la densité) résultant du réchauffement de l'eau.

Drainage : opération qui consiste à favoriser artificiellement l'évacuation de l'eau gravitaire présente dans la macro-porosité du sol à la suite de précipitation.

E

Echaudage thermique : notion englobant l'ensemble des phénomènes ayant un impact négatif sur le remplissage des grains lorsque les températures durant cette phase s'élèvent.

Echinoderme : embranchement du règne animal qui regroupe les oursins, les astéries (étoiles de mer) et les ophiures par exemple.

Ecosystème : ensemble des êtres vivants (biocénose), des éléments non vivants et des conditions climatiques et géologiques (biotopes) qui sont liés et interagissent entre eux et qui constitue une unité fonctionnelle de base en écologie.

Edaphique : renvoie à l'influence du sol (pH, humidité, etc.).

Effet de serre : phénomène naturel, dû à la présence de GES contenus dans l'atmosphère.

Effet tampon des océans : absorption de CO₂ atmosphérique par les océans qui conduit à diminuer la concentration en ions CO₂ dans l'atmosphère et à atténuer le changement climatique.

Effluent d'élevage : fluide résiduaire, traité ou non traité, d'origine agricole.

Endogène : qualifie un produit ou une fonction généré à l'intérieur du système (animal, superorganisme, écosystème), et dans le cas d'un organisme synthétisé par l'organisme lui-même.

Epandage : technique agricole consistant à répandre divers produits sur des zones cultivées, forêts, voies ferrées, marais.

Epiaison : moment où l'inflorescence d'une graminée se dégage de la gaine de dernière feuille.

Erosion côtière : phénomène résultant de l'action de l'eau ou des vents qui provoque l'enlèvement des couches supérieures des sols.

Espèce ingénieuse : espèce qui, par son activité naturelle, change le milieu où elle vit et crée un nouveau milieu qui lui est spécifique.

Espèce non-indigène : désigne une espèce qui n'est pas originaire d'un environnement particulier, ou qui ne s'y développe pas ou n'y est pas produit naturellement. Cela peut être une espèce introduite par exemple.

Etiage : niveau le plus bas d'un cours d'eau.

Eutrophisation : enrichissement excessif d'un milieu aquatique en éléments nutritifs, essentiellement le phosphore et l'azote donnant lieu à une production de matière organique trop abondante. Cet enrichissement entraîne une prolifération de la végétation aquatique et la diminution de la teneur en oxygène de ce milieu.

Evapotranspiration : calculée à partir de la température, de l'ensoleillement, du vent et de l'humidité). Elle évalue les besoins en eau d'une culture sous l'influence du climat. On distingue deux types d'évapotranspiration : l'évapotranspiration potentielle (ETP) et l'évapotranspiration réelle (ETR). Voir chapitre 4.1.4.

Événement extrême : événement instantané ou non, caractérisé par une faible probabilité d'occurrence mais de fortes conséquences sur les systèmes écologiques et sociaux.

Exogène : qui provient de l'extérieur, par opposition à endogène.

F

Fertilisation minérale : a pour but d'apporter le complément nécessaire à la fourniture du sol en vue de répondre aux besoins physiologiques des plantes.

Feuillu : arbres produisant des feuilles bien développées, par opposition aux conifères ou résineux dont la forme des feuilles est réduite à des aiguilles.

FLCO2 : Futur Lointain + accroissement de 2 ppm de CO₂ par an.

Foliaire : relatif aux feuilles.

Fongique : qui a rapport aux champignons.

Forçages externes : comprennent des phénomènes naturels tels que les éruptions volcaniques et l'activité solaire, ainsi que des forçages anthropiques tels que les émissions de gaz à effet de serre (GES).

Fouling : terme anglais pour désigner les salissures des coques de navires.

Fourrage : plante, ou un mélange de plantes, cultivée pour ses parties végétatives (feuilles, tiges, éventuellement racines), à l'exclusion des fruits et des graines et que l'on utilise soit à l'état frais, soit conservés, généralement par séchage, pour l'alimentation des animaux.

Fréquence d'occurrence : correspond à la fréquence d'apparition d'une espèce.

G

« **Gene swamping** » : hybridation entre des espèces introduites et locales conduisant à la disparition des espèces locales.

Génome : ensemble du matériel génétique d'un organisme vivant.

Géomorphologie : étude des formes du relief.

Gonade : glande sexuelle qui produit des gamètes (cellules sexuelles) et secrète des hormones.

H

Habitat : milieu dans lequel vit une espèce ou un groupe d'espèces animales ou végétales. On distingue les habitats artificiels (ex. marinas, ports, digues, brise-lames) des habitats naturels (roches, fonds marins, etc.).

Halieutique : qualifie toutes les activités relevant de la pêche sous toutes ses formes (professionnelle, loisir, marine, eau douce, etc.).

Horizon du sol : couche du sol, homogène et parallèle à la surface.

Horizon de saturation des carbonates ($\Omega = 1$) : frontière naturelle de dissolution des carbonates au-dessus duquel le CaCO₃ peut se

former, mais en dessous duquel il se dissout aisément.

Houle : mouvement ondulatoire de la surface de la mer qui se propage sur de longues distances, indépendamment du vent local qui lui a donné naissance.

Hybridation entre espèces : croisement de parents de taxons différents ou de populations génétiquement distinctes d'une même espèce.

Hypométabolique : à métabolisme lent.

Hypoxie : condition dans laquelle la teneur en oxygène est inférieure à sa teneur normale. L'état d'hypoxie se produit quand la quantité d'oxygène présente dans l'eau de mer devient insuffisante et n'arrive plus à répondre aux besoins de la faune et flore marines.

I

Ichtyologique : relatif aux poissons.

Inlandsis : voir calotte polaire.

Inoculum : substance contenant les germes vivants, introduite ou destinée à l'être, en vue d'immuniser le sujet ou de le guérir.

Intrinsèque : qui est inhérent à quelqu'un, à quelque chose, qui lui appartient en propre.

Intrusion d'eau salée : phénomène au cours duquel une masse d'eau salée pénètre à l'intérieur d'une masse d'eau douce, généralement dans des zones côtières ou des estuaires.

J

« **Jours disponibles** » : jours permettant d'intervenir dans de bonnes conditions agronomiques, dépendants du type de sol et du climat.

Juvenile : jeune poisson pas encore prêt à la reproduction.

L

Lessivage : transport d'éléments (argiles, ions) composant un sol sous l'effet de l'écoulement des eaux d'infiltration.

Lithologique : renvoie à la nature des roches d'une formation.

LMDz : modèle climatique utilisé par l'IPSL.

Lusitanien : relatif au Portugal. La province lusitanienne comprend les eaux de la côte Ouest de la péninsule Ibérique et de la France (du détroit de Gibraltar au golfe de Gascogne).

M

Maille (d'un modèle climatique) : résolution horizontale d'un modèle climatique*, c'est-à-dire distance horizontale entre les points de calcul des valeurs climatiques.

Marégraphe : appareil qui mesure et enregistre les variations de la hauteur de l'eau dues à la marée.

« **Mismatch** » : phénomène qui désigne ce qui n'est pas ou plus adapté.

Maturité : étape dans laquelle se trouve un organisme qui a atteint son plein développement et l'âge de reproduction sexuelle.

Métabolisme : désigne la croissance d'un être vivant, et tous les processus nécessaires à cette croissance.

Métabolisme carboné : Il existe, dans le processus de photosynthèse des plantes, deux types de fixation du CO₂ : C₄ et C₃ qui reflètent le nombre d'atomes de carbone de la première molécule organique formée. Ces mécanismes sont associés à des comportements écophysologiques différents.

Minéralisation : processus de décomposition de substances complexes de grande taille d'origine organique ou minérale.

N

NAO : *North Atlantic Oscillation*. L'oscillation Nord-Atlantique est un phénomène atmosphérique et océanique pluriannuel, qui concerne principalement l'Atlantique Nord. Elle se mesure généralement comme la différence de pression atmosphérique entre l'Anticyclone des Açores et la dépression d'Islande et entraîne : (i) des changements de la pression au sol ; (ii) des variations des vents d'ouest moyens ; (iii) des influences sur le climat (températures, précipitations) tout autour du bassin atlantique, et tout particulièrement sur l'Europe.

Nappe phréatique : réservoir d'eau important dans le sol et qui régule l'eau s'infiltrant dans les sols.

Nival : relatif à la neige.

P

Pathogène : se dit d'un agent (germe, bactérie, etc.) qui engendre la maladie.

Pédologie : renvoie à l'étude des sols.

Pélagique : qualifie une espèce vivant en pleine eau.

Pérenne : culture dont la durée de vie peut s'étaler sur plusieurs années, à l'inverse d'une plante annuelle qu'il faut ressemer chaque année.

Permafrost : ou pergélisol, désigne un sous-sol gelé en permanence, au moins pendant deux ans.

Peuplement : ensemble des espèces animales et/ou végétales qui vivent dans un espace géographique donné.

Phénologie : étude des phénomènes naturels périodiques (par exemple les stades de développement ou la migration) et de leur rapport avec le climat et les changements saisonniers.

Phénotype : caractéristiques physiques d'un organisme qui résultent de l'interaction de sa constitution génétique avec les facteurs du milieu.

Photosensibilité : sensible à la lumière.

Photopériode : rapport entre la durée du jour et la durée de la nuit.

Photosynthèse : processus biochimique permettant aux plantes, algues et certaines bactéries de fixer le CO₂ atmosphérique grâce à l'énergie lumineuse et aboutissant à l'élaboration de biomasse.

Physiologie : science qui étudie le fonctionnement des organes et des cellules.

Pierrosité : proportion relative des pierres à la surface du sol.

Piézométrique : altitude ou la profondeur (par rapport à la surface du sol) de la limite entre la

zone saturée et la zone non saturée dans une formation aquifère.

« **Plaise box** » : zone de réserve mise en place dans les années 1990 pour protéger les juvéniles de plies, favoriser le renouvellement de la population de mer du Nord et augmenter à terme les possibilités d'exploitation cette ressource.

Plancton : microorganismes vivant dans les couches supérieures des milieux aquatiques. Il convient de distinguer le *phytoplancton*, qui tire son énergie de la *photosynthèse*, et le *zooplancton*, qui se nourrit de phytoplancton.

Pluie efficace = pluie – évapotranspiration.

Polyphénol : famille de molécules organiques largement présente dans le règne végétal.

Population : groupe d'individus qui se reproduisent entre eux.

« **Pourriture noble** » : champignon, *Botrytis cinerea* qui se développe sur les baies de raisin dans certaines conditions d'humidité et d'ensoleillement, permettant la production de vins liquoreux.

Pratique culturale : par exemple, pratique irriguée ou pluviale.

Production primaire : quantité de matière organique élaborée par les végétaux photosynthétiques.

« **Pression en propagule** » : définit le nombre et la fréquence des événements d'introduction et le nombre de propagules introduites à chacun des événements d'introduction ; les propagules étant tout ou partie d'un organisme capable de réaliser le cycle de vie d'un organisme, par exemple les larves des invertébrés marins ou les spores des algues.

Production secondaire : effectuée par le zooplancton qui se nourrit de phytoplancton.

Province biogéographique : sous-zone géographique climatiquement et écologiquement, relativement homogène du point de vue des formations animales, végétales et des températures.

Puits : correspond à tout processus, activité ou mécanisme qui élimine de l'atmosphère,

un gaz à effet de serre, un aérosol ou un précurseur de gaz à effet de serre ou d'aérosol.

R

Ravageur : insecte nuisible pour les cultures agricoles, pour les arbres et la végétation en général.

Recrutement : processus par lequel la fraction la plus jeune de la population s'intègre pour la première fois à l'ensemble des poissons accessibles à l'exploitation.

Rendement = production, rentabilité.

Réserve utile : valeur maximale de l'eau stockée dans le sol, utilisable par les plantes.

Résilience : capacité de récupération d'une population, ou son retour à l'état normal après un stress.

Rétroaction : résultat d'un processus initial qui provoque, dans un second processus, des changements qui influent à leur tour sur le processus initial. Une rétroaction positive renforce le processus initial, alors qu'une rétroaction négative l'atténue.

Ripisylve : ensemble de formations boisées, buissonnantes et herbacées présentes sur les rives d'un cours d'eau, dans les zones humides.

Ruissellement : partie des précipitations qui ne s'évapore pas ou ne transpire pas, mais qui s'écoule à la surface du sol et se déverse dans les masses d'eau.

S

Scénario climatique / d'émission : prennent en compte plusieurs facteurs tels que l'évolution démographique, le développement social et économique, le progrès technologique, l'utilisation des ressources et la lutte contre la pollution, afin de caractériser l'évolution des émissions de GES de la planète.

Ils sont regroupés en 4 familles (A1, A2, B1 et B2), chacune représentant une évolution différente au plan démographique, social, économique, technologique et environnemental.

Sécheresse : absence prolongée ou une insuffisance marquée des précipitations entraînant une pénurie d'eau.

Sédiments : dépôts solides ayant été transportés par l'eau.

Semis : opération culturale qui consiste à ensemer un champ, c'est-à-dire à mettre en terre les graines ou semences.

Sénescence : processus de vieillissement biologique, qui entraîne une lente dégradation des fonctions de l'organisme.

Sessile : un organisme sessile vit fixé sur le substrat.

Sole irriguée : surface totale irriguée en France.

Stomate : orifice de petite taille présent dans l'épiderme des organes aériens des végétaux (sur la face inférieure des feuilles le plus souvent). Il permet les échanges gazeux entre la plante et l'air ambiant (dioxygène, dioxyde de carbone, vapeur d'eau, etc.) ainsi que la régulation de la pression osmotique.

Stratification thermique : qualifie la présence de couches d'eau de températures différentes.

Stress hydrique : type d'agression des organismes dû à un déficit d'apport en eau.

Submersion marine : élévation du niveau de l'eau par rapport à la terre, provoquant des inondations.

Surcotes : correspondent à des élévations exceptionnelles du niveau de la mer qui durent quelques heures et s'expliquent à la fois par une baisse de la pression atmosphérique et des vents forts soufflant vers la terre. À l'inverse, les hautes pressions provoquent une décote.

Sylviculture : art et science d'opérer des changements à l'échelle du peuplement, par des traitements qui se font dans un esprit d'aménagement de l'ensemble de la forêt.

Synoptique : à une échelle globale. En météorologie, le terme "synoptique" qualifie plus particulièrement les phénomènes atmosphériques dont l'ordre de grandeur est de quelques milliers de kilomètres pour les

dimensions horizontales, de quelques kilomètres pour la dimension verticale.

Système climatique : résulte d'un apport d'énergie par le soleil et des interactions entre l'atmosphère, l'hydrosphère (océans et autres plans d'eau), la cryosphère (neige et glace), la surface terrestre et la biosphère (êtres vivants).

T

Tanin : substance naturelle qui intervient dans la couleur du vin.

Tectonique : relatif aux mouvements de la partie superficielle de l'écorce terrestre.

Tellurique : relatif à la terre ou au sol.

Terrigène : qui provient du continent.

Thermocline : zone de transition entre deux masses d'eau de températures différentes et se mélangeant difficilement, généralement située à une profondeur de 1 km.

Thermophile : favorisé par des températures élevées.

Topographie : art de la mesure puis de la représentation sur un plan ou une carte des formes et détails visibles sur le terrain, qu'ils soient naturels (notamment le relief et l'hydrographie) ou artificiels (comme les bâtiments, les routes, etc.).

Trait de côte : ligne qui marque la limite terrestre jusqu'à laquelle peuvent parvenir les eaux marines

Trophique : relatif à la nutrition.

Turbidimètre : appareil qui sert à déterminer la turbidité d'un liquide.

Turbidité : caractère d'une eau dont la transparence est limitée par la présence de matières solides en suspension.

« **Turn over** » : représente le renouvellement des espèces par des phénomènes d'invasion et d'extinction locale.

« **Types de temps** » : notion basée d'une part sur la classification des différents types de temps (chaud, humide, etc.) et types de circulation (anticyclonique, etc.) et d'autre part sur la confrontation entre ces deux classifications afin d'établir le lien entre tel

type de situation atmosphérique et tel type de climat.

V

Variabilité naturelle du climat : changements naturels du climat, à des échelles de temps annuelles et décennales (températures, précipitations, etc.), allant jusqu'au millénaire et au million d'années (modifications de l'orbite terrestre, activité solaire, éruptions volcaniques).

Vendange : récolte du raisin destiné à la production du vin (le terme ne s'applique pas à la récolte de raisins de table).

Véraison : moment de l'année où le grain de raisin gonfle et devient rouge vif ou jaune translucide ; il commence à prendre la couleur qu'il aura à maturité.

Vernalisation : correspond aux besoins quantitatifs en froid nécessaires aux apex végétatifs pour leur passage au développement reproducteur. Ces besoins sont comptés en nombre de jours ayant des températures moyennes inférieures à un seuil dépendant de l'espèce.

Viticulture : activité agricole consistant à cultiver la vigne, afin de produire du raisin.

X

Xylophage : organisme vivant dont le régime alimentaire est composé de bois.

Z

Zéro de végétation : correspond à la température minimale à partir de laquelle le développement se manifeste.

Zone de transition biogéographique : zone entre provinces biogéographiques adjacentes où il y a un changement de la composition des peuplements (et notamment des espèces dominantes) et où de nombreuses espèces trouvent leur limite de distribution géographique

ACRONYMES

A

ACE : Initiative Internationale «Attribution of Climate-Related Events ».

ACT : période ACTuelle.

ADAPTALITT : « Capacités d'adaptation des sociétés littorales aux phénomènes d'érosion – submersion des côtes en prise avec les changements climatiques » (projet 2009-2011).

ADEME : Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie.

AFORCE : « Adaptation des FORêts au Changement climatiqUE ».

ALADIN : Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational.

AMO : *Atlantic Multidecadal Oscillation*. L'Oscillation Atlantique multi-décennale.

ANCORIM : « Atlantic Network for COastal Risks Management » (projet depuis 2002).

ANR : Agence Nationale de la Recherche.

AOC : Appellation d'Origine Contrôlée.

ARS : Agence Régionale de Santé.

ATV : Association Technique Viticole.

B

BARCASUB : « vulnérabilité du Bassin d'ARCAchon à la SUBmersion marine » (projet de 2009 à 2012).

BASIN : « Basin-scale Analysis, Synthesis & Integration » (projet de 2010 à 2014).

BDAT : Base de Données Analyse des Terres.

Bosco : Base nationale d'Observation et de Suivi des Cotes.

BRGM : Bureau de recherches géologiques et minières.

BV : Bassin Versant.

C

C3E2 : « Conséquences du Changement Climatique sur l'Ecogéomorphologie des Estuaires » (projet de 2010 à 2012).

CA : Chambre d'Agriculture.

CaCO₃ : carbonates de calcium.

CAGE : circulation atmosphérique de grande échelle.

CALIPSO : « Cloud and Aerosol Lidar Pathfinder Satellite Observations ».

CH₄ : méthane

CEA : Commissariat à l'Energie Atomique.

CEP&S : Changements Environnementaux Planétaires et Société.

CEPMMT : Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme.

CERFACS : Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique.

CESR : Conseil Economique et Social Régional.

CETEF : Centre d'Etudes Techniques et d'Expérimentations Forestières.

CETMEF : Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales.

CGAAER : Conseil Général de l'Alimentation, de l'Agriculture et des Espaces Ruraux.

CGEDD : Conseil général de l'environnement et du développement durable.

CIEM : Conseil International pour l'Exploration de la Mer.

CLIMASTER : « changements CLIMAtiques, Systèmes agricoles, ressources naturelles et développement TERRitorial » (projet de 2008 à 2011).

CLS : Collecte Localisation Satellites.

CNBF : Centre National de Biodiversité Forestière.

CNES : Centre National d'Etudes Spatiales.

ACRONYMES UTILISES

CNPF : Centre National de la Propriété Forestière.

CNRM : Centre National de Recherche Météorologique.

CNRS : Centre National de Recherche Scientifique.

CO₂ : gaz carbonique.

COCORISCO: « COonnaissance, COmpréhension et gestion des RISques COtiers » (projet de 2011 à 2013).

COD : Carbone Organique Dissous.

COSTEL : Climat, Observation des Sols, et TELédétection.

COT : Carbone Organique Total.

CPR : *Continuous Plankton Recorder* (échantillonneur de plancton en continu).

CPUE : catch per unit effort.

CREAFOR : « Coordination des activités de REcherche sur l'Adaptation des FORêts au changement climatique ».

CRPF : Centre Régional de Propriété Forestière.

CRU : Climatic Research Unit.

CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment de Nantes.

D

Datar : Délégation interministérielle à l'Aménagement du Territoire et à l'Attractivité Régionale.

DDE : Direction Départementale de l'Équipement.

DE : Déficit d'Évaporation.

DEDUCE : DEveloppement DUrable des Côtes Européennes.

DISCOBOLE : « Données pour le dimensionnement des Structures Côtières et des Ouvrages de Bord de mer à Longue Échéance » (projet 2004-2008).

DRAAFB : Direction régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt.

DRIAS : « Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnements » (projet de 2010 à 2012).

DSF : Département de la Santé des Forêts.

E

ECMWF : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.

ECOKNOWS : « Effective use of ecosystem and biological knowledge in fisheries » (projet de 2010 à 2013).

EDF : Electricité de France.

EPOCA : « European Project on Ocean Acidification » (projet 2008-2012).

EPHYSE : Ecologie fonctionnelle et PHYSique de l'Environnement.

EROCOVUL : « EROsion COtière et VULnérabilité du trait de côte en Bretagne » (projet de 2001 à 2003).

ESE : Ecologie et Santé des Ecosystèmes.

ETP : évapotranspiration potentielle.

ETR : évapotranspiration réelle.

EVOLFISH : « Effects of global warming and local contamination on the evolutionary response of two coastal fishes » (projet de 2009 à 2012).

F

FAO : Food and Agriculture Organisation (Organisation des Nations Unies pour l'Agriculture et l'Alimentation).

FAST : « Analyse et Spatialisation de scénario intégré de changement global sur la Forêt française » (projet de 2009 à 2011).

FP : Futur Proche.

G

GDR : Groupe De Recherche.

GEOIDD-Litto : GEOgraphie et Indicateurs liés au Développement Durable sur le Littoral.

GES : gaz à effet de serre.

ACRONYMES UTILISES

GICC : Gestion et Impacts du Changement Climatique.

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.

GIP : Groupe d'Intérêt Public.

GIS : Groupe d'Intérêt Scientifique.

GMGL : Géosciences Marines et Géomorphologie du Littoral.

H

Hmo : hauteur moyenne.

I

ICC-HYDROQUAL : « Impact du Changement Climatique sur l'hydrosystème Loire : HYDROlogie, régime thermique, QUALité » (projet de 2008 à 2010).

IDF : Institut pour le Développement Forestier.

IE : Indice Ecoclimatique.

IFEN : Institut Français de l'ENVironnement.

IFM : Indice Forêt Météo.

IFN : Inventaire Forestier National.

Ifremer : Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer.

IGA : Inspection Générale de l'Administration.

IGCS : Inventaire, Gestion et Conservation des Sols.

IGN : Institut Géographique National.

IMARES : Institute for Marine Resources & Ecosystem Studies.

IMCORE : « Innovative Management for Europe's changing COastal Resource » (projet 2008-2011).

IMFREX : « IMpact des changements anthropiques sur la FRéquence des phénomènes EXtrêmes de vent, de température et de précipitations en France » (projet de 2003 à 2005).

INAO : Institut national de l'origine et de la qualité.

INRA : Institut National de Recherche Agronomique.

INSU : Institut national des Sciences de l'Univers.

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCCSB : « ImPact du Changement Climatique sur l'intensité des Sécheresses en Bretagne ».

IPSL : Institut Pierre-Simon Laplace.

IRSTEA : Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (ex Cemagref : Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts, devenu).

ISTO : Institut des Sciences de la Terre d'Orléans.

K

KNMI Climate Explorer: Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut.

L

Landsoil : Landscape design for soil conservation under land use and climate change.

LEGOS : Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales.

LEMAR : Laboratoire des Sciences de l'Environnement Marin.

LETG : UMR Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique.

LICCO : « Living with a Changing COast » (projet de 2011 à 2014).

LPO : Laboratoire de Physique des Océans.

M

MCGOA : modèles de la circulation générale couplés atmosphère-océan.

MEECE : « Marine Ecosystem Evolution in a Changing Environment » (projet de 2008 à 2012).

MES : matière en suspension.

ACRONYMES UTILISES

MICORE : « Morphological Impacts and COastal Risks induced by Extremes storm events » (projet de 2008 à 2012).

MISEEVA : « Marine Inundation hazard exposure modelling and Social, Economic and Environmental Vulnerability Assessment in regard to global changes » (projet de 2007 à 2010).

MO : matière organique.

MPIM : Max Planck Institute for Mathematics.

N

N₂O : oxyde nitreux ou protoxyde d'azote.

NAO : *North Atlantic Oscillation*. Oscillation Nord-Atlantique

NASA : National Aeronautics and Space Administration.

NCAR : National Center for Atmospheric Research.

NCDC : National Climatic Data Center.

NERC : Natural Environment Research Council.

NO²⁻ : ion nitrite.

NO³⁻ : ion nitrate.

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration.

NOMADE : « NOuvelles Méthodes d'Acclimatation Des Essence forestières ».

O

ONF : Office National des Forêts.

ONIVIN : Office National Interprofessionnel du VIN.

ONU : Organisation des Nations Unies.

OSPAR : convention pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord Est ou Convention (OSPAR pour « Oslo-Paris »).

OVIDE : « Observatoire de la Variabilité Interannuelle et DEcennale en Atlantique Nord » (projet depuis 2002).

P

PML : Plymouth Marine Laboratory.

PNR : Parc Naturel Régional.

PP : production primaire.

Ppm : partie par million.

PR : Passé Récent.

PRODIG : Pole de Recherche pour l'Organisation et la Diffusion de l'Information Géographique.

PROGIG : « Prolifération de l'huître creuse du Pacifique *Crassostrea gigas* » (projet depuis 2005).

PSDR-GO : programme Pour et Sur le Développement Régional dans le Grand Ouest.

Q

QQ : quantile-quantile.

R

RECLAIM : « Resolving CLImAtic IMpacts on fish stocks » (projet de 2007 à 2009).

REINFFORCE : « RÉseau INFrastructure de recherche pour le suivi et l'adaptation des FORêts au Changement climatique ».

RENECOFOR : REseau National de suivi à long terme des ECOSystèmes FOrestiers.

REVAEE : « REgionalisation et VAriabilité des Evénements Extrêmes » (projet de 2007 à 2011).

REXHYSS : Impact du changement climatique sur les Ressources en Eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme.

RICLIM : Risques liés au CLImat.

RMQS : Réseau de Mesures de la Qualité des Sols.

RMT : Réseau Mixte Technologique.

RU : Réserve Utile.

S

SAFHOS : Sir Alister Hardy Foundation for Ocean Science.

SAS : Sol, Agro et hydrosystème, Spatialisation.

ACRONYMES UTILISES

SAU : Surface Agricole Utile.

SCALES : Spatialisation d'échelle fine de l'ALéa Erosion des Sols.

SeaWIFS : Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor.

SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.

SIAGM : Syndicat Intercommunal d'Aménagement du Golfe du Morbihan.

SIG : Système d'Information Géographique.

SOeS : p43

SOMLIT : Service d'Observation en Milieu Littoral.

SRCAE : Schéma Régional Climat-Air-Energie

SRES : Special Report on Emissions Scenarios.

T

TERADCLIM : « Adaptation au changement climatique à l'échelle des terroirs viticoles » (projet de 2011 à 2013).

TERVICLIM : « Terroirs viticoles et changement climatique » (projet de 2008 à 2011).

THOR : « Thermohaline Overturning – at Risk? » (projet de 2008 à 2012).

Tmax : Température maximale quotidienne.

Tmin : température minimale quotidienne.

TSO : Température de Surface Océanique.

TT : Type de temps

U

UBO : Université de Bretagne Occidentale.

UK : United Kingdom.

UMR : Unité Mixte de Recherche.

UPMC : Université Pierre et Marie Curie.

V

VMCS : Vulnérabilité : Environnement, Climat, Sociétés.

VULSACO : « VULnerability of SANDy COast to climate change and anthropic pressure » (projet de 2007 à 2010).

W

WUE : Water Usage Effectiveness.

Z

ZH : Zone Humide.

En Bretagne, les observations concernant l'évolution des températures moyennes montrent une tendance nette à l'augmentation au cours du 20^{ème} siècle, laquelle devrait s'amplifier au 21^{ème} siècle et accentuer les vagues de chaleur. Concernant les précipitations moyennes ou extrêmes observées, les tendances ne sont pas significatives et l'analyse nécessiterait d'être affinée concernant les données mensuelles ou saisonnières de pluviométrie. En parallèle, les phénomènes de tempête ne montrent pas de tendance nette, mais seraient susceptibles d'augmenter en période hivernale au cours du 21^{ème} siècle. Il est nécessaire dès aujourd'hui d'anticiper les conséquences du changement climatique afin de minimiser les impacts socio-économiques afférents et réduire la vulnérabilité des territoires et acteurs concernés. Il s'agit alors de définir et d'évaluer les effets du changement climatique auxquels les acteurs devront faire face afin d'envisager par la suite les mesures d'adaptation les plus appropriées.

L'évolution des ressources naturelles bretonnes jusqu'à aujourd'hui est difficile à mettre en relation avec le changement climatique. Concernant les sols et la ressource en eau, les différentes projections réalisées mettent en avant leur fragilité face au changement climatique et aux événements extrêmes. L'agriculture en Bretagne ne devrait pas subir de dégradation ni d'amélioration générale des possibilités de culture, mais il faut plutôt s'attendre à ce qu'un ensemble de facteurs, dont elles dépendent, soit modifié (confort hydrique et thermique, « jours disponibles », etc.). On peut aussi s'attendre à une augmentation de la faisabilité de cultures actuellement peu présentes en Bretagne, telles que des espèces originaires du Sud, ceci étant aussi prédit pour les vignes et les forêts. Toutefois, concernant le siècle à venir, les peuplements forestiers bretons ne devraient pas subir de forts dommages ou modifications. A l'échelle de la région, ce sont surtout les faibles réserves d'eau dans les sols bretons et l'accroissement des sécheresses déjà observé qui sont à surveiller pour les ressources continentales.

Etant donné l'importance du milieu marin pour la Bretagne, de part son vaste linéaire côtier et les nombreuses activités économiques en lien avec la mer, il était important d'en étudier les impacts liés au changement climatique. Même si à l'échelle de l'Atlantique Nord, des modifications à long terme ont été observées (réchauffement des eaux de surface, acidification des océans), il n'existe actuellement pas de preuve scientifique liant la variabilité observée au niveau des milieux côtiers et marins bretons au changement climatique en cours, mis à part l'élévation du niveau de la mer observée depuis 300 ans à Brest. Aucune relation n'est constatée entre l'intensité et la fréquence des risques d'érosion et de submersion et le changement climatique ; toutefois, l'hypothèse est émise que ces risques puissent s'aggraver dans le futur. Concernant la biodiversité marine, s'il n'est à ce jour pas possible de dresser un bilan quantitatif des changements attendus, il n'en reste pas moins certain que des changements qualitatifs vont affecter les communautés marines en Bretagne. Le remplacement d'espèces à affinités sub-boréales par des espèces sub-tropicales est en cours et va se poursuivre, affectant l'ensemble de la chaîne alimentaire, des producteurs primaires aux prédateurs, ainsi que l'exploitation des ressources vivantes.

Ces changements observés et projetés sur les ressources naturelles continentales et marines sont entourés d'incertitudes et nécessiteraient : (1) de plus longues séries d'observations qui permettraient d'effacer la variabilité naturelle, (2) plus de connaissances concernant la vitesse et l'ampleur du changement climatique à venir, les capacités d'adaptation des espèces, les rétroactions climatiques difficilement prévisibles, et enfin les futures actions d'adaptations de l'Homme.

Etude réalisée par le Conseil Scientifique de l'Environnement de Bretagne

✉: Agrocampus Ouest - 65, rue de St Briec - CS 84 215 - 35042 RENNES CEDEX

☎: 02.23.48.56.32 ; contact@cseb-bretagne.fr

<http://www.cseb-bretagne.fr/>

