

Conseil Scientifique de l'Environnement de Bretagne

Changement climatique et impacts sur les écosystèmes marins de l'ouest de la France

Paul Tréguer¹, Marie Lhuillery¹ et Frédérique Viard²

¹Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM, Brest),
Université de Bretagne Occidentale

²Station Biologique de Roscoff (SBR),
Université Pierre et Marie Curie

1^{er} septembre 2009

Avertissement

Ce rapport est une contribution à la réponse du Conseil Scientifique de l'Environnement en Bretagne (CSEB) à une demande du Conseil Économique et Social Régional.

De nombreuses études se réfèrent aux impacts du changement climatique sur les écosystèmes. Notre démarche s'est attachée à la recherche de faits avérés aux dépens d'approches plus interprétatives voire spéculatives.

Compte tenu des contraintes de temps pour la réalisation de cette étude (3 mois), nous n'avons pas pris en considération les événements dits « exceptionnels » (ex. extrema thermiques, inondations, tempêtes avec érosion du trait de côte), un des aspects importants des effets du changement climatique, sur les milieux pélagiques (pleine eau) et benthiques (fond).

Remerciements

Jean-Claude Le Gac (SHOM, Brest), Yves Pastol, Vincent Donato et l'équipe LITTO 3D du SHOM (Brest), Anne-Marie Tréguier (LPO, IUEM, Ifremer, Brest), Christian Hily (IUEM, Brest), Benjamin Planque (Université de Tromsø, Norway), Eric Goberville (thèse SOMLIT/CNRS, Wimereux), Pascale Delécluse (MétéoFrance, Toulouse)

Résumé

En raison de sa localisation par rapport aux systèmes météorologiques et océanographiques dominants de l'Atlantique Nord, le massif armoricain et ses eaux environnantes sont soumis à une forte variabilité climatique naturelle. Malgré leurs insuffisances, les données actuelles issues des séries d'observation permettent pour les dernières décennies : (1) de retenir l'hypothèse d'une **élévation de la température moyenne annuelle des eaux environnant la péninsule armoricaine, de l'ordre de quelques dixièmes de degré**, (2) de mettre en évidence une **montée du niveau moyen de la mer en Bretagne de l'ordre du millimètre par an** et (3) d'illustrer les effets du réchauffement climatique sur la **modification des aires de répartition des espèces, par exemple chez certains poissons et mollusques**. Ces exemples soulignent la synergie entre modifications climatiques et d'autres facettes du changement global, en particulier les introductions d'espèces exotiques et leur prolifération.

Dans la **deuxième moitié du 21^{ème} siècle**, en retenant le scénario A2 ¹ du GIEC (Groupement Intergouvernemental pour l'Étude du Climat), **MétéoFrance prévoit pour la région Bretagne une augmentation de 0,5°C pour la température moyenne hivernale et de 3,7°C pour la température estivale**. Ce type de prévision doit cependant être considéré avec précaution car il ne répercute pas l'ensemble des processus impliqués dans le changement climatique (ex. modification de la circulation générale sur l'Atlantique Nord). Les effets cumulés de la dilatation des océans et de la modification de la circulation océanique sur l'Atlantique Nord pourraient se traduire localement, d'ici à la fin du 21^{ème} siècle, par **une augmentation du niveau de la mer d'une dizaine à quelques dizaines de centimètres** ; ceci n'est pas sans conséquence pour le littoral du massif armoricain et devrait être pris en compte par les **aménageurs**. Le transfert de l'excès de CO₂ d'origine anthropique dans l'océan est en train d'engendrer une **diminution du pH de l'eau de mer** ; un seuil critique devrait être atteint dans les eaux environnant le massif armoricain avant la fin de ce siècle. La perturbation prévisible sur les **coquilles calcaires de plusieurs organismes, d'intérêt commercial ou non**, est préoccupante. Il n'est pas possible à ce jour de quantifier les conséquences du changement climatique sur les écosystèmes marins des eaux baignant le massif armoricain, en raison d'insuffisances des séries d'observation des milieux pélagiques et benthiques ou de l'absence d'expérimentations dédiées. Parmi les effets documentés dans les eaux côtières armoricaines ou dans des régions voisines, les périodes de reproduction semblent particulièrement sensibles aux effets des changements climatiques : des conséquences en chaînes (ex. déséquilibre des réseaux trophiques) sont attendues à l'identique de ce qui a été déjà bien démontré pour les systèmes de pleine eau.

L'étude de la **vulnérabilité au changement climatique des milieux marins** environnant la péninsule armoricaine présente des enjeux majeurs, tant sur le plan scientifique qu'économique. La synergie entre les structures de recherche et les structures de conservation et d'observation déjà en œuvre en Bretagne devrait être pérennisée et renforcée. L'important potentiel régional en matière de recherches marines devrait être mis à profit pour conduire **un effort d'observation et de recherche** plus conséquent et de longue durée sur ce thème. Cet effort devrait être soutenu par les autorités régionales et nationales.

¹ Le "scénario hétérogène" (ou A2) se fonde sur l'hypothèse d'un renforcement des identités et des traditions locales, s'accompagnant d'une démographie plus élevée, ainsi que d'une évolution technologique et d'une croissance économique plus faible.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	4
I. LE CLIMAT EST-IL EN TRAIN DE CHANGER EN BRETAGNE ?.....	7
I.1- Évolution de la température moyenne	7
I.1-1. À la surface de la Terre ou des continents	7
I.1-2. À la surface de l'océan	10
I.2- Le niveau de la mer a-t-il monté ?	13
II. DES IMPACTS DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE SUR LES ÉCOSYSTÈMES MARINS SONT-ILS DÉTECTÉS ?.....	14
II.1- Déplacement des limites nord d'aires de répartition d'organismes marins.	16
II.1-1. Déplacement vers le nord deux espèces de poisson à affinité tropicale (Quéro <i>et al.</i> 1998).....	16
II.1-2. Expansion vers le nord du gastéropode d'origine méditerranéenne <i>Cyclope nerite</i>	17
II.2- Conséquence de la modification de la température en période de reproduction pour le développement des organismes.	18
II.2-1. Abondance de <i>Capros Aper</i> dans le golfe de Gascogne	18
II.2-2. Colonisation du littoral Atlantique et de la Manche par l'huître creuse du Pacifique <i>Crassostrea gigas</i>	18
III. QUE PEUT-ON PRÉVOIR AU COURS DU 21^{ÈME} SIÈCLE ?	19
III.1- Comment pourrait évoluer la température ?	19
III.2- De combien le niveau de la mer peut-il monter ?	21
III.3- L'acidification de l'océan aura-t-elle un impact sur les ressources biologiques exploitées ?	25
III.4- De façon générale, quels pourraient être les impacts sur les écosystèmes marins ?	27
CONCLUSION et RECOMMANDATIONS.....	29
RÉFÉRENCES	31

“Global climate change will affect the physical, biological and biogeochemical characteristics of the oceans and coasts, modifying their ecological structure, their functions, and the goods and services they provide”

Intergovernmental Panel for Climate Change, GIEC (2001)

Introduction : variabilité et changement climatique

Les études du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental pour l'Évolution du Climat) ont vulgarisé la notion de changement climatique à l'échelle globale et la prévision de modifications climatiques pour les prochaines décennies. Ceci a été rendu possible par l'utilisation couplée de deux outils scientifiques majeurs : d'une part, les modèles globaux couplés atmosphère – hydrosphère – biosphère et d'autre part, les séries temporelles d'observation menées à l'échelle séculaire.

Régionaliser les prévisions climatiques et prévoir les impacts sur les écosystèmes marins représente pourtant un double challenge. En effet, ceci suppose d'une part, la mise au point de modèles couplés réalistes avec prise en compte de la topographie locale. C'est une démarche qui n'est qu'au tout début de son développement (Figure 1).

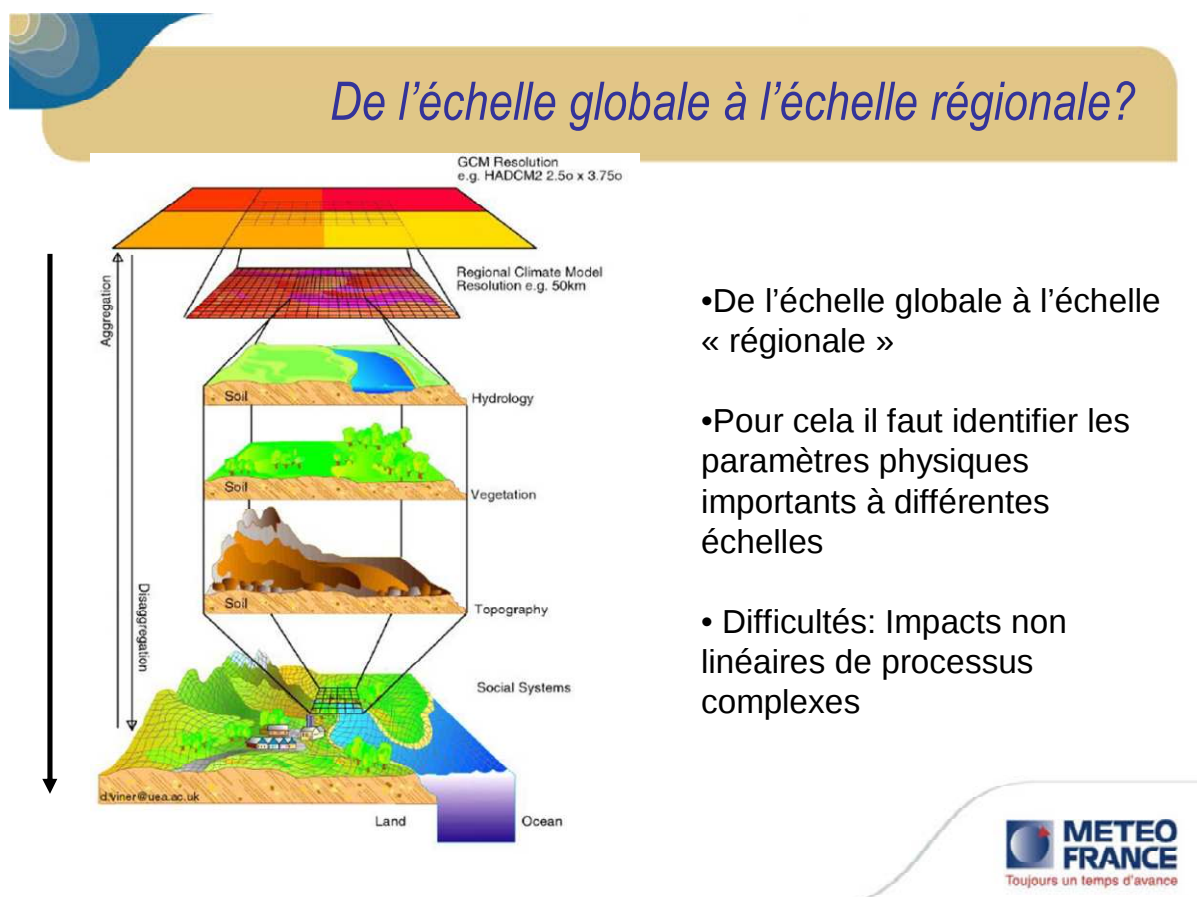


Figure 1. Le passage de l'échelle globale à l'échelle régionale et ses difficultés.
D'après Pascale Delécluse, MétéoFrance.

D'autre part, et particulièrement pour les systèmes marins, dans les variations observées, il faut être capable de faire la part de la variabilité climatique naturelle et celle du changement d'origine anthropique. Ceci est possible si l'on dispose de longues séries d'observation. C'est particulièrement le cas pour l'Atlantique Nord et pour les régions de la bordure ouest du continent européen dont le climat tempéré résulte de l'influence combinée des flux atmosphériques et marins.

En Europe occidentale et sur l'Atlantique Nord, une des principales sources de variabilité climatique vient du balancement du couple météorologique constitué par la zone de hautes pressions centrée sur les Açores et celle de basses pressions habituellement localisée sur l'Islande. La fluctuation de cette Oscillation Nord Atlantique (NAO) est suivie et quantifiée de longue date (Figure 2).

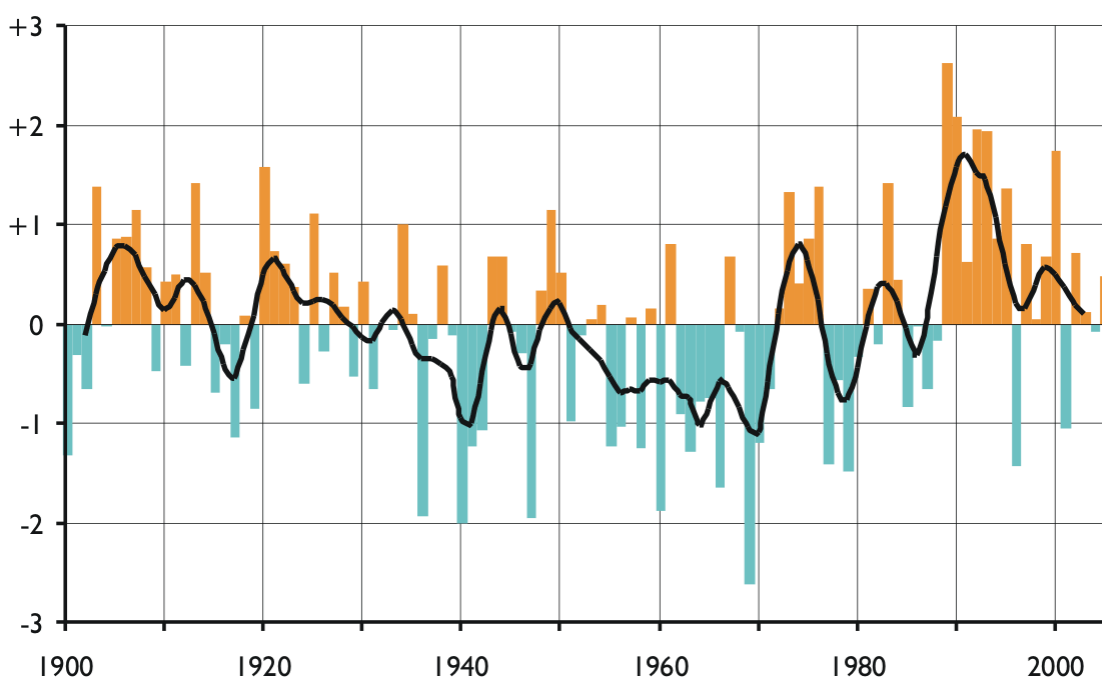


Figure 2. L'Oscillation Nord Atlantique (NAO) traduit la variabilité de la différence de pression entre l'Anticyclone des Açores et la zone dépressionnaire de l'Islande.

Quand l'indice est positif (au-delà de la différence moyenne de pression prise égale à zéro), les vents d'ouest sont forts en hiver et l'Europe occidentale bénéficie d'hivers doux mais particulièrement arrosés. Quand l'indice est négatif, c'est l'inverse (http://en.wikipedia.org/wiki/North_Atlantic_Oscillation).

On remarque l'amplitude de l'anomalie positive à la fin du 20^{ème} siècle sans qu'il soit actuellement possible de la relier au changement climatique global.

Le système météorologique qui impacte le climat de l'ouest de la France n'est cependant pas sous l'influence de ce seul binôme : d'autres formations anticycloniques centrées sur la Sibérie ou sur des latitudes plus méridionales peuvent impacter le climat local. La notion de « type de temps » est désormais utilisée pour caractériser la variabilité climatique à l'échelle régionale.

En sus de la NAO dont la variabilité est à l'échelle pluriannuelle, il faut mentionner le rôle de l'Oscillation Atlantique multidécennale (AMO, Figure 3). Il s'agit d'un phénomène océanique qui se développe à grande échelle en engendrant une variation de la température de surface de la mer qui peut atteindre 0,4°C (voir aussi Enfield et al. 2001, Keenlyside et al. 2008).

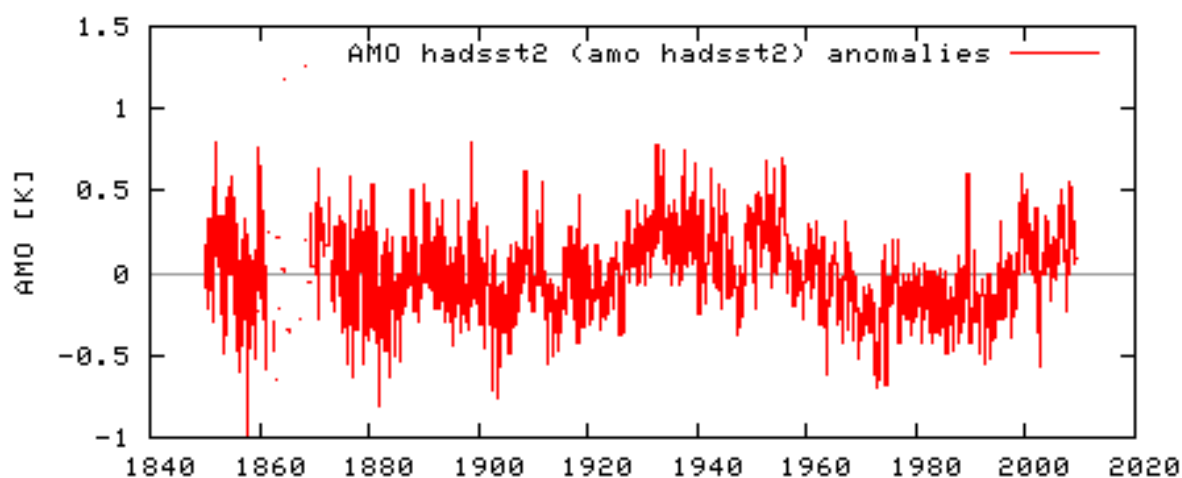


Figure 3. L'Oscillation Atlantique multidécennale (AMO) est un phénomène océanique à grande échelle qui engendre une variation de la température de surface de l'ordre de 0,4°C. L'indice de l'AMO ici représenté a été calculé par E. Goberville (comm. pers.) pour la zone 25-60°N et 7-75°W, selon <http://climexp.knmi.nl/>.

S'agissant de l'impact du changement climatique sur les écosystèmes marins de l'Atlantique Nord, dispose-t-on de séries temporelles suffisamment longues pour déconvoluer les effets respectifs de la variabilité climatique naturelle, par exemple due à la NAO, et du réchauffement climatique ? La réponse est positive pour ce qui est d'une partie du plancton. En effet, grâce à Sir Alister Hardy, qui développa l'usage du Continuous Plankton Recorder (CPR, <http://www.sahfos.ac.uk/>) à bord des navires traversant l'Atlantique Nord dès les années 1930, nous disposons de séries suffisantes pour caractériser l'évolution du macro-zooplancton depuis plusieurs décennies et pour montrer les conséquences du réchauffement sur la distribution des espèces planctoniques (Figure 4).

Beaugrand et al. (2003) ont montré les conséquences de la dérive vers le nord des espèces tempérées de copépodes pour les larves de cabillaud. Celles-ci ne trouvent plus sur leurs aires de développement, au bon moment (phénomène dit de « mismatch »), la nourriture adéquate. Elles dépérissent, avec *in fine* un impact sur les pêcheries de cabillaud (= morue). Une telle perturbation se couple à la surexploitation des stocks pour expliquer l'effondrement des pêches de cabillaud de l'Atlantique Nord.

Ce rapport a pour objectif de répondre à trois questions :

- 1 - Un changement climatique est-il à l'œuvre en Bretagne ?
- 2 - Quelles sont les preuves d'impacts du changement climatique sur les écosystèmes marins côtiers ?
- 3 - Peut-on prévoir les impacts à long terme ?

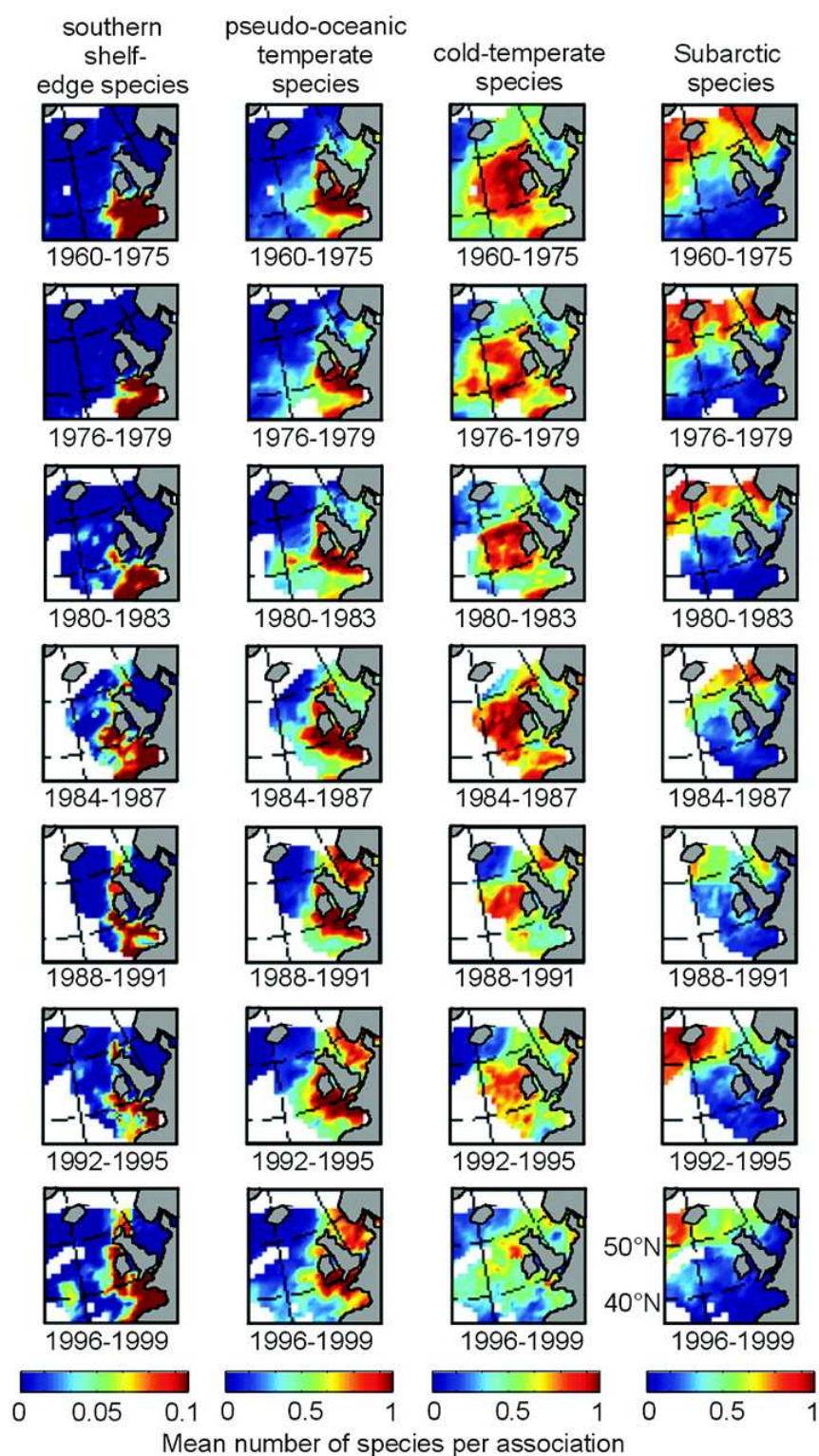


Figure 4. Impact du changement climatique sur la répartition de différents groupes de macro-zooplankton dans l'Atlantique du Nord-Est : depuis une cinquantaine d'années les espèces tempérées ont tendance à migrer vers le nord, réciproquement les espèces subarctiques se replient vers le nord. Beaugrand *et al.* 2002.

I. Le climat est-il en train de changer en Bretagne ?

I.1- Évolution de la température moyenne

I.1-1. À la surface de la Terre ou des continents

A l'échelle globale, la température annuelle moyenne à la surface de la Terre a augmenté de 0,76°C depuis le début de l'ère industrielle. De 1906 à 2005 (Figure 5), cette augmentation est de 0,74°C (ou entre 0,56°C et 0,92°C pour tenir compte des marges d'incertitudes) entre 1906 et 2005.

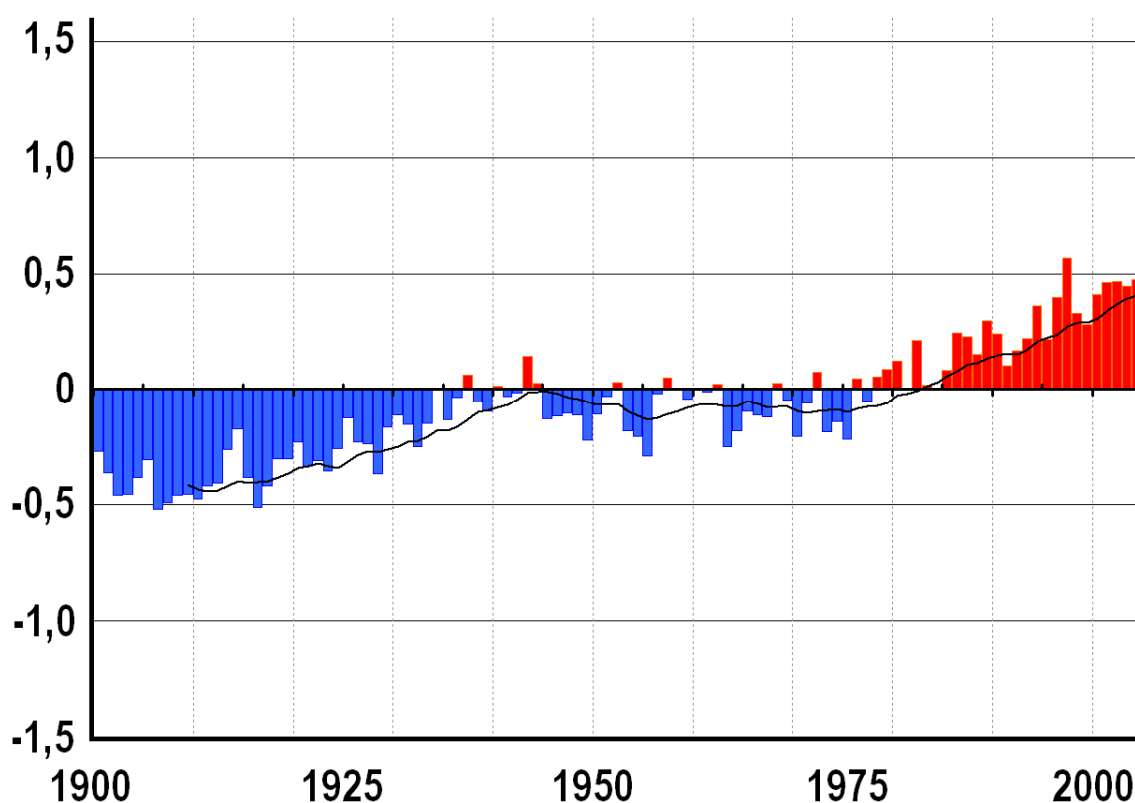


Figure 5. Variation de la température moyenne annuelle de surface de la Terre depuis 1900. Les années 90 ont été la décennie la plus chaude, et 1998 l'année la plus chaude, depuis que l'on tient des relevés, c'est-à-dire depuis 1861. Source : MétéoFrance.

Le réchauffement devient de plus en plus rapide avec 0,13°C/décennie pour les derniers cinquante ans, 11 des 12 dernières années ont été les plus chaudes depuis 1850.

Pour la France (Figure 6), la variation de la température suit le signal global (Figure 5) mais avec une amplitude deux fois plus grande.

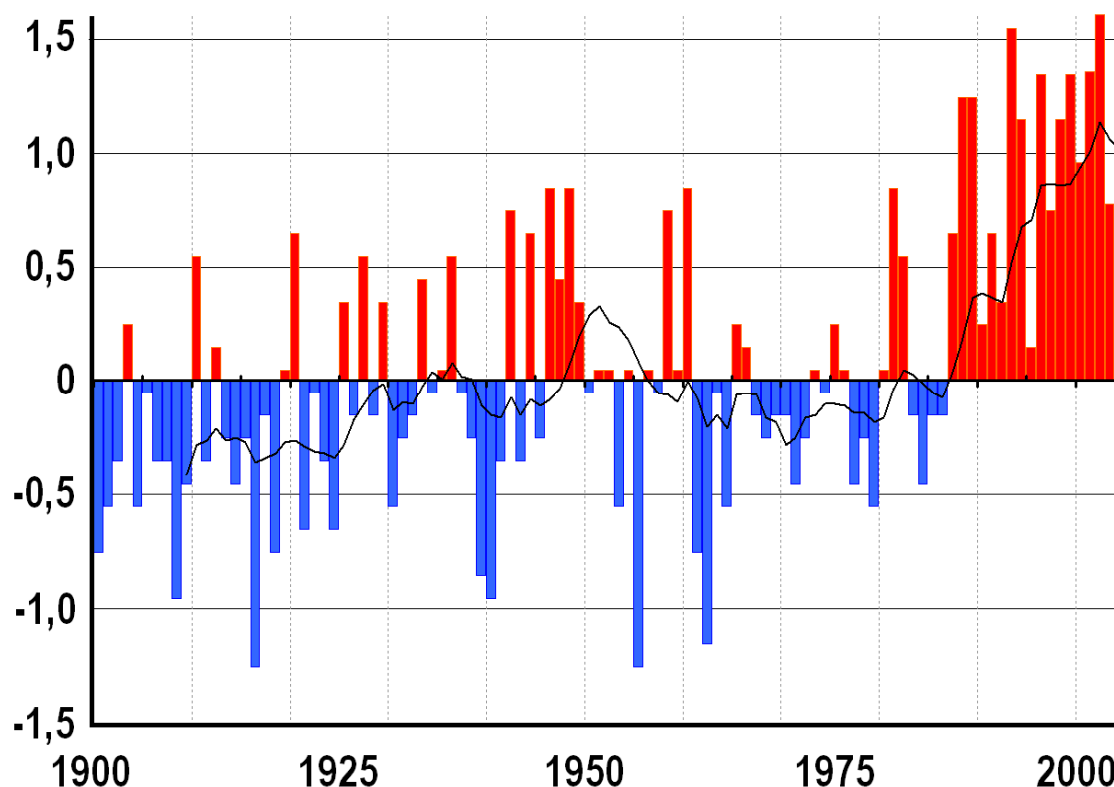


Figure 6. Variation de la température moyenne annuelle de surface pour la France depuis 1900.
Source : MétéoFrance.

Pour la Bretagne, nous ne disposons pas de séries temporelles d'aussi longue durée qu'au niveau national. Toutefois, les données publiées par MétéoFrance montrent que l'évolution thermique va dans le même sens (Figure 7) que celle observée au niveau national. Ainsi, la température moyenne sur la période 1997-2006 a été plus élevée que celle observée pendant les 30 années 1971-2000.

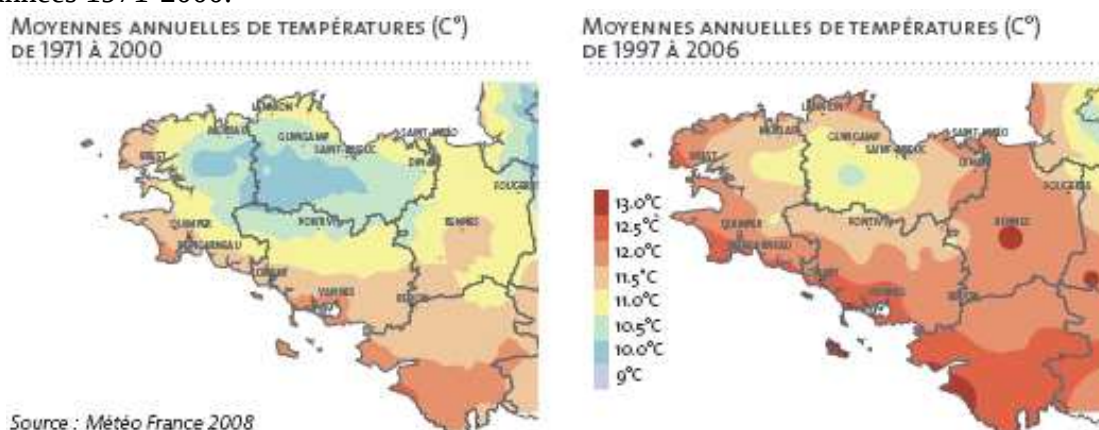


Figure 7. Températures moyennes annuelles pour les périodes de 1971-2000 et 1997-2006.
Source & © : MétéoFrance

Selon MétéoFrance, les températures de fin de nuit ont tendance à augmenter plus rapidement que celles de l'après-midi. Ces nuances se traduisent par une baisse du nombre de jours de gelées, de l'ordre de 25 % dans l'intérieur des terres. En été, les jours de chaleurs sont plus

fréquents : à Rennes, au cours des 20 dernières années, le thermomètre a franchi les 25°C sous abri en moyenne 43 jours contre 26 jours sur la période 1951-1980 (Figure 8).

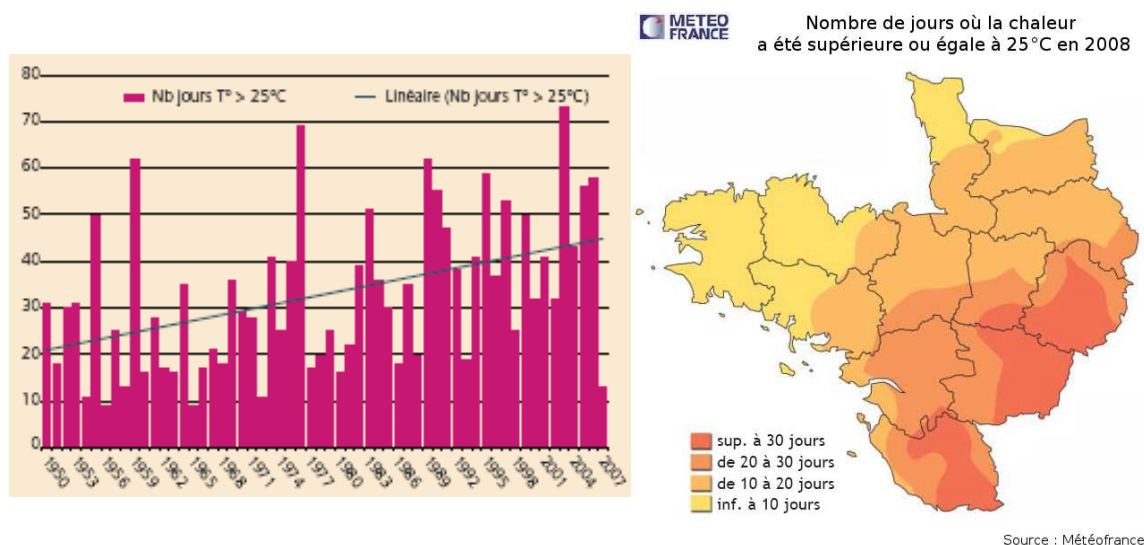


Figure 8. Evolution du nombre de jours où la température a franchi les 25°C sous abri à Rennes-Saint-Jacques (gauche) et Nombre de jours où la chaleur a été supérieure ou égale à 25°C en 2008.
Source & © : Météofrance

A l'échelle locale, pour la station de Lanvéoc (Finistère) située à proximité immédiate de la mer, au cours des dernières cinquante années, la température de l'air présente une tendance à la décroissance jusqu'aux années 1980 (Figure 9), suivie d'une augmentation de la température au cours de la fin du 20^{ème} siècle, en cohérence avec l'évolution thermique observée aux niveaux régional, national et global.

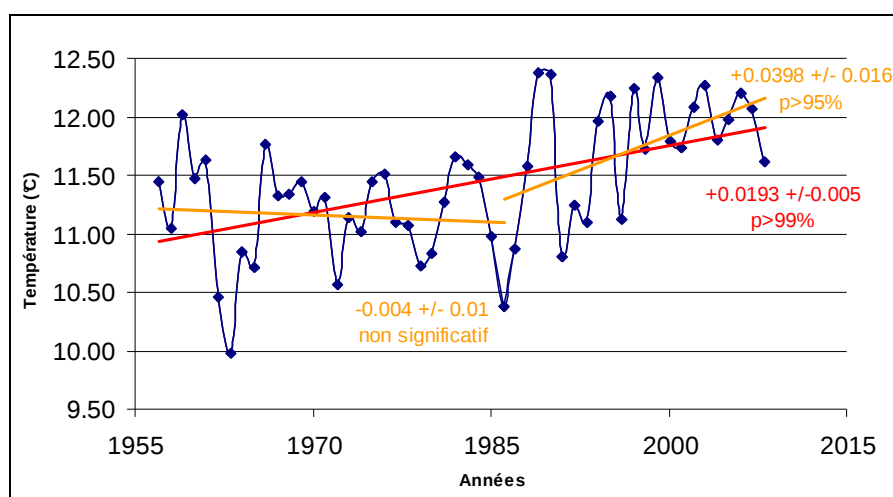


Figure 9. Evolution de la température moyenne annuelle au sol dans le Finistère, à la station Météofrance de Lanvéoc sur la période 1957-2008. Données: Météofrance

I.1-2. À la surface de l'océan

Tant à l'échelle **globale** qu'à celle de l'**hémisphère nord**, l'océan a connu une élévation de sa température de surface depuis les dernières décennies (Figure 10a). On observe aussi cette élévation pour l'hémisphère nord (Figure 10c). Cette augmentation de température n'est pas limitée à la surface mais concerne l'ensemble des couches superficielles de l'océan. Ainsi selon Levitus et al. (2000), une élévation de la température de 0,4°C dans les 300 premiers mètres de l'Atlantique Nord est mesurée au cours des deux dernières décennies.

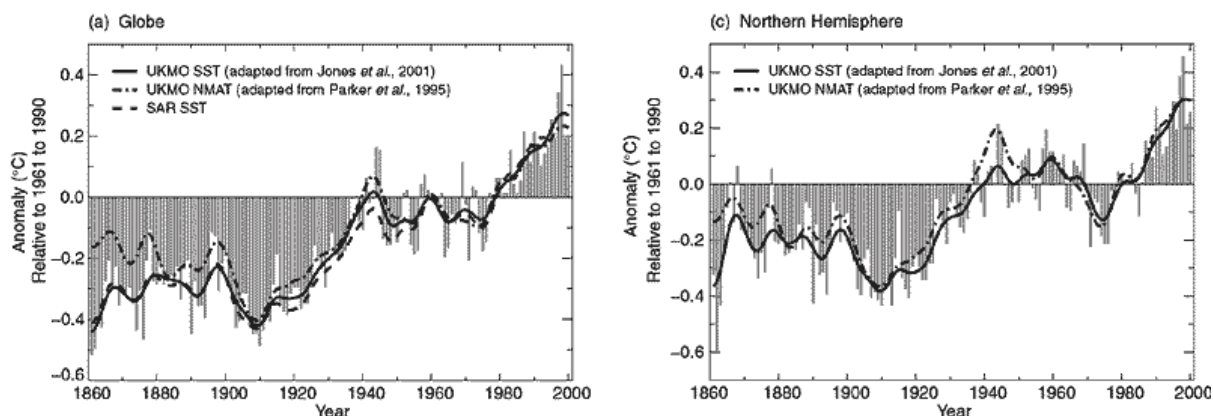


Figure 10. Evolution des températures de surface de l'océan pour la période de 1861 à 2000, au niveau global (a) et au niveau de l'hémisphère nord (c). Source & © : Météofrance.

Dans les eaux environnantes ou proches de la péninsule armoricaine : plusieurs études à l'échelle régionale montrent la variabilité de la température de surface pour de longues séries temporelles (Figures 11, 12, et 13). Une tendance à l'augmentation au cours de la fin du 20^{ème} siècle est mise en évidence pour le golfe de Gascogne (Blanchard et Vandermeirsch, 2005 ; Planque et al., 2003 ; Esnault, S., 2004), pour la Manche (Hawkins et al. 2003 ; Planque et al., 2003 ; Esnault, S., 2004) et pour la mer du Nord (Genner et al, 2004 ; Pery et al., 2005).

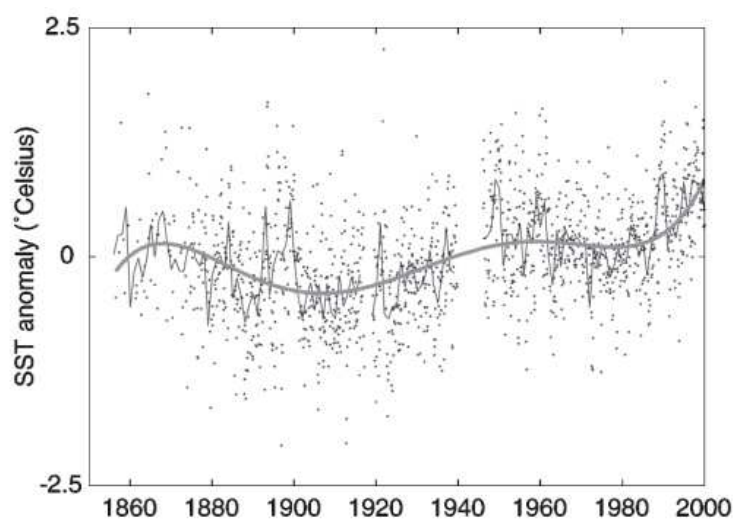


Figure 11. Anomalies de température de surface dans le golfe de Gascogne à partir des données du COADS. Les points indiquent des anomalies mensuelles ; la ligne fine montre les anomalies annuelles et la ligne en gras la tendance à long terme estimée par une régression polynomiale. Au cours du 20^{ème} siècle la température moyenne a augmenté de 1,03°C.

Source : Planque et al. 2003 ; Données : COADS (Comprehensive Ocean Atmosphere Data Service – National Climatic Data Center (NCDC) – National Environmental Satellite, Data and Information Service (NESDIS) – National Ocean Atmosphere Administration (NOAA)

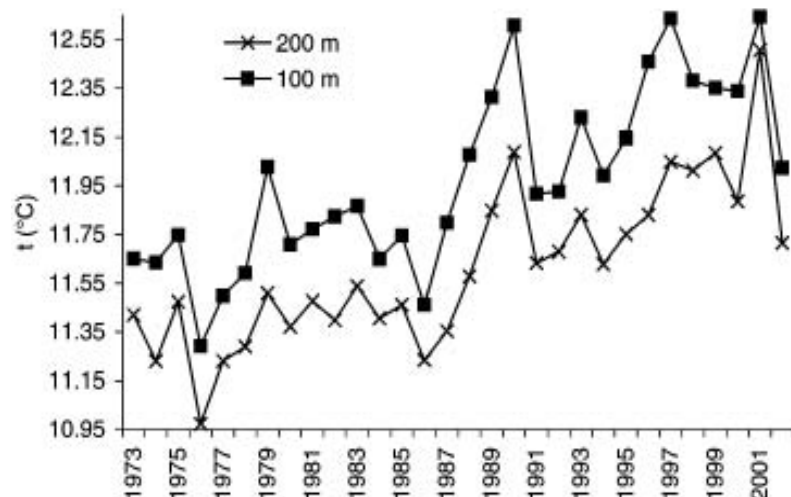


Figure 12. Variations temporelles de la température moyenne dans le golfe de Gascogne, de 1974 à 2002, en été (juin à août), à 100 et 200 m de profondeur. Données acquises (environ 20 mesures par an) dans la zone située entre 43° et 48°N et entre la ligne de côte et 5°E, soit 867 stations. Source : Blanchard et al. 2005

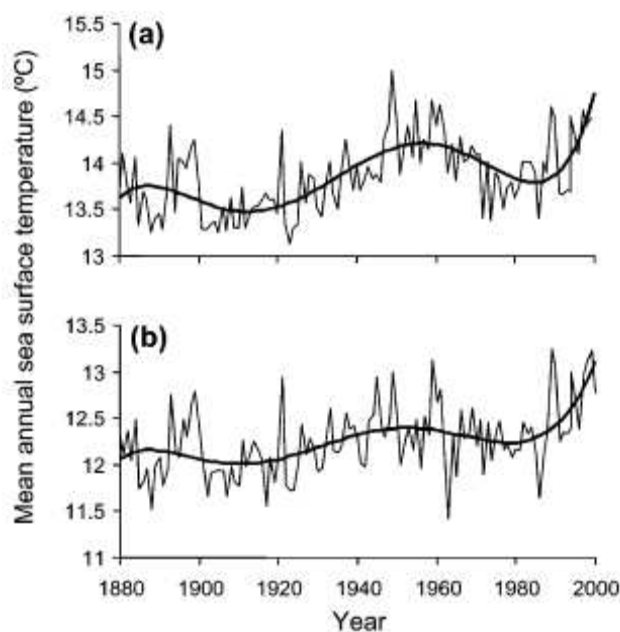


Figure 13 : Variation de la température de surface moyenne annuelle a) au nord du golfe de Gascogne et b) dans l'ouest de la Manche, au large de Plymouth. Source : Hawkins et al. 2003 ; Données : Hadley Centre for Climate Prediction and Research (<http://www.badc.rl.ac.uk>)

En mer d'Iroise : Esnault (2005) analyse l'évolution comparée de la température mesurée par 4 bouées de MétéoFrance (Figure 14) dans les eaux de Bretagne méridionale, occidentale, et dans celles de la Manche.

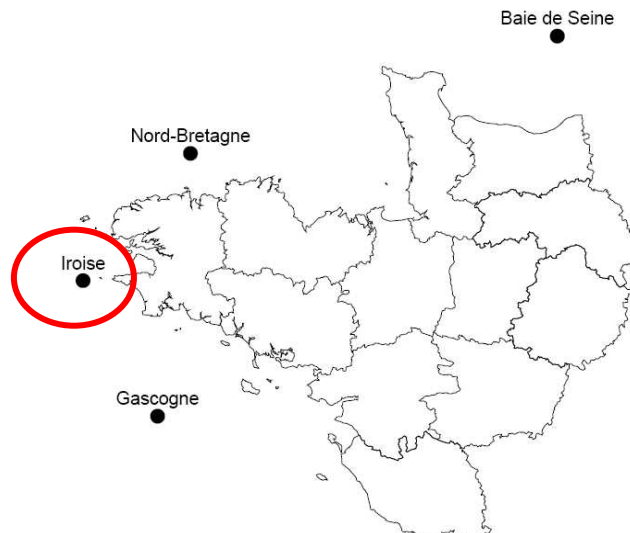


Figure 14. Sites des bouées MétéoFrance ; le point Iroise est situé à 48°N, 5°O. Source : Esnault, 2004

Le point Iroise se caractérise par une forte variabilité des températures moyennes annuelles (Figure 15) sur la période d'étude (1958-2004) sans tendance nette au réchauffement, même si une augmentation de plus de 1°C est enregistrée sur la période 1993-2004.

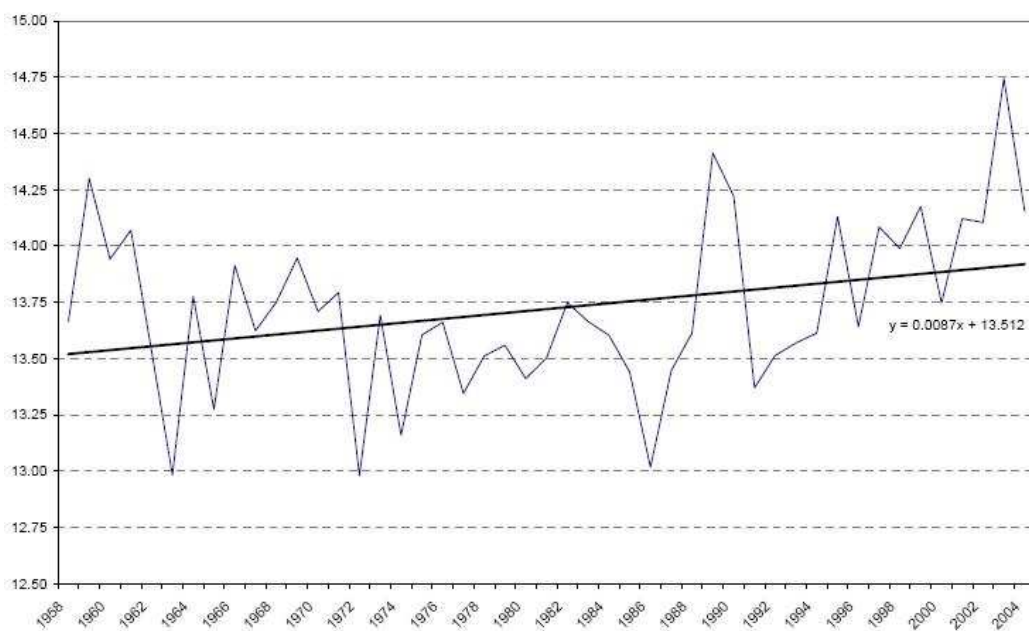


Figure 15. Variation des moyennes annuelles de température de surface de la mer d'Iroise entre 1958 et 2004. Source : Esnault (2004) ; Données : MétéoFrance.

En conclusion, malgré l'absence de séries d'observation de durée aussi longues que celles disponibles au niveau global, les données de séries locales actuelles (cohérentes avec celles initiées à Plymouth en 1903), permettent de **retenir l'hypothèse d'une élévation de la température moyenne annuelle des eaux environnant la péninsule armoricaine, de l'ordre de plusieurs dixièmes de degré, voire au-delà, au cours des dernières décennies.**

I.2- Le niveau de la mer a-t-il monté ?

Avec plus de cent années d'enregistrements de marégraphes, Brest et Marseille possèdent, en France, les données requises pour mettre en évidence une variation à long terme du niveau de la mer. En effet, les fluctuations locales des niveaux moyens annuels sont telles qu'une tendance ne peut être détectée que si la durée des observations est voisine du siècle.

Le réseau RONIM (http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_oceano/maree/maree14.htm) du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) met en évidence à Brest une élévation moyenne estimée à 1 mm par an pour la période 1806-2006. Plusieurs interruptions et notamment celle de 1940 à 1944 (après le bombardement de la ville) peuvent cependant mettre en question la continuité des données acquises à Brest. Ainsi, par rapport à Newlin (Cornouaille britannique) situé à 200 km au nord de Brest, une surcote de 19 mm pour Brest apparaît en 1944 (Wöppelmann et al., 2008). L'origine de cette différence n'est pas à ce jour totalement identifiée. Les données de Brest sont par contre proches de celles enregistrées à Liverpool au cours des 200 ans d'observation. Quoi qu'il en soit une tendance à l'augmentation du niveau de la mer au cours du 20^{ème} siècle est clairement détectée à la fois à Brest, Newlin et Liverpool (Wöppelmann et al., 2008).

Le signal observé à Brest (Figure 16) est affecté par des oscillations à l'échelle pluriannuelle avec une amplitude pouvant atteindre 50 mm. Pendant les 100 premières années (1807-1908), l'élévation moyenne du niveau de la mer est peu significative et peut être estimée à environ 0,2 mm par an (Figure 16). Elle devient plus importante à partir de 1908 (et jusqu'en 2006) avec une tendance moyenne à une augmentation d'environ 1,2 mm par an (Figure 16).

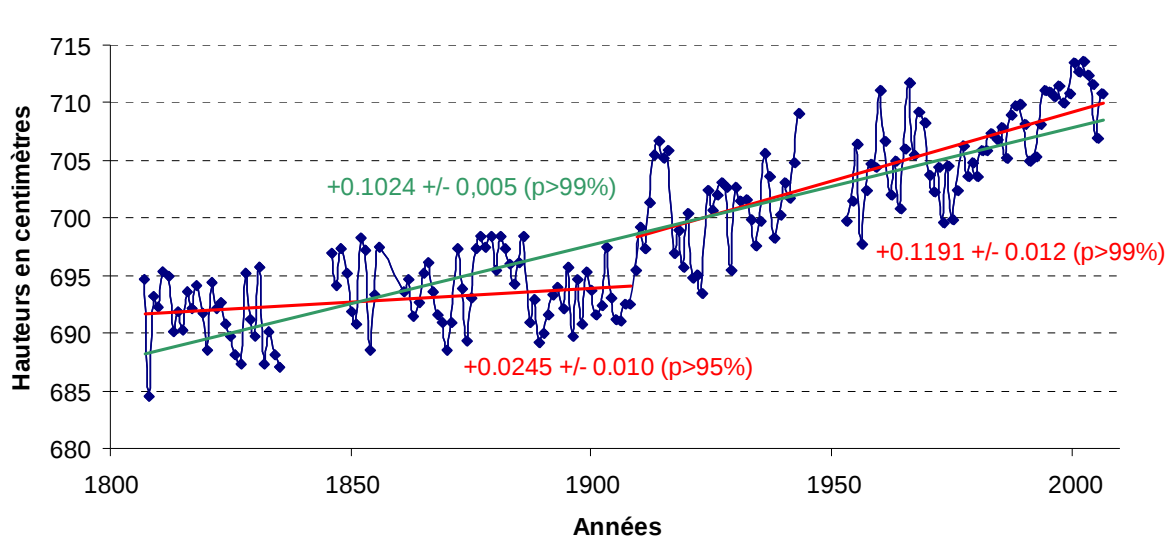


Figure 16. Evolution du niveau de la mer à Brest au cours des 19^{ème} et 20^{ème} siècles. Les régressions linéaires montrent une élévation du niveau moyen de 1 mm par an sur l'ensemble de la période de mesure (1806-2006). L'élévation moyenne est très faible pendant le 19^{ème} siècle et ne devient significative qu'au cours du 20^{ème} siècle (environ 1,2 mm par an). Source SHOM & Permanent Service for Mean Sea Level – Proudman Oceanographic Laboratory (POL), Natural Environment Research Council (NERC).

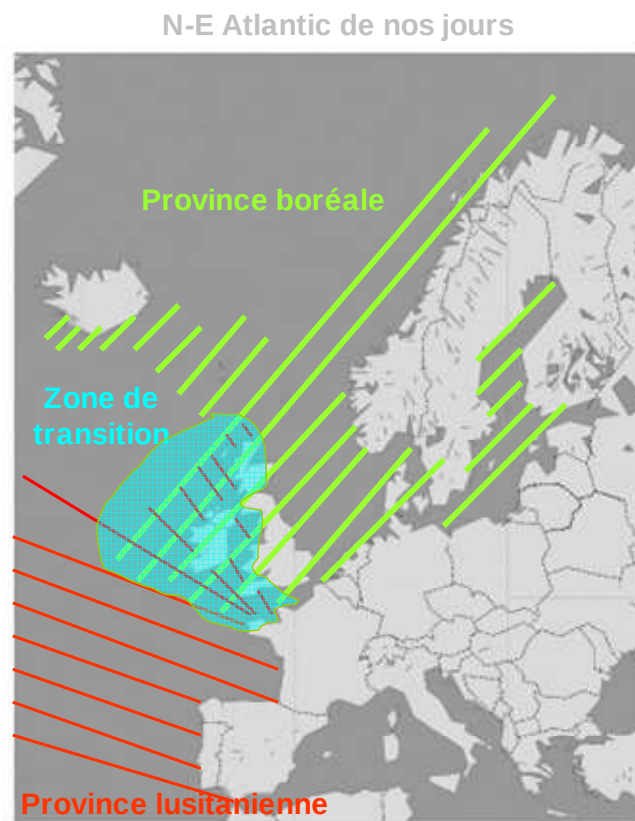
L'élévation moyenne au niveau global est selon le GIEC de l'ordre de 1 à 3 mm par an. Elle résulte de différents processus (dilatation de l'eau de mer, fonte des glaciers terrestres, fonte des calottes glaciaires, etc). Régionalement, le niveau de l'eau est également affecté par la circulation océanique. Ainsi, dans l'Atlantique Nord, le niveau de la mer est normalement plus élevé à New York par rapport à Brest, du fait de la circulation anticyclonique à l'échelle du bassin. Le niveau local net de la mer peut varier sous l'action d'une modification du niveau de l'eau et/ou de celui du continent en raison de processus géologiques ou tectoniques

(rebond post-glaciaire, subsidence, etc...) dont les oscillations peuvent dépasser une amplitude supérieure au millimètre par an (Regnault et Dubreuil, 1998). S'agissant du niveau moyen local, ces phénomènes ont un impact suffisamment lent pour que l'on puisse considérer que l'élévation du niveau de la mer enregistrée à Brest résulte de processus essentiellement liés au réchauffement climatique.

En conclusion, **la montée du niveau de la mer en Bretagne est déjà une réalité**. Elle s'effectue en moyenne **actuellement** à la hauteur du **millimètre par an**, hors événements exceptionnels de surcote.

II. Des impacts du réchauffement climatique sur les écosystèmes marins sont-ils détectés ?

L'environnement marin attenant au massif armoricain présente une situation très originale car c'est l'unique *zone de transition biogéographique* (i.e. changement des espèces dominantes entre provinces biogéographiques adjacentes) à l'échelle de la façade Atlantique et de la Manche-mer du Nord française. Le massif armoricain se situe en effet aux limites des provinces boréale et lusitanienne (Figure 17).



D'après Briggs 1974

Figure 17. Pour les écosystèmes marins, les eaux environnant le massif armoricain représentent une zone de transition entre la province lusitanienne et la province boréale.

Deux points importants découlent de cette situation :

- (1) Les eaux environnant 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 (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.

Les limites respectivement nord et sud des distributions géographiques des espèces caractéristiques des provinces boréale et lusitanienne connaissent des fluctuations pluridécennales, attribuables à une variabilité environnementale naturelle directement influencée par les conditions climatiques. La plupart des séries d'observations biologiques dans les eaux voisines du massif armoricain n'ont pas une durée suffisante pour permettre de déconvoluer, dans la variabilité observée, la part de la variabilité climatique naturelle et celle due au réchauffement climatique, à l'exception des séries CPR-SAFHOS disponibles, déjà mentionnées pour le macrozooplancton (Figure 3).

Le changement climatique n'est qu'une facette du changement global. L'angle thermique n'est évidemment pas le seul à prendre en considération sur notre zone d'étude. La réponse des organismes marins aux changements climatiques dépend en effet des autres changements induits par les activités humaines, au premier rang desquelles se trouvent la pêche et les introductions d'espèces exotiques. La synergie entre le facteur thermique et d'autres facteurs anthropiques, abiotiques ou non, peut démultiplier l'impact de ce seul facteur thermique. Par exemple, la surpêche de poissons des niveaux trophiques supérieurs modifie l'ensemble du réseau trophique et fragilise les écosystèmes marins concernés. De même, les espèces introduites depuis des aires géographiques plus chaudes, notamment pour les besoins de l'aquaculture, pourraient proliférer du fait de l'augmentation de température. En effet, outre leur adaptation aux nouvelles conditions environnementales, ces espèces peuvent bénéficier des conditions thermiques qui leur sont plus favorables (plus proches des conditions rencontrées dans leur aire d'origine, Stachowicz et al. 2005).

Par leur évolution et leur adaptation, les espèces ont répondu dans le passé aux changements environnementaux naturels. La question à présent est de savoir si ces espèces pourront faire face aux changements actuels qui se produisent sur des échelles de temps très courtes. Que ce soit pour des espèces natives (locales) ou introduites, la capacité d'adaptation des espèces soumises aux changements climatiques dépend notamment:

- (1) des temps de génération (plus ils sont courts, plus l'adaptation sera rapide ; exemple : organismes planctoniques),
- (2) 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),
- (3) 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,

- (4) 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 du NW).

La plupart des séries d'observations sur les organismes pélagiques et benthiques vivant dans les eaux environnant la péninsule armoricaine menées par les stations marines n'ont pas été conçues pour tester l'effet du changement climatique et les réponses des espèces des milieux côtiers en Bretagne. Aucune n'est réellement assez longue pour permettre un diagnostic non affecté d'incertitude.

Les exemples ci-dessous nous semblent cependant suffisamment probants pour démontrer l'impact à l'œuvre du changement climatique sur notre zone d'étude.

II.1- Déplacement des limites nord d'aires de répartition d'organismes marins.

II.1-1. Déplacement vers le nord deux espèces de poisson à affinité tropicale (Quéro et al. 1998)

Zenopsis conchifer

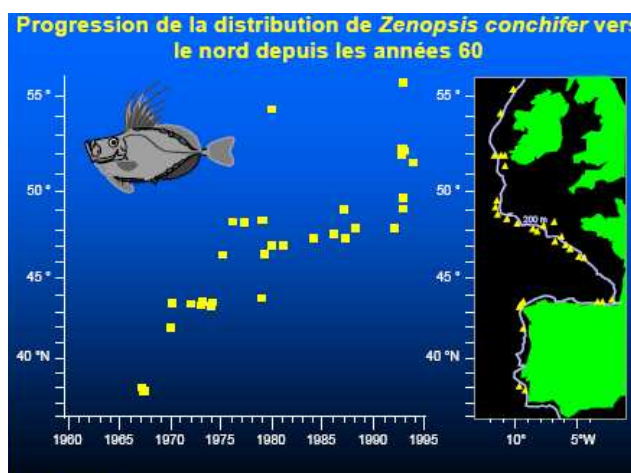


Figure 18. De 1967 à 1995, la limite nord de la répartition de l'espèce *Zenopsis conchifer* s'est déplacée du golfe de Cadix au nord de l'Irlande.

Cyttosis roseus

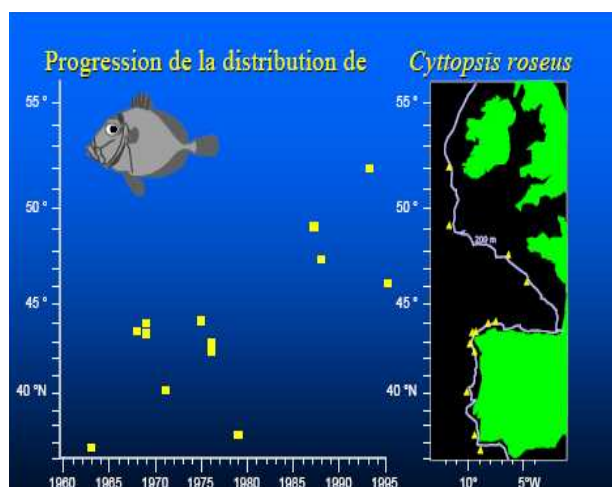


Figure 19. De 1962 à 1995, la limite nord de la répartition de l'espèce *Cyttosis roseus* est remontée en latitude du golfe de Cadix au sud de l'Irlande.

II.1-2. Expansion vers le nord du gastéropode d'origine méditerranéenne *Cyclope neritea*

Dans les années 1970, l'espèce apparaît en forte densité dans le Bassin d'Arcachon puis se propage vers le nord dans les années 1980-90 (Bachelet et al. 2004). Au début des années 2000, l'espèce est répertoriée en baie de Morlaix. 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) dans 18 populations de l'aire dite « naturelle » (i.e. Méditerranée, mer Adriatique, mer Noire) et françaises a permis de montrer que les populations françaises étaient issues d'introductions répétées depuis différentes sources (génétiquement différenciées) localisées dans l'aire naturelle de cette espèce. Ainsi, l'expansion vers le nord de ce gastéropode est en premier lieu à mettre en relation avec des effets d'introduction (échanges de naissains d'huîtres entre bassins conchylicoles). 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.

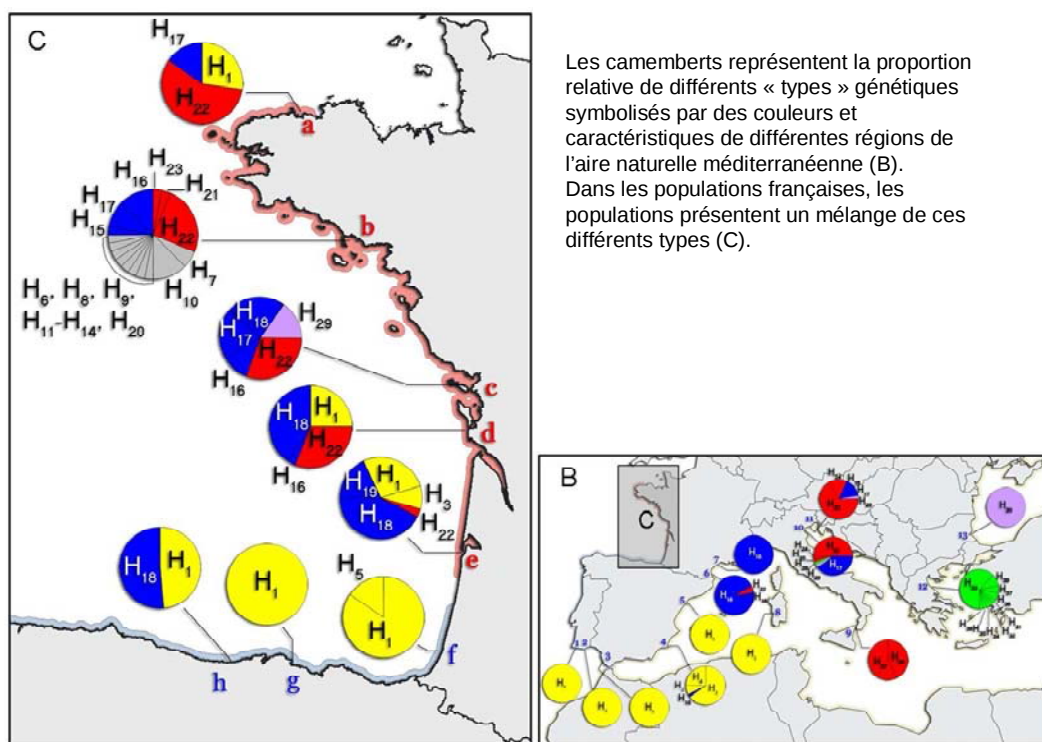


Figure 20. Des années 1970 à 2000, expansion vers le nord (du bassin d'Arcachon à la baie de Morlaix) du gastéropode d'origine méditerranéenne *Cyclope neritea*.

II.2- Conséquence de la modification de la température en période de reproduction pour le développement des organismes.

II.2.1. Abondance de *Capros Aper* dans le golfe de Gascogne

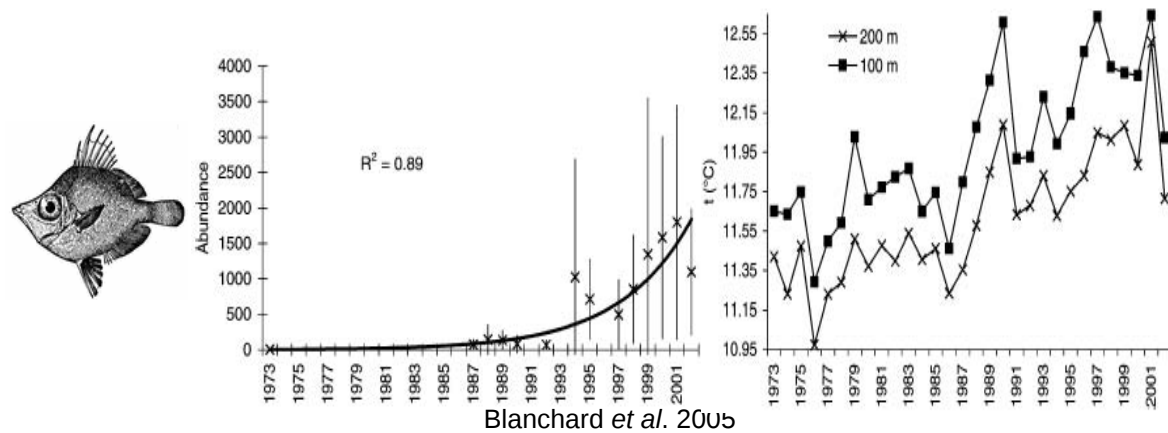


Figure 21. Augmentation de l'abondance de *Capros Aper* dans le golfe de Gascogne liée à l'augmentation de la température pendant la période de reproduction (Blanchard *et al.* 2005)

II.2.2. Colonisation du littoral Atlantique et de la Manche par l'huître creuse du Pacifique *Crassostrea gigas*

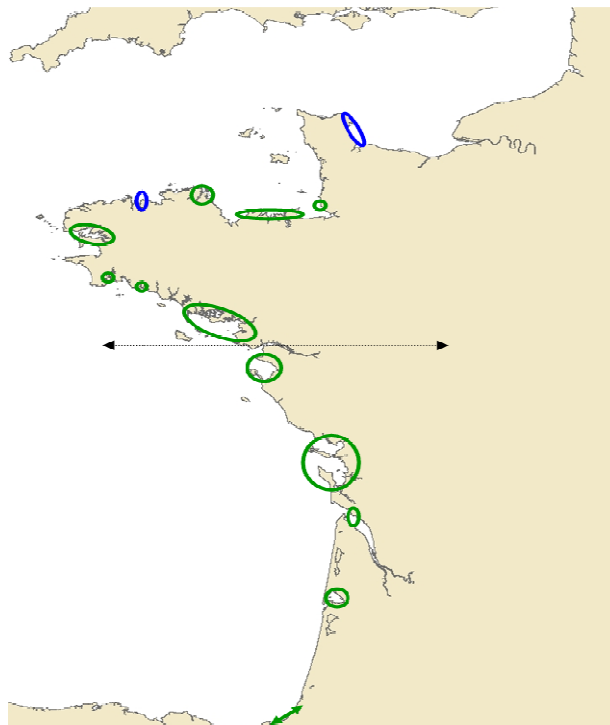


Figure 22. Premiers sites colonisés par l'huître creuse en France en 1990 (www.progig.fr)

L'huître creuse du Pacifique, *Crassostrea gigas*, est élevée en France depuis les années 70 pour pallier à l'effondrement des stocks des autres espèces : l'huître « portugaise », *Crassostrea angulata* et l'huître « plate » *Ostrea edulis*. Introduite massivement notamment sur la façade atlantique, 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. La survie des larves dans des conditions thermiques et halines favorables a conduit rapidement à la constitution de populations «sauvages». Elles sont installées principalement sur les estrans rocheux, mais parfois aussi en estran meuble à partir de fixation sur des supports coquilliers ou rocheux dispersés. D'abord cantonnée aux abords directs des concessions ostréicoles, la prolifération s'est également produite en Bretagne et en Normandie, d'abord très ponctuellement à l'occasion de périodes estivales favorables dans quelques sites très abrités : fonds de baies (rade de Brest...), rias (Aven, Belon...), estuaires (Trieux)...

Aujourd'hui le phénomène s'est accéléré et on peut véritablement parler d'une invasion de certains secteurs par cette espèce qui peut recouvrir entièrement les substrats sous-jacents. En France, l'invasion s'étend des côtes Ouest de la Manche à la façade atlantique, principalement sur les côtes rocheuses, n'épargnant que certaines zones. D'autres zones d'Europe sont également concernées, comme l'Angleterre (quelques sites en Cornouaille, au pays de Galles et sur les côtes de la mer du Nord) et les Pays-Bas (mer de Wadden et lacs salés hollandais). A l'échelle des côtes Manche - Atlantique françaises, le programme PROGIG² a testé deux hypothèses pour identifier les causes principales des modifications de l'aire de distribution de l'huître japonaise: (1) le réchauffement de l'eau dû aux changements climatiques, (2) une adaptation de l'espèce de type phénotypique et/ou génotypique. La thèse de L. Mestertzheim (2008) a clairement montré que la deuxième hypothèse était exclue.

En conclusion, les données actuelles montrent que le réchauffement climatique en cours serait impliqué dans la **modification de l'aire de répartition de plusieurs espèces de poissons et de mollusques** dont l'huître japonaise introduite pour des fins aquacoles.

III. Que peut-on prévoir au cours du 21^{ème} siècle ?

Selon le GIEC, la température moyenne annuelle à la surface de la Terre devrait augmenter de 1 à 6 °C selon les scénarios économiques et démographiques envisagés. Les prévisions à l'échelle régionale restent actuellement peu précises. S'agissant de l'Europe occidentale dont le climat est impacté par la circulation atmosphérique et océanique de l'Atlantique Nord. Une modification de la circulation anticyclonique océanique (ralentissement du Gulf Stream et de la dérive nord Atlantique) ne provoquerait pas un refroidissement mais modérerait le réchauffement généralisé dans la bande de latitude comprise entre 40 et 60°N.

III.1- Comment pourrait évoluer la température ?

MétéoFrance fournit à titre expérimental une simulation des prévisions du changement climatique à l'échelle nationale. Ce simulateur, développé en collaboration avec le magazine *Sciences et Vie*, reproduit les conséquences climatiques en France métropolitaine pour la période 2050-2100. Il ne s'agit pas de prévisions météorologiques mais, en dépit des

² Observatoire de la PROlifération de l'huître creuse sauvage *Crassostrea GIGas*. <http://www.progig.fr/>

incertitudes liées à l'imperfection du modèle et au caractère chaotique de l'évolution du système climatique, on dispose ici d'une estimation plausible du climat du futur. Il faut donc s'attacher à considérer la **tendance globale de l'évolution des paramètres climatiques** et non pas le résultat spécifique pour une année ou une saison en particulier.

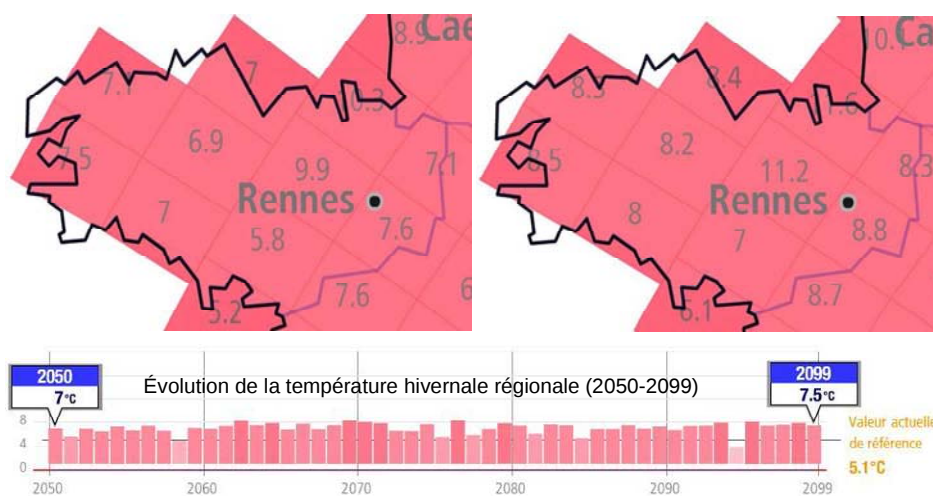
Deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre sont pris en considération. Ces scénarios du GIEC reposent sur un ensemble d'hypothèses d'évolution de la population et de l'économie mondiale. Le scénario modéré (B2)³ correspond à une augmentation moins rapide qu'aujourd'hui des émissions de gaz à effet de serre. Le scénario intensif (A2)⁴ se traduit par une augmentation des émissions de gaz à effet de serre proche de celle d'aujourd'hui.

Le simulateur donne de 2050 à 2099 la variation des températures maximales et minimales en °C, les précipitations moyennes en mètre par jour, le rayonnement solaire en W par m² et les réserves aquatiques du sol en kg par m².

Si nous retenons le scénario A2, selon MétéoFrance, la température moyenne hivernale augmentera de 0,5 °C et la température estivale de 3,7°C, entre 2050 et la fin du siècle. Les variations locales peuvent, le cas échéant, être plus importantes.

Ce type de simulation doit être considéré comme très préliminaire car il ne répercute pas l'ensemble des processus impliqués (ex. modification de la circulation générale sur l'Atlantique Nord) à cette échelle de temps dans le changement climatique. Il a l'avantage de délivrer un message qualitatif clair : au cours du 21^{ème} siècle, on doit s'attendre à ce que **les températures annuelles moyennes, minimales et maximales varient à la hausse** sur l'ensemble du massif armoricain et dans les eaux environnantes.

Température - Simulateur climatique MétéoFrance - Hiver 2050 à 2099



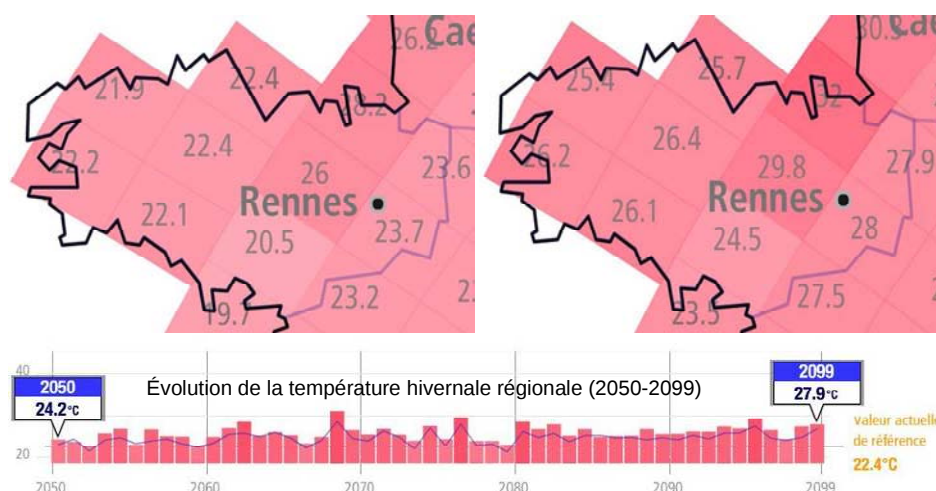
- Régional: +0,5°C entre 2050 et 2099
- On peut aussi avoir des variations plus importantes au niveau local.

Figure 23. Simulateur MétéoFrance-Péninsule armoricaine : évolution de la température moyenne hivernale de 2050 à 2099

³ Le scénario "régional" (ou B2) décrit un monde recherchant des solutions à l'échelle régionale aux problèmes économiques et environnementaux, misant ainsi sur un développement durable local.

⁴ Le "scénario hétérogène" (ou A2) se fonde sur l'hypothèse d'un renforcement des identités et des traditions locales, s'accompagnant d'une démographie plus élevée, ainsi que d'une évolution technologique et d'une croissance économique plus faible.

Température - Simulateur climatique Météofrance - Été 2050 à 2099



- Régional: +3,7°C entre 2050 et 2099
- On peut aussi avoir des variations plus importantes au niveau local.

Figure 24. Simulateur Météofrance - Péninsule armoricaine : évolution de la température moyenne estivale de 2050 à 2099

III.2- De combien le niveau de la mer peut-il monter ?

Pour prévoir l'effet du changement climatique au cours du 21^{ème} siècle sur l'augmentation du niveau de la mer au niveau du littoral du massif armoricain, il faut tenir compte de :

- (1) de l'augmentation moyenne générale de ce niveau, estimée s'établir entre 11 à 80 cm selon les scénarios économiques et démographiques considérés par le GIEC, sans tenir compte d'une accélération possible de la fonte des calottes glaciaires ; ceci implique une vitesse moyenne de 1,1 à 8 mm par an, et
- (2) des effets régionaux des modifications de la circulation à grande échelle ; le niveau moyen local dépend de la circulation à grande et petite échelle.

Dans l'Atlantique Nord, l'effet de Coriolis fait que le niveau moyen actuel de la mer est, à latitude égale, plus élevé côté américain par rapport au côté européen et africain (Figure 25). À une latitude de 30°N, la différence est supérieure à 1 m. À la latitude de Bordeaux (45°N) et de Brest (48°N), elle est respectivement d'environ 20 et 10 cm. Au cours du 21^{ème} siècle, le ralentissement probable de la circulation anticyclonique (Gulf Stream) résultant de la réduction des plongées d'eaux profondes en mers du Groenland, d'Irminger et du Labrador, devrait se traduire par un relèvement du niveau de la mer côté africain et européen et par un abaissement du niveau de la mer côté américain. A ce jour, nous n'avons pas de données nous permettant de chiffrer de façon précise l'évolution du niveau de la mer au cours de ce siècle pour notre zone de référence. La Commission Européenne a récemment lancé un programme dont les résultats à venir devraient directement intéresser notre étude. A titre provisoire et de façon conservatrice, les effets cumulés de la dilatation des océans et de la modification de la circulation océanique sur l'Atlantique Nord nous font retenir l'hypothèse d'une probable surcote de **quelques centimètres à quelques dizaines de centimètres à la fin de ce siècle pour les littoraux du massif armoricain et les eaux du golfe de Gascogne**. Ceci n'est nullement négligeable : par exemple, les quais du port de Brest sont déjà à la limite de la submersion par plein mer de vive eau et sans vent de suroît. Par ailleurs, rappelons que nous

avons délibérément restreint cette étude aux événements moyens et exclu les événements exceptionnels. Or, des événements climatiques entraînant des surcotes, ce qui est prédit notamment par les experts du GIEC, pourrait avoir des conséquences importantes en se juxtaposant à ces accroissements de hauteur moyenne.

En résumé, **l'augmentation du niveau de la mer au cours du 21^{ème} siècle concerne les littoraux du massif armoricain et ceci doit être pris en compte par les aménageurs.**

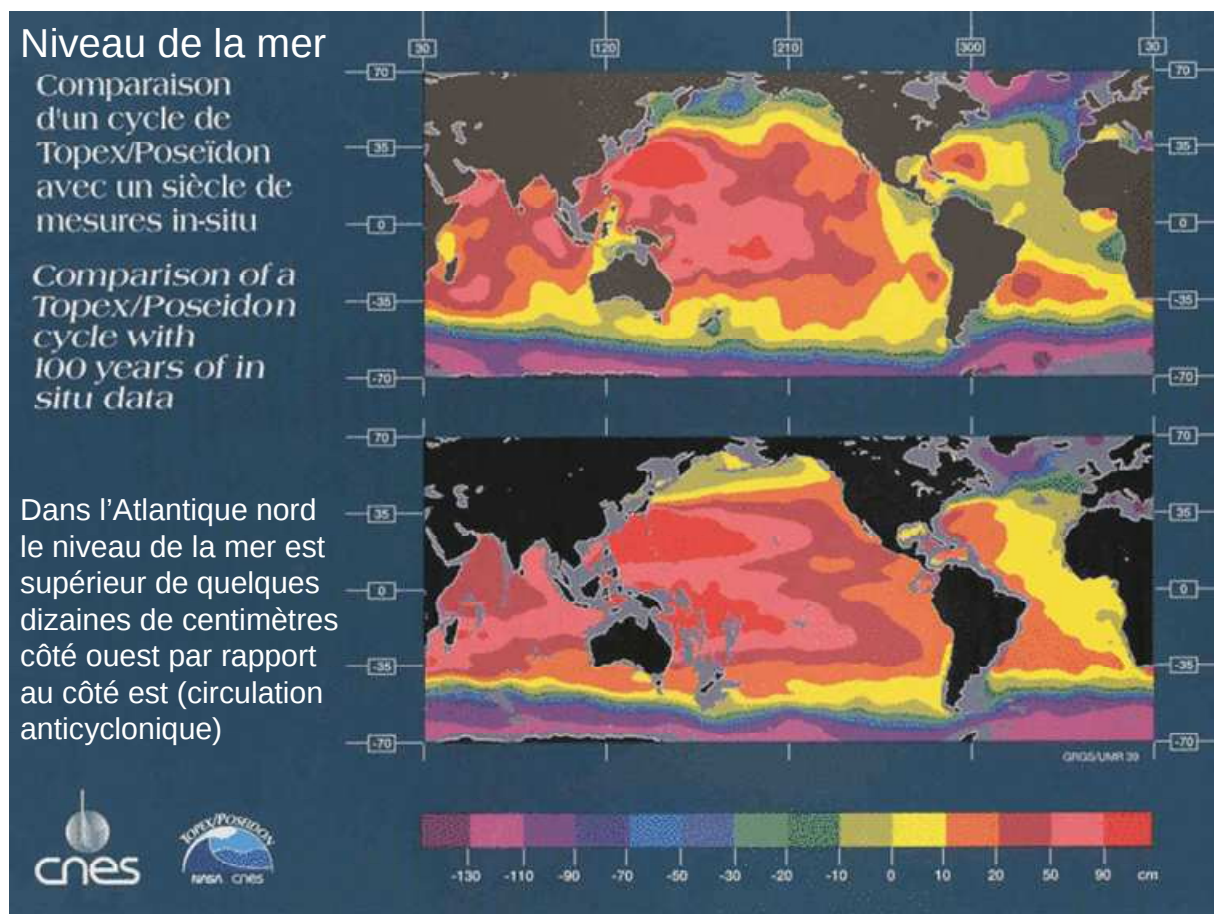


Figure 25. Océan mondial : niveau annuel moyen de la surface de la mer d'après les mesures de Topex-Poseidon comparé à un siècle de mesures *in situ*.

Peut-on quantifier l'augmentation du niveau de la mer en un point donné du littoral du massif armoricain ?

La question est simple mais la réponse n'est pas triviale. En effet, jusqu'à ce jour et sauf exception, le niveau de référence des cartes du SHOM et de l'IGN ne sont pas compatibles, les écarts pouvant atteindre quelques dizaines de centimètres en zone littorale. Pour pallier ce défaut, les deux organismes développent actuellement le Programme LITTO 3D (« le modèle numérique Terre-Mer »). Par utilisation de techniques multifaisceaux et lasers, est actuellement décrit le référencement correct de 3 sites en France sur le littoral Atlantique et Méditerranéen, parmi lesquels le golfe du Morbihan. Dans ce cas (site macrotidal) le programme LITTO 3D comprend un modèle dynamique de marée permettant de simuler le niveau réel de la mer en un lieu et un instant donné (Figure 26).



Vérité terrain



Litto 3D

*SHOM- V. Donato
Golfe du Morbihan*

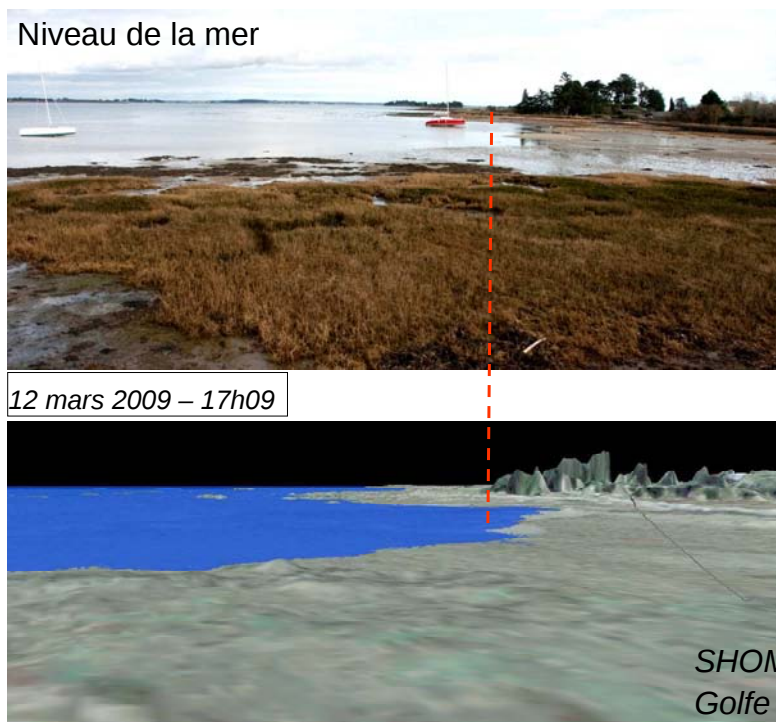
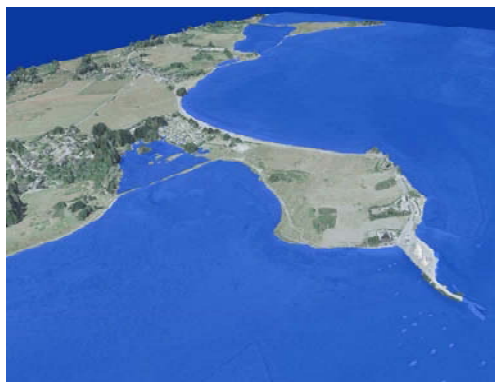


Figure 26. Application du programme LITTO 3D au golfe du Morbihan :
vérité terrain illustrée par deux exemples

Il est alors possible de simuler dans des conditions réalistes l'augmentation du niveau de la mer. A titre d'exemple LITTO 3D propose le site de l'Ile d'Arz pour lequel la ligne de côte est simulée par vent nul en pleine mer de vive eau (coefficient 108) avec une surcote de 0 cm (état actuel), de 40 cm, 100 et 190 cm sous l'effet du réchauffement climatique (Figure 27).

Niveau de la mer

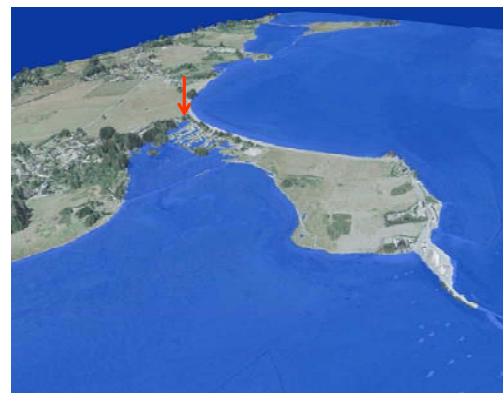
Pleine mer
Coefficient 108
Élévation : 0 cm



SHOM- V. Donato
Golfe du Morbihan

Niveau de la mer

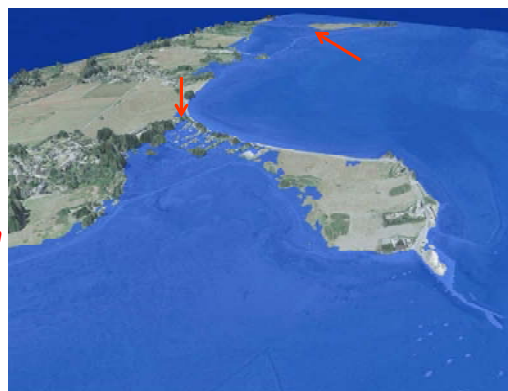
Pleine mer
Coefficient 108
Élévation : 40 cm



SHOM- V. Donato
Golfe du Morbihan

Niveau de la mer

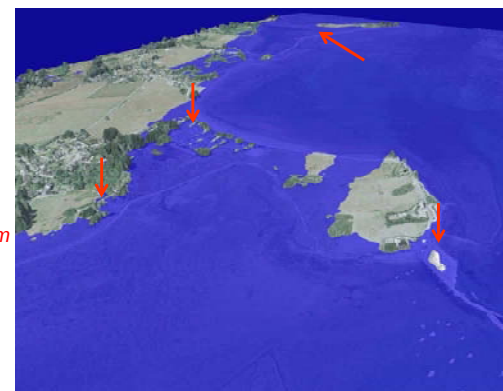
Pleine mer
Coefficient 108
Élévation : 100 cm



SHOM- V. Donato
Golfe du Morbihan

Niveau de la mer

Pleine mer
Coefficient 108
Élévation : 190 cm



SHOM- V. Donato
Golfe du Morbihan

Figure 27. Programme LITTO 3D (SHOM – IGN) appliqué à Ile d'Arz : évolution du trait de côte en cas d'augmentation du niveau de la mer de 0, 40, 100 et 190 cm

III.3- L'acidification de l'océan aura-t-elle un impact sur les ressources biologiques exploitées ?

Comme tous les liquides, l'eau de la mer possède la propriété de dissoudre les gaz. Leur dissolution est d'autant plus importante que les eaux sont froides. Parmi les gaz atmosphériques solubles dans l'eau de mer, le dioxyde de carbone (CO_2) occupe une place particulière. En effet, il ne fait pas que se dissoudre : il réagit avec l'eau pour former de l'acide carbonique, qui se dissocie en ions hydrogénocarbonate (HCO_3^-) et en ions carbonate (CO_3^{2-}). Actuellement, le pH de l'eau de mer est de l'ordre de 8 (l'eau de mer est donc basique) ce qui fait que la teneur en carbonate est très minoritaire par rapport à celle de l'hydrogénocarbonate. Celui-ci sert de base à la formation du carbonate de calcium (CaCO_3), par réaction avec les ions calcium (Ca^{++}) contenus dans l'eau de mer. La réaction de précipitation du carbonate de calcium, qui libère du dioxyde de carbone, est réversible. Ceci veut dire qu'injecter davantage de dioxyde de carbone dans l'eau entraîne une diminution du pH, de la teneur en ions carbonate (Figure 28) et une déstabilisation du précipité de carbonate de calcium qui finit par se dissoudre.

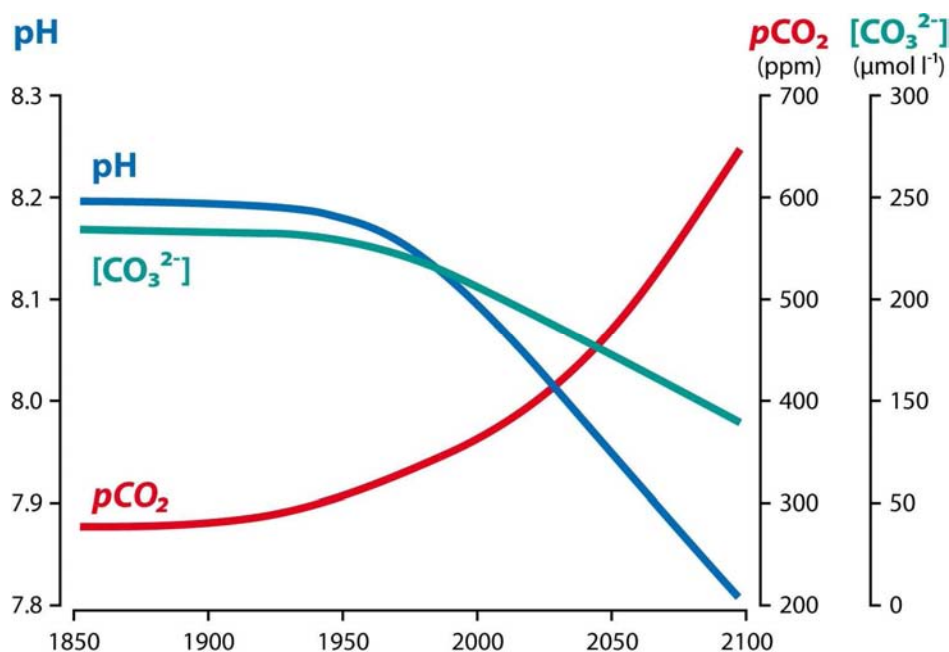
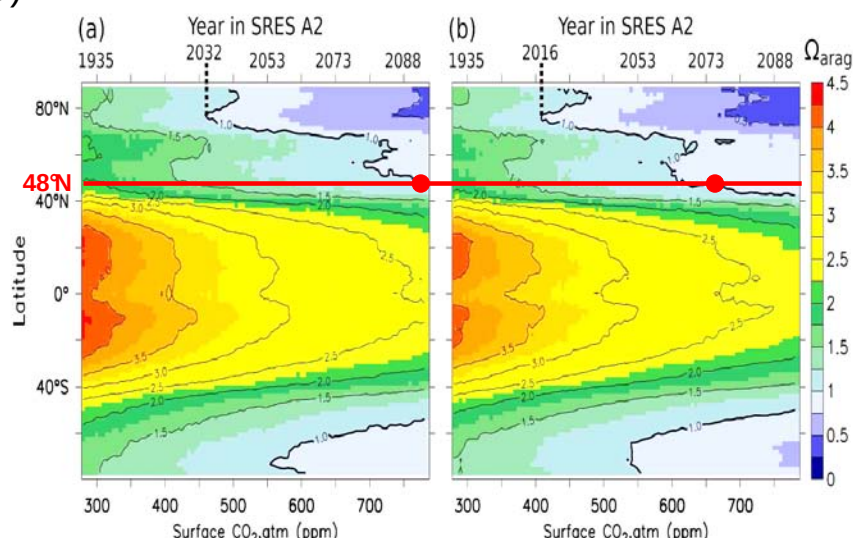


Figure 28. Au cours du 21^{ème} siècle, la teneur en dioxyde de carbone de l'atmosphère ($p\text{CO}_2$) devrait croître de façon spectaculaire. Ceci devrait engendrer un transfert accru de CO_2 dans l'eau de mer. En conséquence, le pH de la mer diminue, de même que la teneur en ions carbonate $[\text{CO}_3^{2-}]$.

Il existe donc une limite de concentration du CO_2 dissous dans l'océan au-delà de laquelle il ne peut plus exister de carbonate de calcium sous forme solide. C'est cette valeur limite que les modèles prévisionnels cherchent à calculer car on en devine son importance en termes d'impacts sur les organismes à tests (= carapaces) calcaires.

Des chercheurs du Réseau d'Excellence Européen EUR-OCEANS ont récemment simulé l'impact de l'invasion de l'océan par le dioxyde de carbone d'origine anthropique, dans le cas du scénario A2 du GIEC. Les océans polaires sont en première ligne mais le phénomène affecte progressivement le reste de l'océan mondial, les eaux baignant le massif armoricain (au niveau de 48°N , latitude de Brest) seront sérieusement affectées avant la fin du 21^{ème} siècle (Figure 29).

Acidification de l'Océan – Hypothèse du scénario économique A2 (GIEC)



- Quand Ω_{arag} atteint 1: Les organismes calcaires commencent à se dissoudre.
- Pour nous (~48°N), ce sera à la fin du siècle

Figure 29. L'océan absorbe une bonne partie de l'excès de dioxyde de carbone d'origine anthropique. Cet excès de CO_2 menace l'équilibre des carbonates, ici caractérisé par le facteur Ω (a-valeur annuelle moyenne, b-valeur saisonnière). Quand le facteur Ω devient inférieur à 1, les carbonates (ici sous d'aragonite) commencent à se dissoudre. Les organismes à carapace calcaire sont affectés. A la latitude de Brest (environ 48°N), le phénomène affecte les eaux environnant le massif armoricain dès les années 2070 à 2080. Steinacher et al. (2009).

Quel est l'impact de « l'acidification » de l'océan sur les organismes à carapace calcaire ?

L'effet perturbant de « l'acidification » de l'océan sur la croissance ou la calcification d'organismes tels que les coccolithophoridés, les coraux, les algues benthiques, les mollusques et les foraminifères a été démontré (ex. Martin et al. 2009). 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. Dans le cadre du Programme EPOCA, financé par la Commission Européenne, F. Gazeau et al. (2009) ont montré qu'une diminution de pH du même ordre de grandeur que celle prédite par certains modèles pour la fin du 21^{ème} siècle (soit -0.35 unité de pH) a un impact négatif sur le développement de larves de bivalves de l'huître creuse et de la moule bleue, très présents dans les eaux littorales du massif armoricain.

A terme, l'acidification de l'océan représente un risque majeur pour les ressources marines biologiques exploitables de Bretagne.

III.4- De façon générale, quels pourraient être les impacts sur les écosystèmes marins ?

Nous avons vu en 2-4 que des changements, dans les aires de répartition et les cycles de reproduction, liés au réchauffement climatique semblent déjà prouvés pour certaines espèces naturelles ou introduites dans les eaux environnantes du massif armoricain à l'instar de ce qui a été démontré dans de nombreuses régions du monde (Helmuth et al. 2006).

Parmi les risques majeurs concernant le fonctionnement des écosystèmes marins, pour lesquels des exemples avérés existent en milieu côtier en Bretagne ou dans des régions voisines, on retiendra :

- Changements de la production primaire en relation avec la modification de distribution et d'abondance du phytoplancton (Sarmiento et al. 2004)
- Modifications des périodes et de l'intensité des événements de reproduction et/ou de recrutement (i.e. arrivée et installation de nouveaux individus dans la population suite à la reproduction de la génération parentale) ; voir un exemple détaillé ci-dessous dans le cas des balanes (Hawkins et al. 2003).
- Découplages phénologiques dans les interactions spécifiques (ex. proies-prédateurs, pathogènes et leurs hôtes) ; exemple du système copépode-morue détaillé plus bas (Beaugrand et al. 2003)
- Installation facilitée et/ou prolifération d'espèces introduites accidentellement ou délibérément à des fins d'exploitation ; voir l'exemple de l'huître creuse *C. gigas* (cf. page 18).
- 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 ; voir pour revue Helmuth et al. (2006)

Ces prévisions vont dans le sens de travaux réalisés sur des séries biologiques de longue durée sur les côtes anglaises de la Manche (Hawkins et al. 2003 ; Mieszkowska et al. 2005). Par exemple, 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. Une influence directe du changement des températures des eaux anglaises est également le facteur avancé pour expliquer les modifications d'aire de distribution de la grande algue brune *Alaria esculenta*, qui a disparu du nord de la péninsule britannique depuis les années 1990 ainsi que dans certaines localités du sud. La température de 16°C est un seuil limite pour l'acquisition de la maturité sexuelle de cette algue (cf. Helmuth et al. 2006).

Faute d'une adaptation rapide en fonction de l'évolution thermique de l'environnement, les répercussions de tels changements phénologiques pourraient être importantes et aux larges répercussions. Par exemple, une reproduction modifiée dans le temps peut entraîner des déséquilibres des chaînes trophiques avec des systèmes proie – prédateur en situation de mismatch (Figure 30 a et b) comme celle déjà décrite par Beaugrand et al. (2003) entre les larves de morues (prédateurs) et les copépodes (proies) en mer du Nord, avec une conséquence immédiate pour la pêche, s'ajoutant aux effets de la surexploitation.

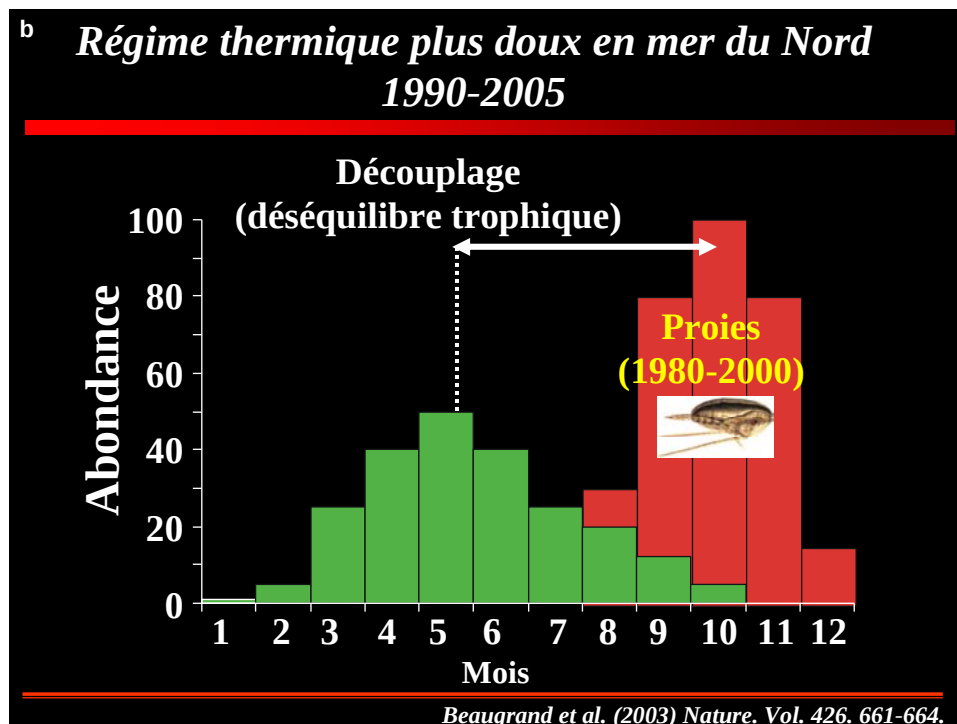
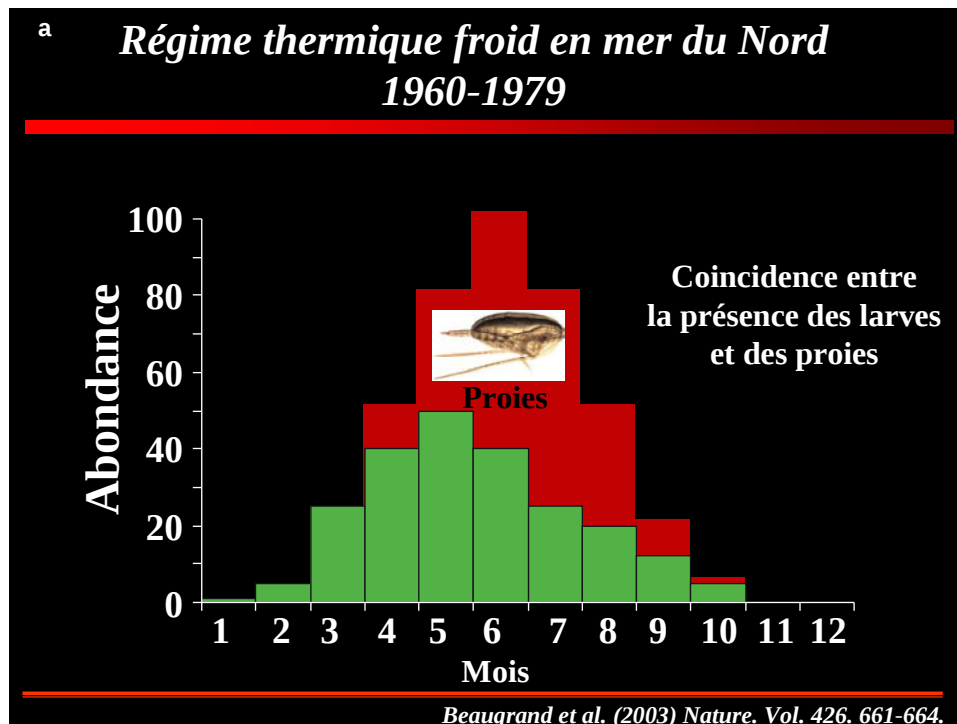


Figure 30. Dans les conditions thermiques normales, l'évolution temporelle des larves de morue et des copépodes-proies coïncide (match, figure 30 a). En régime thermique plus doux, l'aire de répartition des copépodes-proies habituels sont dérivés vers le nord ; sur les aires de reproduction des larves de morue, se développent d'autres copépodes mais avec un cycle temporel décalé (« mismatch », figure 30 b) et des qualités nutritives différentes.

Une des clés de la réponse à la question posée est dans la plasticité phénotypique et la capacité d'adaptation des espèces pélagiques et benthiques ; ces capacités de réponses des systèmes biologiques sont multi-factorielles et répondent notamment à l'importance des variations génétiques préexistantes (sur laquelle pourra s'exercer la sélection) ainsi qu'au type de cycles de vie des organismes.

Les effets cités ci-dessus peuvent être en synergie avec des effets en cascade conduisant à une déstabilisation du fonctionnement des écosystèmes côtiers. Ces effets seront de plus accentués à la faveur des autres perturbations d'origine anthropique, par exemple les pêcheries, les constructions littorales (perte en habitats disponibles) et les introductions d'espèces exotiques.

Conclusions et recommandations

En raison de leur environnement atmosphérique et océanographique, le massif armoricain et ses eaux environnantes sont affectés par une forte variabilité climatique naturelle. La plupart des séries temporelles actuelles dédiées à l'observation de cette variabilité physique, chimique et biologique ne sont pas de durée suffisante pour permettre de faire la part, dans les écarts observés, entre la variabilité naturelle et celle due au changement climatique en cours. Toutefois, les données actuelles acquises depuis plusieurs décennies montrent que le massif armoricain et ses eaux environnantes *sensu lato* ne sont pas à l'abri du réchauffement global avec des impacts thermiques, chimiques et biologiques.

Au niveau régional, pour l'avenir et avant la fin de ce siècle, les sujets majeurs de préoccupation sont : (1) **la montée du niveau des eaux**, avec d'importantes conséquences en matière d'aménagement côtier, et (2) **l'acidification de l'eau de mer**, avec de sérieuses menaces potentielles sur certaines des ressources biologiques exploitées.

D'ores et déjà, il existe quelques exemples démontrant des modifications déjà à l'œuvre dans des écosystèmes côtiers en relation avec le changement climatique, notamment s'agissant **de changements d'aires de distribution et de modifications des périodes de reproduction de certaines espèces de poissons et mollusques**. Cependant, et bien que la Bretagne soit une région d'une grande biodiversité marine par sa position à la jonction de deux provinces biogéographiques, en raison des insuffisances des séries d'observations des milieux pélagiques (pleine eau) ou benthiques (fond), il n'est pas possible à ce jour de documenter avec précision les conséquences du changement climatique pour l'ensemble des **écosystèmes côtiers du massif armoricain**. Toutefois, des changements majeurs ont déjà été largement documentés dans la littérature dans les écosystèmes marins, notamment le long des côtes des îles anglaises, et on peut faire l'hypothèse qu'ils soient généralisables aux eaux bretonnes.

Il est important de rappeler que les changements climatiques agissent de concert avec d'autres composantes du **changement global**, en premier lieu en milieu côtier marin la pollution, la sur-exploitation des ressources naturelles et les introductions d'espèces allochtones. La difficulté de documentation des seuls effets des changements climatiques tient à la nécessité de séparer les effets déterminés par les changements climatiques seuls de ceux provoqués par d'autres types d'activités humaines (ex. pêche, introductions d'espèces, aménagements littoraux). Les séries d'observation des milieux pélagiques et benthiques en Bretagne ne sont pas suffisamment longues ou n'ont pas été conçues pour l'observation des seuls effets de la variabilité climatique.

La surveillance et le suivi des écosystèmes côtiers est une priorité pour appréhender et pouvoir gérer les effets des changements climatiques. **Un travail important d'harmonisation des indicateurs biotiques et abiotiques et de mise en accès libre des données de suivis est à réaliser.** Il existe de très nombreux indicateurs mais **l'élaboration d'indicateurs régionaux** faciles à mettre en œuvre, précis et efficaces doit se poursuivre ainsi que le développement de technologie permettant des suivis automatisés et rapides (ex. satellite, ferry box, outils moléculaires etc.). Certains indicateurs déjà en œuvre ont montré leur pertinence (ex. présence/absence d'espèces en limite d'aire et/ou sensible à la température, inventaire et suivi d'espèces introduites, décalage des périodes de reproduction etc.). Compte tenu de la diversité des habitats, des écosystèmes et des caractéristiques environnementales, il paraît nécessaire de ne négliger aucune des entités géographiques composant le linéaire côtier breton. **Ces actions doivent pouvoir se faire de concert avec des actions nationales** (Réseau des observatoires nationaux) et **européennes** (ex. réseau DIVERSITAS ; projet d'Infrastructure Européenne LIFEWATCH) notamment pour la mise en réseau de données d'observation libre de droit.

Au niveau régional, les actions de suivi et d'observation pourraient s'appuyer au moins en partie sur des structures d'ores et déjà existantes. Parmi celles-ci figurent : (1) les observatoires SOMLIT de l'INSU auxquels contribuent, en Bretagne, l'Institut Universitaire Européen de la Mer de Brest et la Station Biologique de Roscoff, (2) le Réseau REBENT piloté par Ifremer, et (3) le Parc Naturel Marin d'Iroise (et plus généralement les Aires Marines Protégées puisque diverses actions sont à venir dans le golfe du Morbihan, la rade de St-Malo-Cancale ainsi que dans de nombreuses baies bretonnes inscrites au rang des sites Natura 2000). Il est impératif que **ces suivis puissent être pérennisés.** En outre, il ne faut pas négliger **la surveillance « civile »**, effectuée par les acteurs de la mer (ex. pêcheurs, aquaculteurs) qui sont une source d'informations importante, à condition d'établir des indicateurs non pénalisants sur leur temps de travail donc faciles à mettre en œuvre et pertinents.

Le potentiel régional en matière de recherches marines est grand et les instituts et universités concernées devraient s'engager dans **un effort d'observation et de recherche** plus conséquent et de longue durée sur la **vulnérabilité physique, chimique et biologique des milieux marins environnant la péninsule armoricaine.** Étant donné les enjeux tant scientifiques, patrimoniaux qu'économiques relatifs à la diversité biologique marine, cet effort de recherche devrait être mieux soutenu par les autorités régionales et nationales.

Références

- Bachelet, G., B. Simon-Bouhet, C. Desclaux, P. Garcia-Meunier, G. Mairesse, X. de Montaudouin, H. Raigné, K. Randriambao, P.-G. Sauriau, 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.
- Beaugrand, G., Ibanez F., Lindley, J.A., Reid, P.C.(2002) Diversity of calanoid copepods in the North Atlantic biogeography and species associations. *Marine Ecology Progress Series*, 232: 179-195.
- Beaugrand, G. & Reid, P.C. (2003) Long-term changes in phytoplankton, zooplankton and salmon related to climate. *Global Change Biology*, 9: 801-817
- Blanchard, F., Boucher, J. & Poulard, J.-C. (2002) General trends in the fish community of the Bay of Biscay from 1973 to nowadays: ecosystem effects of fishing or climate? In *Proc. 8th Int. Symp. Oceanog. Bay of Biscay, IEO, Gijon, Spain, April 2002*
- Blanchard, F. & Vandermeersch, F. (2005) Warming and exponential abundance increase of the subtropical fish *Capros aper* in the Bay of Biscay (1973-2002). *C.R. Biologies* 328
- Cabioch L., Gentil F., Glaçon R., Retière C. (1977) Le macrobenthos des fonds meubles de la Manche: distribution générale et écologie. In *Biology of benthic organisms. 11th European Symposium on marine biology*. Eds B.F. Keegan, P. O'Ceidigh, P.J.S. Boaden.
- Dauvin J.C. (1999) Mise a jour de la liste d'amphipodes (Crustacea Peracarida) présents en Manche. *Cahiers de Biologie Marine*, 40 : 165-183.
- Enfield, D.B., Mestas-Núñez, A.M., Trimble, P.J. (2001) The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. *Geophys. Res. Lett.*, 28(10):2077-2080.
- 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
- Gazeau F., Pronker A. E., Peene J., Gattuso J.P., Middelburg J.J., et Heip C.H. et al. (2009) Effect of ocean acidification on shellfish early life stages. Communication orale Colloque IMBER-SOLAS, Paris, juillet 2009.
- Genner, M.J., Sims, D.W., Wearmouth, V.J., Southall, E.J., Southward, A.J., Henderson, P.A. & Hawkins, S.J. (2004) Regional climatic warming drives long-term community changes of British marine fish. *Proceedings of the Royal society*, 271:655-661
- Hawkins, S. J., A. J. Southward, 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.
- Helmuth, B., N. Mieszkowska, P. Moore, 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.
- Hollander J. (2008) Testing the grain-size model for the evolution of phenotypic plasticity. *Evolution*, 62: 1381-1389.
- IPCC (2001) Climate Change 2001 : The Scientific Basis. Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK

- Keenlyside, N.S., Latif, M., Jungclaus, J., Kornblueh, L., Roeckner, E. (2008) Advancing decadal-scale climate prediction in the North Atlantic sector, *Nature*, 453, 84-88.
- Levitus, S., Antonov, J.I., Boyer, T.P., Stephens, C. (2000) Warming of the world ocean. *Science*, 287: 2225-2229.
- Martin, S., and J.-P. Gattuso (2009) Response of Mediterranean coralline algae to ocean acidification and elevated temperature. *Global Change Biology*, 15:2089-2100.
- Mestertzhim L.(2008) Capacité d'adaptation d'une espèce invasive, l'huître creuse du Pacifique *Crassostrea gigas*, en région Bretagne. Thèse UBO, 150 pp.
- Mieszkowska, N. *et al.* (2005) Marine biodiversity and climate change: assessing and predicting the influence of climatic change using intertidal rocky shore biota. *Occasional Publication. Marine Biological Association of the United Kingdom*, 20. Marine Biological Association of the United Kingdom: Plymouth, UK. 55 pp.,
- Perry, A.L., Low, P.J., Ellis, J.R. & Reynolds, J.D. (2005) Climate change and distribution shifts in marine fishes. *Science*, 308: 1912-1915
- Planque, B., Beillois, P., Jégou, A.-M., Lazure, P., Petitgas, P. & Puillat, I. (2003) Large-scale hydroclimatic variability in the Bay of Biscay: the 1990s in the context of interdecadal changes. *ICES Mar. Sci. Symp.*, 219 : 61-70
- Quéro *et al.* 1998) Quéro, J.-C., Du Buit, M.-H. & Vayne, J.-J. (1998) Les observations de poissons tropicaux et le réchauffement des eaux dans l'Atlantique européen. *Oceanologica Acta*, 21,2 :345-351
- Regnaud, H. & Dubreuil, V. (1998) L'élévation du niveau marin dans l'Ouest français : signification climatique et conséquences morphologiques. *Annales de Géographie*, 600: 117-138
- Sanford, E., Holzman, S.B., Haney, R.A., Rand, D.M., Bertness, M.D. (2006) Larval tolerance, gene flow, and the northern geographic range limit of fiddler crabs. *Ecology*, 87 (11): 2882-2894.
- Sarmiento, J. L., R. Slater, R. Barber, L. Bopp, S. C. Doney, A. C. Hirst, J. Kleypas, R. Matear, U. Mikolajewicz, P. Monfray, V. Soldatov, S. A. Spall, and R. Stouffer (2004) Response of ocean ecosystems to climate warming (2004). *Global Biogeochem Cycles*, 18, GB3003, doi:10.1029/2003GB002134.
- Simon-Bouhet, B. (2006) Approches théoriques et empiriques des processus d'invasions biologiques en milieu marin : le cas de *Cyclope neritea*. Thèse. Université de La Rochelle.
- Steinacher, M., et al. (2009) Imminent ocean acidification in the Arctic projected with the NCAR global coupled carbon cycle-climate model. *Biogeosciences*, 6, 515-533.
- Wöppelmann, G., Pouvreau, N., Coulomb, A., Simon, B. & Woodworth, P.L. (2008) Tide gauge datum continuity at Brest since 1711 : France's longest sea-level record. *Geophysical research letters*, 35: L22605, doi:10.1029/2008GL035783.