



LE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE ET LES TORTUES MARINES

Synthèse bibliographique des connaissances actuelles

2009

Rapport réalisé par Matthieu Petit
Te mana o te moana
www.temanaotemoana.org



Le réchauffement climatique et les tortues marines.

Synthèse bibliographique des connaissances et actuelles.

Matthieu PETIT¹

¹ Association te mana o te moana.

Bp 1374 Papetoai, 98 729 Moorea, Polynésie française.

www.temanaotemoana.org

temanaotemoana@mail.pf

Crédits

Cette synthèse bibliographique rentre dans le cadre du projet « Sensibilisation de la population au changement climatique » initié par l'IFRECOR Polynésie, réalisé par l'association te mana o te moana et financé par le Haut-commissariat de la république en Polynésie française dans le cadre de l'arrêté n° HC 730/DAE/BASID du 28 novembre 2008.

Droits d'auteur

© te mana o te moana 2009.

L'utilisation de ce document à des fins non commerciales, et notamment éducatives, est autorisée sans l'accord préalable de l'auteur à condition que la source soit dûment citée.

Citation

PETIT M., 2009. Le réchauffement climatique et les tortues marines, synthèse bibliographique des connaissances actuelles. *Te mana o te moana*. 35p.

Table des matières

- I) **Avant-propos**
- II) **Introduction**
 - Encadré 1 : Une perte de biodiversité majeure
- III) **Le changement climatique global**
 - a) Définitions et causes du phénomène
 - Encadré 2 : Le GIEC
 - b) Evolution de ses composantes environnementales
 - 1) *Les températures de surface*
 - Encadré 3 : L'évolution des températures dans l'outremer français
 - 2) *Le niveau de la mer*
 - Encadré 4 : Des prédictions à long terme
 - 3) *La couverture nuageuse et les précipitations*
 - 4) *Les évènements météorologiques*
 - Encadré 5 : El Niño, un phénomène météorologique de grande ampleur
 - 5) *La circulation thermohaline*
 - Encadré 6 : Les mécanismes d'un affaiblissement de la circulation thermohaline
 - 6) *Le pH des océans*
- IV) **Le changement climatique global et les tortues marines**
 - a) Introduction aux tortues marines
 - Encadré 7 : Des espèces difficiles à étudier
 - b) Impacts du changement climatique
 - 1) *Impacts sur la reproduction*
 - *Le rendement reproducteur*
 - Encadré 8 : Variation interannuelle et régime trophique
 - *La phénologie des pontes*
 - *La disponibilité des sites de ponte*
 - *La sex-ratio et la réussite d'incubation*
 - Encadré 9 : Des mesures à double effet
 - *Autres*
 - 2) *Impacts sur le stade juvénile*
 - *La morphologie et la vitalité des émergentes*
 - *Le régime trophique*
 - Encadré 10 : Le plancton, bon indicateur du changement climatique
 - *La distribution des juvéniles*
 - 3) *Impacts sur leur alimentation et leurs aires de nourrissage*
 - *Les habitats de nourrissage*
 - Les récifs coralliens*
 - Les herbiers de phanérogames marines*
 - *Le régime trophique*
 - *Les routes migratoires*
- V) **Discussion**
- VI) **Conclusion**
- VII) **Références bibliographiques**

I) Avant-propos

Le présent document vise à établir un état des lieux de l'implication des composantes principales du changement climatique sur la dynamique et les stocks actuels des sept espèces de tortues marines existantes. Pour cela, cette synthèse a été établie à partir des résultats obtenus dans le monde dans des domaines de compétence aussi variés que la paléontologie, la climatologie, la sédimentologie, la courantologie, la génétique des populations, l'herpétologie ou encore la physiologie, compétences nécessitées par la complexité du changement climatique et des prédictions qui sont effectuées dans ce domaine ainsi que par l'organisation du cycle de vie des tortues marines et la pluralité des facteurs environnementaux qu'elle fait intervenir.

Au vu du nombre encore restreint de publications scientifiques traitant de cet aspect et d'un manque important de données en fonction des zones biogéographiques considérées, une analyse régionale de l'impact du réchauffement climatique sur les tortues marines n'a pas pu être envisagée dans ce document. L'outre-mer français, qui abrite sur ses côtes de nombreux sites de ponte et comporte également nombre d'aires de nourrissage, peut faire figure d'exemple dans cette hétérogénéité géographique des informations disponibles. Alors que dans certaines collectivités comme la Guyane française, de nombreux programmes de recherche ont été initiés depuis plus de 10 ans et continuent à alimenter une précieuse base de données, d'autres collectivités telles que la Polynésie française commencent tout juste à recueillir les informations nécessaires à la caractérisation des stocks dans le milieu naturel. Cette synthèse ne passe donc pas en revue les impacts du changement climatique sur les différentes zones fréquentées par les tortues marines, mais s'attache plutôt à considérer ces effets d'une manière globale. Elle pourra cependant être utilisée par les acteurs régionaux en étant couplée avec les analyses et données de terrain recueillies sur place. Les principaux objectifs de ce document sont :

- de fournir une aide informative aux décideurs et d'aiguiller les futurs plans de gestion vers une prise en compte du réchauffement climatique comme véritable menace pesant sur les tortues marines.
- d'aboutir à une vulgarisation des données scientifiques afin d'assurer une prise de conscience des populations locales et des jeunes générations tout en favorisant l'évolution vers la pratique d'éco-gestes quotidiens, à même de limiter l'impact du réchauffement climatique sur la biodiversité mondiale et les sociétés humaines.

II) Introduction

Comprendre comment le changement climatique global va modifier la planète et son fonctionnement est un enjeu mondial. Les questions concernant l'impact de ce changement tiennent aujourd'hui une place centrale dans beaucoup d'études écologiques et biogéochimiques (Hays et al, 2005). Même si l'intérêt porté aux impacts possibles du changement climatique est croissant, il n'y a encore que peu d'évidence des effets directs de la température sur les interactions biotiques au sein des systèmes naturels. L'évaluation précise des impacts écologiques du changement des températures requiert en effet un système naturel dont les populations montrent une réponse directe et non ambiguë aux fluctuations thermiques (Janzen, 1994). Malgré ce manque de données certain, le changement climatique global est considéré aujourd'hui comme l'un des dangers majeurs risquant d'affecter la biodiversité mondiale (Root et al, 2003 ; Harley et al, 2006). L'évolution du climat est susceptible de modifier l'emplacement géographique des écosystèmes, la variété des espèces qu'ils abritent et leur aptitude à procurer les nombreux avantages dont dépend l'existence même des sociétés humaines (IPCC 1997). De plus, l'évolution du climat représente un stress supplémentaire important pour les systèmes déjà touchés par l'exploitation croissante des ressources, les pratiques de gestion non durables et la pollution, agressions dont les effets sont bien souvent égaux ou supérieurs à ceux du changement climatique. Il convient malgré tout de signaler que si les effets de l'évolution du climat risquent d'être néfastes dans de nombreuses régions, et parfois irréversibles, ils pourraient s'avérer bénéfiques ailleurs (IPCC 2002). Par exemple, grâce au changement climatique, certains cours d'eau, gelant dans leurs lits en hiver, conserveront alors une couche d'eau sous la glace, profitable aux populations d'invertébrés et de poissons. Une couverture de glace plus mince augmentera la pénétration des rayons solaires dans l'eau ou la glace, ce qui augmentera la production photosynthétique d'oxygène et réduira les risques mortels pour les poissons en hiver. Cependant, le nombre de cas où les effets du changement global pourraient hypothétiquement être favorables aux écosystèmes ou aux espèces vivantes reste très limité.

Encadré 1 : Une perte de biodiversité majeure

De façon générale, 15 à 37 % des espèces animales et végétales pourraient être en danger d'extinction en raison des modifications anthropiques du climat (Thomas et al. 2004). Selon le GIEC, environ 20 à 30 % des espèces évaluées jusqu'à aujourd'hui seront probablement soumises à un risque accru d'extinction si le réchauffement moyen mondial dépasse 1,5 à 2,5°C (par rapport à 1980-1999). Si l'accroissement de la température moyenne mondiale dépasse 3,5°C, les modélisations suggèrent un grand nombre d'extinctions (de 40 à 70 % des espèces évaluées) sur l'ensemble du globe (IPCC 2007).

L'étude des impacts de la variabilité climatique sur les processus écologiques est essentielle pour une meilleure compréhension de la dynamique des populations en milieu naturel (Hallett et al, 2004). En effet, les écosystèmes sont intrinsèquement dynamiques et sensibles à la variabilité du climat. Il est probable que les premiers effets des changements climatiques d'origine anthropique seront liés à la vitesse et à l'ampleur de la variation des valeurs climatiques moyennes et extrêmes (variation qui devrait survenir rapidement par rapport à la vitesse à laquelle les écosystèmes s'adaptent et rétablissent leur équilibre) ainsi qu'à l'augmentation des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère, laquelle pourrait accroître la productivité et l'efficacité de l'utilisation de l'eau chez certaines espèces végétales. Les effets secondaires comprendront la modification des propriétés des sols et du régime des perturbations (incendies, animaux nuisibles, maladies, etc.) qui favoriseront certaines espèces au détriment d'autres et transformeront ainsi la composition des écosystèmes (IPCC 1997).

Comprendre comment les tortues marines sont affectées par le réchauffement climatique peut nous aider à mieux appréhender le lien entre le climat, les écosystèmes et les processus écologiques. Témoins de millions d'années d'adaptations aux fluctuations de leur environnement, ces espèces sont en effet de véritables ambassadrices de l'océan de part la diversité des écosystèmes marins et côtiers auxquels elles sont liées, le trajet qu'elles peuvent être amenées à effectuer au cours de leur vie et l'ancienneté de leur présence sur Terre.

Aujourd'hui menacées ou pour certaines en danger critique d'extinction, il est crucial de connaître le rôle éventuel que le réchauffement climatique a dans le déclin de leurs populations afin d'adapter les plans de conservation actuels à cette nouvelle problématique.

Ce document définit dans un premier lieu les composantes principales du réchauffement climatique et leur ampleur. Cette description est nécessaire pour une meilleure compréhension des phénomènes auxquels les tortues marines font et devront faire face dans les décennies à venir. Enfin, nous verrons les impacts présents et futurs de cette modification du climat sur chaque grande étape de leur cycle de vie, à savoir leur vie sur les aires de nourrissage, la reproduction et le stade juvénile.

III) Le changement climatique global

a) Définition et causes du phénomène

En 1979, à Genève, lors de la première conférence mondiale sur le climat, est avancée, pour la première fois sur la scène internationale, l'éventualité d'un impact de l'activité humaine sur le climat. De nombreux scientifiques s'interrogent alors sur l'existence ou non d'un « réchauffement climatique » avéré. L'analyse des observations et mesures effectuées depuis plusieurs dizaines d'années a levé le doute sur cette question : augmentation lente des températures moyennes enregistrées par les stations météorologiques du monde entier, diminution de l'étendue et de l'épaisseur de la banquise arctique, recul des glaciers, augmentation significative du niveau de la mer, autant d'indices qui sont venus confirmer la réalité du changement climatique global. C'est en 1992, au sommet de Rio, qu'une véritable prise de conscience internationale du changement climatique s'opère. Les institutions internationales sont alors confrontées aux impacts potentiels du réchauffement climatique sur la biodiversité et les activités anthropiques, et aux différentes stratégies proposées pour lutter contre le changement global. Le protocole de Kyoto qui en a découlé est néanmoins dans une impasse, en raison du refus de signature de la part de pays dont les activités industrielles sont parmi les plus grosses productrices de gaz à effet de serre du monde.

Ce phénomène planétaire est, selon la grande majorité des scientifiques, dû au « forçage anthropique », c'est-à-dire l'augmentation dans l'atmosphère des gaz à effet de serre (et principalement du dioxyde de carbone) en raison des émissions produites par l'activité humaine. Ainsi, le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) a confirmé le 2 février 2007 que la probabilité que le réchauffement climatique soit dû à l'activité humaine est supérieure à 90 %.

Les activités anthropiques (emploi de combustibles fossiles, modification de l'occupation des sols et de la couverture végétale) influent en effet sur les bilans radiatifs et tendent à produire une modification du climat même si, dans certaines régions, l'apparition d'aérosols a un effet inverse sur les bilans radiatifs et tend à refroidir l'atmosphère (IPCC 1997).

Aujourd'hui, le changement climatique est défini par la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) comme « les changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours des périodes comparables ».

Encadré 2 : Le GIEC

Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), créé en 1998 par l'Organisation météorologique Mondiale et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement, fait aujourd'hui autorité dans le domaine de l'étude du réchauffement climatique. Il regroupe environ 2 300 scientifiques de 130 pays, issus de centres de recherche, d'universités, d'entreprises ou d'associations qui contribuent à l'élaboration de rapports à travers trois groupes de travail : le groupe I chargé d'évaluer les aspects scientifiques de l'évolution du climat ; le groupe II qui traite des questions relatives à l'impact du changement climatique et aux moyens de s'y adapter ; le groupe III ayant pour mission d'évaluer les solutions envisageables pour limiter les émissions de gaz à effet de serre ou atténuer les effets du changements climatique.

b) Evolution de ses composantes environnementales

1) Les températures de surface

La température moyenne globale à la surface de la Terre (c'est-à-dire la moyenne de la température de l'air près du sol et de la température à la surface de la mer) a augmenté depuis 1861 (année de début des relevés de température). Au XXe siècle, cette augmentation a été de 0,74°C [+0,56°C à + 0,92°C] (IPCC 2007). Globalement, il est probable que ce réchauffement ait été le plus important des 1000 dernières années, que les années 90 représentent la décennie la plus chaude et 1998 l'année la plus chaude depuis 1861 (IPCC 2001). Ce réchauffement s'est caractérisé par une diminution de la fréquence des températures extrêmement basses ainsi qu'une augmentation, plus modeste, de la fréquence des températures extrêmement élevées (IPCC 2001).

Le taux de réchauffement projeté par le GIEC pour les prochaines décennies est nettement plus élevé que les changements observés au cours du 20ème siècle (IPCC 2001). Le GIEC projette en effet une augmentation supplémentaire des températures moyennes mondiales de 2,8 °C [+ 1,7°C à + 4,4°C] d'ici la fin du siècle (résultats correspondant à la gamme complète des scénarios du SRES, IPCC 2007). Cette vitesse moyenne de réchauffement sera sans doute plus rapide qu'au cours de n'importe quelle autre période des 10 000 dernières années (IPCC 1996).

Ce réchauffement risque d'entraîner des conséquences physico-chimiques extrêmement importantes, telles qu'une variation des précipitations, un changement du régime des vents, une acidification des océans, une fonte des glaces et d'affecter par conséquent l'ensemble des écosystèmes et des sociétés (IPCC 2007).

Encadré 3 : L'évolution des températures dans l'outremer français

Parce que les collectivités et pays d'outre-mer abritent des aires importantes de nourrissage et de ponte pour tortues marines, il est intéressant de se pencher sur l'évolution des températures dans ces régions. Aux Caraïbes, dans l'océan Indien et dans le Pacifique Sud, la hausse des températures projetée est de l'ordre de +2°C en moyenne pour l'ensemble des collectivités, elle est donc légèrement inférieure à la tendance mondiale (IPCC 2007). En moyenne, la partie tropicale est du Pacifique devrait se réchauffer davantage que sa partie ouest (IPCC 2001). En Guyane, la hausse projetée est la plus forte, avec une estimation de + 3,3°C (IPCC 2007). Enfin, des régions nettement plus tempérées comme Saint Pierre et Miquelon devraient connaître une augmentation encore plus importante et à une vitesse plus marquée.

2) Le niveau de la mer

Depuis la fin de la dernière période glaciaire (18 000 ans BP), le niveau de la mer s'est relevé de plus d'une centaine de mètres, à une vitesse de l'ordre de 1 à 3 cm par an au début de son élévation, puis à des vitesses variables, mais plus faibles par la suite (Paskoff, 1994). Depuis un siècle, il y a eu une élévation, variable selon les régions, d'environ 1,5 mm par an soit 15 cm au total selon Grellet et al (1993 in Vieux et al), de 10 à 20 cm selon le GIEC (IPCC 2001) et de 20 cm selon Cambers (1997). Et cette élévation semble s'accélérer ; elle était de 1,8 mm/an [+ 1,3 à + 2,3] depuis 1961 et de 3,1 mm/an [+2,4 à + 3,8] depuis 1993 (IPCC 2007)

Les prévisions concernant l'élévation du niveau de la mer durant les prochaines décennies sont basées sur la gamme complète de scénarios du SRES prenant en compte la dilatation thermique et la perte de masse des glaciers et des calottes glaciaires, principales causes du relèvement des eaux. Selon ces projections, le niveau moyen global de la mer devrait augmenter de 0,09 à 0,88 mètres entre 1990 et 2100 (IPCC 2001). De nouvelles estimations, minimales cette fois puisque basées seulement sur la dilatation thermique, projettent une élévation du niveau marin mondial de 0,35 mètre [+ 0,23 à + 0,47 mètre] en moyenne d'ici la fin du siècle (IPCC 2007).

Encadré 4 : Des prédictions à long terme

Les modèles climatiques indiquent que le réchauffement local sur le Groenland va probablement atteindre une à trois fois la moyenne globale. Les prévisions des modèles relatifs aux nappes glaciaires indiquent qu'un réchauffement local de plus de 3 °C, s'il se poursuivait pendant plusieurs millénaires, provoquerait la fonte quasi totale de la nappe glaciaire du Groenland, d'où un relèvement du niveau de la mer d'environ sept mètres. Un réchauffement local de 5,5 °C, qui se prolongerait pendant 1000 ans, aurait probablement pour effet une contribution du Groenland à un relèvement du niveau de la mer d'environ trois mètres (IPCC 2001).

3) La couverture nuageuse et les précipitations

Au cours de la seconde moitié du XXe siècle, il est probable que sous les latitudes moyennes et élevées de l'hémisphère Nord la fréquence des événements de précipitations importantes ait augmenté de 2 à 4 pour cent. Cette augmentation peut être due à plusieurs causes comme par exemple les changements de l'humidité atmosphérique, l'activité orageuse et les phénomènes dépressionnaires à grande échelle (IPCC 2001).

Durant cette période, il y aurait eu une augmentation de 2 pour cent de la couverture nuageuse sur ces mêmes zones (IPCC 2001).

D'ici la fin du siècle, le GIEC projette une augmentation du volume des précipitations pour les hautes latitudes et une diminution dans la plupart des régions émergées subtropicales. Aux Caraïbes, une diminution moyenne annuelle des précipitations de 12 % [-19 à -3] est projetée. En revanche, une légère augmentation des précipitations est annoncée dans l'océan Indien et le Pacifique Sud, avec une moyenne annuelle respective de +4 % [+3 à +5] et +3 % [+3 à +6]. Une hausse plus importante est projetée au niveau des pôles, avec +14 % [+9 à +17] pour l'Antarctique et +18 % [+15 à +22] pour l'Arctique. (IPCC 2007)

4) Les événements météorologiques

D'après une étude de Webster et al (2007), le nombre et la durée des cyclones sont globalement stables depuis 35 ans à l'échelle planétaire. Cependant, le nombre et la proportion d'ouragans de catégories 4 et 5 (le maximum sur l'échelle Saffir-Simpson qui fait référence) ont presque doublé depuis 1970. Les connaissances actuelles de la dynamique des cyclones tendent à indiquer une relation possible entre l'activité cyclonique et l'élévation de la température à la surface des océans. Selon le chercheur français M. Desbois, « avec le réchauffement de la planète ce n'est pas le nombre de cyclones qui augmente, mais leur puissance (...) Mais il est encore difficile d'évaluer l'impact réel de ce réchauffement car la force et le nombre des cyclones oscillent naturellement tous les 20-30 ans. »

Encadré 5 : El Niño, un phénomène météorologique de grande ampleur

El Niño est un phénomène climatique naturel résultant d'une oscillation de la pression atmosphérique au-dessus de l'océan Pacifique tous les quatre à huit ans. Il se caractérise par un réchauffement des eaux de surface dans les zones tropicales centrales et orientales du Pacifique, influençant les courants atmosphériques et donc les écosystèmes du monde entier. Il peut conduire à des sécheresses dans certaines régions d'Asie et du Pacifique occidental, ou encore à des hivers rudes et des inondations sur le continent nord-américain. Les conditions climatiques exceptionnelles entraînées par le phénomène El Niño donnent un aperçu de ce que pourront être les impacts du changement climatique à l'avenir (Petit & Prudent 2008).

Les épisodes de réchauffement du phénomène El Niño ont été plus fréquents, plus persistants et plus intenses depuis le milieu des années 70 qu'au cours des 100 dernières années (IPCC 2001). Deux événements récents de ce type, en 1982/1983 et en 1997/1998, se sont révélés être les plus extrêmes du siècle dernier et probablement des 400 dernières années (BE 2008). Cependant, l'impact du changement climatique sur l'occurrence d'El Niño demeure à ce jour incertain. Selon le GIEC, les projections actuelles laissent à penser qu'il y aura peu de changement ou bien alors une légère augmentation de l'ampleur du phénomène El Niño au cours des 100 prochaines années (IPCC 2001). En revanche, des estimations récentes prévoient qu'à travers une augmentation des températures et une diminution des précipitations dans certaines régions, le changement climatique risque d'exacerber considérablement l'ampleur et les impacts du phénomène El Niño dans les années à venir (BE 2008).

5) La circulation thermohaline

La circulation thermohaline est un système de courants marins de surface et de profondeur, dont le circuit participe à la redistribution de la chaleur des tropiques sur l'ensemble de la planète. Ce phénomène serait également, avec d'autres, responsable du renouvellement des eaux profondes océaniques et de la relative douceur du climat européen.

La plupart des modèles simulent un affaiblissement de la circulation thermohaline dans les océans, d'où une réduction du transport thermique vers les latitudes élevées de l'hémisphère Nord (IPCC 2001). Se fondant sur des simulations récentes, le GIEC projette une réduction très probable de la circulation thermohaline de 25 % [0 à - 50 %] d'ici la fin du siècle (IPCC 2007).

Encadré 6 : Les mécanismes d'un affaiblissement de la circulation thermohaline

La circulation thermohaline prend son origine dans l'Atlantique Nord où les eaux froides, denses et bien oxygénées plongent vers les fonds marins et redescendent vers le sud. Ces eaux sont ensuite réchauffées au niveau des tropiques et remontent à la surface en regagnant le nord, où elles se refroidissent à nouveau.

Le réchauffement climatique va entraîner un réchauffement et une diminution de la densité des eaux de surface (par un accroissement de l'évaporation dans les régions tropicales et des précipitations dans les régions de plus haute latitude accompagné d'une fonte partielle de la calotte glaciaire). Les différences de densité entre les eaux de surface et les eaux de profondeur deviendront plus importantes et la force des courants montants ne sera pas assez intense pour briser la stratification des eaux. Le réchauffement climatique entraînera donc une diminution des courants montants de profondeur et freinera l'ensemble de la circulation thermohaline (Petit & Prudent, 2008).

Dans tous les cas, les projections actuelles effectuées à l'aide de modèles climatiques ne simulent pas un arrêt complet de la circulation thermohaline avant 2100 (IPCC 2001). Une altération de ce moteur des courants marins pourra entraîner un ralentissement ou un arrêt de courants de grande ampleur tels que le Gulf Stream ainsi qu'une modification de nombreux autres courants océaniques.

La circulation thermohaline pourra également jouer un rôle dans l'élévation du niveau de la mer puisque selon les estimations de Knutti et Stocker (2000), une réorganisation permanente de la circulation thermohaline pourrait mener à une contribution de la montée des eaux de 0,5m.

6) Le pH des océans

L'augmentation de la concentration du carbone produit par les activités humaines depuis 1750 a conduit à une acidification générale des océans. En effet, aujourd'hui, les océans et les terres absorbent environ la moitié des émissions anthropiques de CO₂. Or la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone (CO₂) a augmenté de 31 pour cent depuis 1750. La concentration actuelle de CO₂ n'avait encore jamais été atteinte au cours des 420 000 dernières années et probablement pas non plus au cours des 20 millions d'années précédentes. De même, le taux d'augmentation actuel est sans précédent depuis au moins 20 000 ans. L'augmentation des émissions et des concentrations de CO₂ a ainsi conduit à une baisse générale du pH dans les océans du globe, une décroissance moyenne mondiale du pH de 0,1 unité ayant d'ores et déjà été mesurée. Les simulations du GIEC projettent une réduction supplémentaire du pH de surface des océans comprise entre 0,14 et 0,35 unité en moyenne d'ici la fin du siècle (IPCC 2001 ; IPCC 2007).

III) Le changement climatique global et les tortues marines

a) Introduction aux tortues marines

Deux familles de tortues marines, les *Cheloniidae* et les *Dermochelyidae*, existent actuellement et sont représentées par sept espèces : la tortue verte (*Chelonia mydas*), la tortue imbriquée (*Eretmochelys imbricata*), la tortue caouanne (*Caretta Caretta*), la tortue olivâtre (*Lepidochelys olivacea*), la tortue de Kemp (*Lepidochelys kempii*), la tortue à dos plat (*Natator depressa*) et la tortue luth (*Dermochelys coriacea*). En dépit de la similarité de leurs silhouettes et de leur habitat, les tortues de mer se distinguent par leur alimentation particulière, par le choix de leurs plages de nidification et par leurs déplacements à des distances plus ou moins éloignées des côtes. Pour la plupart des espèces, elles fréquentent surtout les zones littorales et ne se rencontrent en pleine mer que durant leurs migrations entre leurs aires de nourrissage et leurs sites de ponte, qui peuvent être séparés de plusieurs milliers de kilomètres.

Encadré 7 : Des espèces difficiles à étudier

En règle générale, peu de données fiables sur les effectifs des tortues de mer ou sur leurs nombreux facteurs de mortalité (anthropiques et naturels) sont disponibles bien que nécessaires à l'évaluation des stocks. En plus de cette pénurie de données, il est particulièrement difficile de regrouper tous les facteurs susceptibles d'influencer les effectifs de tortues dans un cadre commun, en raison de leurs cycles biologiques longs et complexes ainsi que de la variabilité régionale des facteurs. En conséquence, dans la plupart des cas, l'état des stocks est mal connu et peu étayé par des documents et la plupart des évaluations sont fondées sur des informations ponctuelles ou qualitatives.

La quasi totalité des tortues marines est aujourd'hui considérée comme menacée, voire en voie d'extinction. Selon l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN), trois espèces de tortues de mer sont gravement menacées (tortue luth, tortue de Kemp et tortue imbriquée) et trois autres sont menacées (tortue verte, caouanne et tortue olivâtre). Ces classements sont réalisés d'après les observations directes, les indices d'abondance disponibles et les taux d'exploitation actuels. La Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction (CITES 1973) considère que toutes les espèces (à l'exception de la tortue à dos plat) sont en voie d'extinction et les classe dans l'Annexe I (ce qui signifie que le commerce international des tortues marines ou de leurs produits dérivés est interdit).

La reproduction tardive, sporadique, et le faible succès reproductif, inhérents à la biologie de l'ordre des chéloniens, constituent une source incontournable de vulnérabilité pour les tortues marines. Ces éléments doivent être pris en compte dans les mesures de conservation d'autant qu'ils viennent accroître considérablement l'impact des menaces extérieures dont sont l'objet les tortues. Elles subissent en effet les impacts de plusieurs facteurs naturels et anthropiques, aussi bien dans leur habitat terrestre que dans leur environnement marin. Dans les zones de ponte, les menaces sont notamment le prélèvement d'adultes pour leur chair, leur huile et leur carapace, le ramassage illicite des œufs, la destruction des œufs par les animaux sauvages ou par le passage d'ouragans et la forte présence humaine sur les plages utilisées pour la ponte. Dans leur environnement marin, les tortues sont menacées par la pollution et les collisions avec des embarcations, en particulier dans les eaux proches du littoral. De plus, les tortues marines font l'objet de captures accidentelles par les chaluts de fond, les filets maillants, les palangres, les nasses, orins et autres cordages. Enfin, les tortues sont affectées dans l'ensemble de leurs habitats par le changement climatique, phénomène global dont les impacts sur celles-ci font l'objet du présent document.

b) Impacts du changement climatique

1. Impacts sur la reproduction

Le rendement reproducteur

Des fluctuations annuelles importantes du nombre d'épisodes de reproductions sont naturellement observées chez de nombreuses populations d'animaux à reproduction non-annuelle (Broderick et al, 2001). De nombreuses raisons peuvent expliquer qu'un individu ne réussisse pas à se reproduire à une année donnée. La reproduction peut être dépendante d'une certaine condition corporelle, ce facteur n'ayant pas forcément de seuil fixe mais pouvant varier en fonction de facteurs environnementaux (Madsen & Shine, 1999). Les conditions environnementales dominantes peuvent également intervenir sur différents paramètres reproductifs tels que le nombre de reproductions par saison et le nombre d'œufs ou de larves produits (Wikelski & Thom 2000). Le rendement reproducteur de nombreuses espèces animales, dépendant à la fois de la fréquence de la reproduction, du nombre de reproductions par saison et du nombre d'œufs/larves produits est donc susceptible d'être profondément influencé par le réchauffement climatique.

Ce phénomène semble s'appliquer aux tortues marines. Au Costa Rica, il a été montré que la probabilité de nidification des tortues vertes, pour une année donnée est corrélée aux

températures de surface hivernales du nord-est des Caraïbes (Solow et al, 2002). Les deux stocks génétiques de tortues caouannes du Pacifique (Japon et Australie) présentent une corrélation inverse entre la quantité des nids produits par leurs populations et la température moyenne annuelle de surface sur leurs zones de nourrissage (pour l'année précédent la saison de ponte concernée) (Chaloupka et al, 2008). Il est donc devenu de plus en plus apparent que la température dans les aires de nourrissage est un facteur important qui influence la capacité des tortues marines à se reproduire, que ce soit pour les tortues vertes (Solow et al, 2002), les tortues luth (Saba et al, 2007) ou les caouannes (Wallace & Jones, 2008).

Dans certaines régions (et notamment les régions tempérées), des températures plus froides de l'océan au niveau des zones de nourrissage sont vraisemblablement associées à une productivité accrue, une augmentation de l'abondance des proies et par conséquent à une augmentation de la capacité des tortues à se reproduire. Un réchauffement régional des températures de l'eau pourrait donc conduire, à long terme, à une diminution des ressources en nourriture, une réduction des pontes et du recrutement même si les tortues pourraient s'adapter en déplaçant leurs aires de nourrissages vers des régions plus froides (d'après une étude sur les tortues caouannes, Chaloupka et al, 2008). Cette baisse du recrutement pourrait ainsi être due à une combinaison de plusieurs phénomènes :

- Moins de femelles subissant la vitellogénèse et migrant vers les aires de ponte en raison d'une diminution des ressources en nourriture sur les aires de nourrissage.
- Pour les femelles qui migrent, une réduction de la fécondité individuelle liée à des saisons de ponte plus courtes.

Une baisse du rendement reproducteur des tortues marines en raison des processus cités dans les paragraphes suivants causera une réduction de l'abondance de ces espèces et augmentera leur risque d'extinction (Chaloupka, 2003). Ainsi, le réchauffement progressif des océans au cours des 50 dernières années est un facteur de risque important qui doit être considéré dans n'importe quel diagnostic sur les déclinés à long terme de certaines populations de tortues marines.

Encadré 8 : Variation interannuelle et régime trophique

La variabilité interannuelle du nombre de nids semble être dépendante du niveau trophique des différentes espèces de tortues avec des valeurs plus hautes pour les tortues vertes et les valeurs les plus basses pour les tortues caouannes. Les tortues vertes montrent également une plus grande variation dans le nombre de pontes par saison. Ceci reflète vraisemblablement un degré de relation différent entre les conditions environnementales et l'abondance de nourriture pour les tortues vertes et l'abondance de nourriture pour les tortues caouannes. Les tortues vertes sont herbivores, se nourrissent de plantes aquatiques et de macroalgues et cette production primaire est plus étroitement liée aux conditions environnementales dominantes que les composantes du régime carnivore de la tortue caouanne (Broderick et al, 2001).

La phénologie des pontes

L'arrivée du printemps, qui coïncide avec le moment des migrations et des comportements de reproduction dans la vie sauvage, est survenue de plus en plus tôt au cours des dernières décennies. Il a par exemple été constaté que la ponte des œufs de nombreuses espèces d'oiseaux est devenue plus précoce (Archaux 2003), ce phénomène étant corrélé avec une hausse des températures printanières (McCleery & Perrins, 1998; Wuethrich, 2000). Grâce à des études récentes sur les tortues caouannes (Chaloupka et al, 2008 ; Hawkes et al, 2007 ; Pikes et al, 2006 Weishampel et al, 2004), il apparaît aujourd'hui que les oiseaux ne sont pas les seuls à pondre leurs œufs plus tôt, les tortues sont aussi concernées. Les résultats de ces études, menées sur les populations atlantiques et rassemblant parfois jusqu'à 15 ans de données, mettent en évidence l'intervention de changements phénologiques dans les modifications des saisons de ponte.

Ces variations de la phénologie des pontes peuvent s'exprimer différemment en fonction des zones et des populations considérées. Ainsi, pour les caouannes pondant en Floride, des températures estivales plus chaudes sont associées avec des saisons de ponte précoces et plus courtes (Pike et al, 2006) alors que pour les caouannes pondant en Caroline du Nord, cette hausse des températures estivales entraîne des saisons de ponte également précoces mais plus longues (Hawkes, 2007).

La raison de cette précocité des pontes est peut-être due à un processus de vitellogenèse accéléré dans les zones de nourrissage (Limpus et al, 1994) suivi d'un développement accéléré des œufs suite à l'accouplement près des zones de ponte (Hawkes et al, 2007). En effet, les tortues marines étant ectothermiques, leur comportement et leur physiologie sont largement dictés par les températures ambiantes d'où des modifications possibles en cas de changement climatique global. Ainsi, la durée de la saison de ponte est généralement

plus courte sur les plages des plus hautes latitudes (Weishampel et al, 2004). Une des conséquences de saisons de ponte plus courtes pourrait être une réduction de la production de juvéniles et du recrutement mais ce ne sont que des spéculations (Pike et al, 2006).

Sur le site le plus important de ponte pour les tortues caouannes de l'Atlantique (en Floride), il a été observé un décalage de la date médiane de ponte d'environ 10 jours (Weishampel et al, 2004) alors que, dans le même temps, l'évolution du nombre de nids (oscillant entre 13 000 et 25 000) ne présentait pas de tendance significative. Ce décalage de la saison des pontes d'une dizaine de jours est comparable à ce que l'on peut trouver chez diverses espèces d'oiseaux.

Ce décalage de la saison des pontes correspond à une augmentation moyenne des eaux de surface de 0,8°C (de 1989 à 2003) (Weishampel et al, 2004). Weishampel et al (2004) ont montré qu'un réchauffement de 2°C des températures de surface pour le mois de mai entraîne un déplacement du jour médian de ponte à 12 jours plus tôt. Les prévisions de température indiquant une hausse de 2,8°C des températures de surface d'ici la fin de siècle, on peut donc s'attendre à des changements majeurs dans la phénologie des pontes de tortues marines pour les décennies à venir. Même si, à priori, les effets de tels changements de comportement peuvent sembler mineurs, cela n'est vérifié que si les conditions environnementales (comme les ressources en nourriture pour les juvéniles par exemple) changent simultanément. Si les changements nécessités ne s'opèrent pas, les répercussions écologiques pourront être catastrophiques (Grossman, 2004).

La disponibilité des sites de ponte

Le cycle de vie des tortues marines comporte une phase terrestre qui, même si elle est courte, nécessite un accès aisé à certaines zones littorales de basse altitude par les femelles adultes venant pondre. Les tortues pondent sur une grande variété de types de plage mais les mécanismes du choix des plages sont encore peu connus (Mortimer, 1995). Les caractéristiques de ces plages varient selon de nombreux paramètres tels que leur longueur et largeur, leur pente, leur orientation, la végétation présente ou encore la granulométrie du substrat. Toutes ces caractéristiques risquent d'être fortement affectés par la montée des eaux liée au changement climatique global.

L'un des impacts les plus importants de la montée des eaux sera la perte des plages et des zones de ponte qui y sont associées. D'autres impacts, tels qu'une modification de l'équilibre sédimentaire des plages (IPCC 1997) ou une augmentation des chances d'inondation côtière, pourraient également avoir des conséquences significatives sur la reproduction des tortues. Au niveau mondial, la majorité des plages sont déjà dans une phase d'érosion résultant sur

leur démaigrissement et leur recul vers les terres (Grellet et al, 1993 in Vieux et al 2008). Une étude de 200 plages caribéennes entre 1985 et 1995 montre que 70% des plages étudiées se sont érodées (Cambers 1997). L'élévation du niveau de la mer va accélérer cette érosion et engloutir certaines zones côtières ainsi que de nombreuses îles basses et atolls. Ces derniers sont particulièrement vulnérables puisque bien souvent, la majeure partie de la superficie émergée se trouve à moins de 3 ou 4m du niveau de la mer (IPCC 1997). Par exemple, en cas d'une élévation du niveau de la mer d'un mètre, l'atoll de Majuro dans les îles Marshall perdrait environ 80% de ses terres (IPCC 2001). Cette même élévation pourrait faire disparaître 90% des rives sablonneuses restantes au Japon alors qu'une élévation de 50 cm suffirait à provoquer l'immersion de 8500 à 19 000 km² de terre ferme aux Etats Unis (IPCC 1997). Ces prévisions alarmistes ont donc conduit les scientifiques à s'interroger sur la proportion de sites de ponte pouvant être amenées à disparaître.

Fish et al (2005) ont montré qu'un tiers des plages actuellement utilisées par les tortues marines comme site de ponte à Bonaire (Caraïbes) sont sous la menace d'une montée des eaux de type intermédiaire (0,5m), ce niveau de montée rentrant dans le cadre des projections du GIEC. Il reste cependant extrêmement difficile de prédire de façon très précise le futur à long terme des plages insulaires en raison du manque de données disponibles sur les processus côtiers et les changements à long terme des traits de côte. Il est malgré tout certain que les plages les plus basses et les plus étroites sont les plus susceptibles de perdre une grande partie de leur surface dans tous les scénarii de montée des eaux.

Si l'on reprend l'exemple de Bonaire, la majorité de l'activité de ponte est concentrée sur les plages les plus pentues et les plus hautes. Il a également été reconnu (Horrocks & Scott 1991) que les tortues imbriquées préfèrent les plages avec une forte pente ce qui favorise la survie de leur progéniture. Enfin, les plages basses sont, dans les zones touristiques, souvent utilisées par des complexes hôteliers et n'apparaissent pas comme des sites de ponte privilégiés. Ces facteurs semblent donc relativiser le rapport entre la vulnérabilité des plages à la montée des eaux et les préférences de ponte des tortues. Cependant, le cas de Bonaire ne peut être généralisé, et dans tous les cas, cette perte d'habitat aura des implications importantes pour les populations de tortues car elle réduit la gamme de sites disponibles pour les femelles. Le placement des nids sur les plages influençant le succès de ceux-ci, une modification de la distribution des nids pourrait entraîner une diminution du succès reproductif (Horrocks & Scott 1991). De plus, une trop grosse proportion de femelles obligée de pondre sur des plages moins élevées (où les températures sont plus froides et où les œufs sont plus susceptibles d'être inondés par la marée) pourrait entraîner des biais de la sex-ratio (Horrocks & Scott 1991).

L'élévation du niveau de la mer, en modifiant le niveau des marées et en contribuant à l'élévation des nappes d'eau souterraines, risque également de compromettre de grandes superficies de zones de ponte en les rendant accessibles pour les tortues mais sujettes à un

risque d'inondation des nids très important. La disparition des sites de ponte couplée à une disponibilité en sites de ponte restreinte et leur caractère inondable va donc probablement entraîner des changements dans la localisation géographique actuelle des pontes au niveau mondial.

Incubation et sex-ratio

Contrairement aux autres vertébrés amniotiques, dont le sexe est déterminé génétiquement à la conception, le sexe de nombreux reptiles est déterminé de manière irréversible par les températures rencontrées durant le second tiers du développement embryonnaire (Paukstis & Janzen, 1991). La sex-ratio des juvéniles dans ce taxon peut être modifié radicalement par un petit changement (1°C) de la température d'incubation (Paukstis & Janzen, 1991). Chez ces espèces, la sex-ratio, critère démographique primordial, est sujette aux variations de l'environnement thermique mais les rapports de sexe semblent s'équilibrer sous l'influence de ces mêmes facteurs.

Le changement climatique va avoir une influence importante sur l'incubation des tortues marines en modifiant ces facteurs environnementaux et, notamment, en induisant l'augmentation de la température du sable dans les nids, facteur crucial qui détermine la sex-ratio des juvéniles et la réussite d'incubation (Limpus et al, 1985 ; Hays et al, 2003). Il existe une température pivot autour de laquelle le ratio mâle/femelle évolue dans un sens ou dans l'autre. Une augmentation de la température des nids va favoriser la naissance de tortues femelles et conduire à une diminution du nombre de mâles (Godley et al, 2002). Dans certaines régions, l'évolution des températures semble déjà avoir induit un certain déséquilibre des sexes. Ainsi, selon un rapport de l'ISTS (2007), des recherches américaines, qui ont analysé 26 ans de données sur les pontes de tortues caouannes, ont permis de mettre en évidence une proportion d'émergentes femelles produites nettement plus forte dans les régions les plus chaudes. Actuellement, 42% des émergentes sont des mâles en Caroline du Nord contre 10% seulement en Floride, qui est une région nettement plus chaude. Il est communément acquis que les températures moyennes se réchaufferont d'environ trois degrés durant les prochaines décennies or, selon Hawkes (in ISTS, 2007), une augmentation de deux degrés suffira à stopper définitivement la production de tortues mâles dans des sites de ponte comme Cap Canaveral en Floride.

Une augmentation des températures se traduit donc par une modification de la sex-ratio mais elle pourrait, d'une manière plus radicale, entraîner une forte mortalité embryonnaire si ces températures se rapprochaient des températures léthales à savoir supérieures à 34°C (Limpus et al, 1985 ; Matsuzawa et al, 2002).

Enfin, une corrélation négative significative existe entre la température moyenne du sable et la période d'incubation des œufs (Matsusawa et al, 2002). Cette relation est fondamentale car elle détermine le moment d'éclosion, crucial pour la survie des embryons. Une augmentation des températures signifierait des éclosions plus tôt dans la saison et des facteurs environnementaux vraisemblablement différents de ceux auxquels les émergentes sont confrontées plus tardivement dans la saison.

Encadré 9 : Des mesures à double effet

Afin de lutter contre l'érosion des plages liée à l'élévation du niveau de la mer, des mesures de renforcement des plages ont été entreprises dans de nombreux pays. Elles consistent à alimenter certaines plages avec du sable extrait des fonds marins. C'est un exemple de mesure visant à lutter contre les effets du réchauffement climatique mais qui peuvent en aggraver les effets sur certains animaux. Ainsi, le sable extrait est souvent noir ou de couleur plus foncée et il entraîne alors des températures d'incubation plus chaudes pour les nids de tortues marines, aggravant alors les phénomènes de modification de la sex-ratio et de mortalité embryonnaire (Godfrey in ISTS 2007).

Autres

Des paramètres encore peu étudiés comme l'impact du changement climatique sur l'évolution de la végétation des plages pourront également avoir des effets significatifs sur le succès d'incubation des nids. Les modifications des précipitations et de la couverture nuageuse ainsi que la modification des températures prévues par le GIEC pourraient induire des bouleversements au sein des assemblages végétaux côtiers. Une végétation de plage modifiée pourrait créer des refuges supplémentaires pour certaines espèces et ainsi favoriser l'expansion démographique des prédateurs des œufs. Un autre effet secondaire d'une modification de la végétation littorale ou dunaire pourrait être une rétention d'humidité supplémentaire favorisant les risques d'infection ou de moisissure des œufs.

2. Impacts sur le stade juvénile

La morphologie et la vitalité des émergentes

Les conditions thermiques et hydriques de l'environnement d'incubation des œufs peuvent énormément influencer le phénotype des juvéniles de tortues. La température d'incubation peut influencer le sexe (Paukstis & Janzen, 1991), mais également la morphologie (Booth, 1998) des émergentes. Par exemple, les juvéniles auront des têtes plus

grosses si les températures d'incubation sont dites moyennes que si les températures d'incubation sont extrêmes. De même, les températures d'incubation pourront influencer sur les performances locomotrices (Janzen, 1995), le comportement (Janzen, 1995) et la croissance des juvéniles (Rhen & Lang, 1999). Le taux d'humidité peut influencer la morphologie (Packard et al, 1999) et la performance locomotrice des émergentes (Finkler et al, 2000). Par exemple, les émergentes des environnements les plus humides se déplacent à terre et nagent plus vite (Miller, 1993). La plupart de ces travaux a cependant été menée sur des tortues dulçaquicoles et il est difficile de dégager des tendances fiables quant aux effets précis de la température d'incubation sur les juvéniles de tortues marines.

Ce domaine d'étude reste encore peu développé et l'impact du changement climatique ne peut être estimé avec certitude même s'il est probable que l'augmentation des températures de surface et la modification de l'humidité au niveau du sol (liée à la fois à la modification des précipitations et à la hausse des nappes d'eau souterraines) auront des implications sur la morphologie et la vitalité des émergentes. Une perturbation éventuelle des assemblages végétaux littoraux pourra également accentuer ce phénomène en jouant à la fois sur les températures du sable et sur la capacité de rétention d'humidité de l'environnement ambiant.

Le régime trophique des juvéniles

Les nouveaux-nés de tortues marines connaissent, après leur émergence, une phase pélagique de nurserie (Musick & Limpus, 1997) durant laquelle ils passent 1 à 10 ans à se nourrir de proies planctoniques en dérivant avec le courant (à l'exception de la tortue à dos plat (Musick & Limpus, 1997 ; Walker & Parmenter 1990). Les communautés planctoniques peuvent montrer des changements importants de leur distribution en fonction de diverses variables environnementales et donc des saisons (Hays et al, 2005). Le réchauffement climatique peut avoir des conséquences sur les tortues marines de façon indirecte en influençant les communautés planctoniques dont elles sont les prédatrices au stade juvénile.

Il y a déjà une forte évidence de l'existence de changements systématiques dans l'abondance du plancton, la structure de sa communauté et la modification de son aire de distribution durant les dernières décennies dans de nombreuses zones du monde (Hays et al, 2005). Par exemple, les assemblages de copépodes d'eau chaude se sont déplacés de 1000km vers le Nord de l'Atlantique durant les 40 dernières années, avec une rétractation simultanée des assemblages d'eau froide (Beaugrand et al 2002). Il a aussi été noté que les cycles saisonniers de certains copépodes et zooplanctons gélatineux ont jusqu'à 11 semaines d'avance durant les années les plus chaudes dans la mer du Nord (Greve et al, 2001). Enfin, on s'aperçoit de plus en plus que la biomasse de zooplancton gélatineux (comprenant les

méduses) augmente dans un grand nombre de régions dans le monde. Dans la mer de Bering, la biomasse des méduses a augmenté de manière régulière durant les dernières décennies et Brodeur et al (2002) suggèrent que le changement climatique peut avoir été un élément déterminant.

Il apparaît également que certains membres temporaires du plancton marin (c'est-à-dire le méroplancton, comprenant les espèces qui n'appartiennent à cette communauté que pour une partie de leur cycle de vie) comme certaines méduses, larves d'échinodermes ou de décapodes peuvent être plus affectées par un réchauffement des eaux de surface que les composants permanents du plancton (holozooplancton). Cette rupture potentielle de l'équilibre entre les niveaux trophiques pourrait avoir de sérieuses implications sur les flux d'énergie des niveaux trophiques supérieurs (Brodeur et al, 2002).

Les juvéniles de tortues marines (ainsi que les adultes des espèces dérivantes comme la tortue luth) vont donc se trouver confrontés à des changements de distribution de leurs proies, à des modifications de leurs abondances ou tout simplement à une disparition de certaines espèces au profit de nouvelles. Ils risquent également de se retrouver au sein de réseaux trophiques totalement perturbés, le plancton en étant la base structurale. Les juvéniles de tortues marines étant extrêmement dépendants des courants marins pour leurs déplacements, ils pourraient ne pas se retrouver dans les zones les plus riches en nourriture ou dans les nouvelles aires de distribution de leurs proies. Il faut également noter que des variations dans la phénologie des pontes accentueront encore ce phénomène de disparités au niveau trophique pour le stade océanique des juvéniles.

Ces disparités au niveau trophique, s'exprimant au niveau spatial et temporel, conduiront à une forte hétérogénéité des taux de croissance qui pourra se traduire, pour les individus disposant des plus faibles ressources en nourriture, par une vulnérabilité accrue aux prédateurs et par une arrivée tardive à la maturité sexuelle. La contribution de ces individus au renouvellement des populations s'en trouvera également retardée.

Encadré 10 : Le plancton, bon indicateur du changement climatique

Des conclusions récentes suggèrent que le plancton est un indicateur plus sensible au changement climatique que ne le sont les variables environnementales elles-mêmes, car la réponse non linéaire des communautés biologiques peut amplifier des perturbations environnementales subtiles (Taylor et al, 2002). L'impact de la météorologie sur l'intensité du brassage océanique semble être au cœur de la relation entre le climat et le plancton. Cette intensité joue sur la luminosité, les températures de surface et l'ampleur du recyclage des nutriments en profondeur. Elle influence, de ce fait, la croissance du phytoplancton ainsi que les processus hiérarchiques tout au long de la chaîne alimentaire pélagique (Richardson & Schoeman, 2004).

La distribution des juvéniles

Les nouveaux-nés dépendent des courants océaniques pour atteindre les habitats pélagiques qui leur sert de nurserie. L'étendue et le moment de ces migrations ne sont connues que pour peu de populations, mais elles durent à priori plusieurs années et se répartissent sur des centaines de kilomètres. Les juvéniles, qui ont été suivis durant leur vie pélagique, ont effectué des déplacements sur des longues distances, quelquefois en nageant contre les courants dominants. Le retour aux zones côtières est une phase du cycle de vie des tortues marines très peu documentée. Les informations disponibles montrent que les tortues doivent nager activement sur d'énormes distances pour contrebalancer leur dérive précédente avec le courant (Luschi et al, 2003).

La circulation thermohaline en s'affaiblissant va entraîner une diminution de l'intensité du brassage océanique et une modification de nombreux courants océaniques. Ces deux phénomènes seront à même d'influer sur la distribution des tortues marines en les entraînant dans des directions et à des distances différentes. Les tortues marines, étant dans un premier temps incapables de lutter activement contre leur dérive, pourront se retrouver dans des zones extrêmement éloignées de leurs futures aires de nourrissage.

3. Impacts sur les aires de nourrissage

Les habitats de nourrissage

Les habitats de nourrissage ont un rôle primordial dans la dynamique des populations de tortues marines car ils représentent les zones au sein desquelles elles vont rester durant la majorité de leur cycle de vie. Ces habitats sont principalement situés dans les zones côtières des régions tropicales et tempérées à l'exception de ceux des tortues luths et olivâtres qui se nourrissent aussi au sein d'habitats pélagiques (Lutz & Musick, 1997), pouvant dans le cas des luths aller jusque dans des régions extrêmement froides.

Les habitats de nourrissage benthiques peuvent être divisés en deux catégories, d'une part les habitats fortement structurés comme les récifs coralliens, les zones rocheuses ou les herbiers et, d'autre part, les habitats faiblement structurés d'eaux peu profondes comme les étendues sablo-vaseuses et les estuaires. Le premier type d'habitat est utilisé par les tortues vertes et imbriquées alors que les tortues à dos plat et les tortues de Kemp semblent préférer les habitats sableux et abrités des eaux peu profondes (Lutz & Musick, 1997).

Nous nous intéresserons ici à l'impact du changement climatique sur les habitats côtiers tropicaux que sont les récifs coralliens et les herbiers de phanérogames marines, habitats étudiés depuis de nombreuses années et vitaux pour au moins deux espèces de tortues

marines, la tortue verte et la tortue imbriquée. Ces écosystèmes servent d'habitat de développement pour les pré-adultes et d'habitat de nourrissage pour les adultes.

Les récifs coralliens

Les récifs coralliens, dont 20% ont déjà été détruits et 50% sont menacés de disparition (Wilkinson, 2004), connaissent depuis les 15 dernières années un phénomène de blanchiment provoqué par le changement climatique et qui est rapidement devenu la menace la plus grave pour ces écosystèmes. Ainsi, en 1998, la température de l'eau a atteint des records dans les zones tropicales. Dans plus de 50 pays, les récifs coralliens ont eu à subir des épisodes de blanchissement sévères et étendus ainsi que des taux de mortalité extrêmement importants. Le retour aux niveaux de recouvrement en corail antérieurs à 1998 va prendre des décennies voire des centaines d'années en admettant qu'il n'y ait pas de nouveaux épisodes de mortalité de grande ampleur (Wilkinson et al, 1999). L'extension géographique, l'augmentation de fréquence et l'ampleur régionale des événements massifs de blanchiment corallien sont le résultat apparent de l'élévation des températures marines, combinées avec des épisodes régionaux d'El Nino et de La Nina (Reaser et al, 2000)

Même s'il existe des réponses différentes entre les populations et les espèces, la plupart des coraux peuvent survivre au blanchiment et recouvrir leurs zooxanthelles (algues symbiotiques) si les anomalies de température ne persistent pas plus d'un mois. Cependant, un stress chronique dû à des épisodes fréquents de haute température causeront vraisemblablement des dommages irréversibles au sein des récifs coralliens (Wilkinson et al, 1999). Une augmentation des températures de l'eau de 2,8°C projetée par le GIEC pourrait rendre les épisodes de blanchiment plus fréquents : tous les ans ou tous les deux ans d'ici 2030-2050 (UNEP 2006). De nombreux scientifiques estiment ainsi que le changement climatique pourrait détruire la majeure partie des récifs coralliens d'ici 2050 (Hoegh-Guldberg, 2005 ; IPCC 2002 ; Reaser et al, 2000). A cause de la vitesse à laquelle ce changement climatique semble se dérouler, la capacité des coraux à s'acclimater, à migrer ou à s'adapter est en effet très incertaine (Hoegh-Guldberg 1999).

L'augmentation de la température n'est pas la seule conséquence du changement climatique qui met en péril les coraux. Les récifs sont aussi directement menacés par l'élévation du niveau marin, l'intensification des cyclones et l'acidification des océans (UNEP 2006).

Les effets conjugués de tous ces phénomènes pourraient être un appauvrissement de la biodiversité des récifs, une diminution de leur productivité et une augmentation de la fréquence des infestations de parasites et de développement de maladies dans le système récifal (IPCC, 2002).

L'impact de la diminution de la production des récifs sur les tortues marines qui les fréquentent devrait être considérable, celles-ci se trouvant alors confrontées à une diminution importante de la disponibilité en proies et de zones de refuges contre les prédateurs.

Les herbiers de phanérogames marines

La disponibilité des sédiments et la modification des marées, alliées à l'élévation des températures et à l'augmentation de la profondeur de l'eau auront des effets néfastes sur les fonctions productives et physiologiques des herbiers marins. Un des effets primaires du réchauffement climatique sur les herbiers sera la modification de leur taux de croissance (IPCC 2002, Short & Neckles, 1999). En effet, la profondeur d'eau accrue, en réduisant la quantité de lumière atteignant les phanérogames fera chuter la productivité végétale. La distribution des herbiers sera décalée en raison du stress lié au réchauffement des températures et les effets indirects de cette élévation pourront inclure des changements de la communauté des herbiers en raison d'une augmentation de l'eutrophisation et de la fréquence des événements météorologiques extrêmes (Short & Neckles, 1999). Des changements potentiels de salinité pourront modifier les principales caractéristiques de la multiplication des herbiers en altérant la formation des propagules, la germination des graines. Ils feront également augmenter les risques de maladies touchant les prairies sous-marines.

Les modifications de la distribution, de la biomasse et de la productivité des herbiers marins va donc toucher les populations de tortues marines et notamment les tortues vertes, directement dépendantes des phanérogames pour leur alimentation à l'état adulte.

Les dégradations que vont subir la majorité des habitats côtiers de nourrissage, alliées avec une diminution des ressources en nourriture, risquent d'entraîner une baisse du potentiel d'attraction de ces zones. Ce phénomène sera suivi d'une diminution du recrutement de ces habitats et d'une redistribution des zones de nourrissage utilisées par les tortues marines. Les implications dans l'écologie des tortues marines sont donc nombreuses, la redistribution d'habitats de nourrissage étant par exemple synonyme de modification des routes migratoires utilisées par les tortues (trajets aires de nourrissage-aires de ponte).

Le régime trophique

Les liens entre météorologie et productivité ont été montrés pour beaucoup de niveaux trophiques (Aebischer et al. 1990 ; Jaksic et al. 1997). L'impact du changement climatique sur les tortues marines via leur alimentation va dépendre dans un premier lieu du niveau trophique dans lequel elles se nourrissent. Pour les espèces se nourrissant de proies

dont l'abondance est étroitement liée aux conditions météorologiques, on peut s'attendre à une relation directe entre l'évolution du climat et la condition corporelle des individus. Il a été montré que ce phénomène est plus important chez les individus qui se nourrissent en bas de la chaîne alimentaire (Post & Stenseth 1999 ; Coulson et al 2000). Les tortues luths, qui ont un régime alimentaire très spécialisé composé exclusivement d'invertébrés planctoniques gélatineux, seront ainsi très susceptibles de voir leur ressources alimentaires varier considérablement en fonction des zones et de l'évolution du climat (cf. paragraphe le régime trophique des juvéniles). De même, on s'attend à ce que les tortues vertes, espèce herbivore se nourrissant de plantes nouvellement poussées, subissent fortement l'impact des conditions météorologiques (cf. paragraphe les habitats de nourrissage –les herbiers de phanérogames marines). En comparaison, les animaux dont les ressources en nourriture sont moins influencées par le climat, c'est-à-dire ceux qui sont le plus haut dans la chaîne alimentaire, devraient montrer le moins de variations de leur condition corporelle. Sont concernées ici les tortues caouannes, imbriquées, à dos plat et de Kemp.

Cette condition corporelle va influencer directement la variation interannuelle du nombre d'épisodes de reproductions (Harrington et al, 1999), les espèces les plus touchées comme la tortue verte devant alors présenter les plus grandes variations interannuelles dans leurs niveaux de reproduction (ce qui est actuellement déjà le cas ; Bjorndal in Lutz & Musick 1997 ; Broderick et al, 2001 ; cf. paragraphe le rendement reproducteur). Ainsi, les niveaux de variation dans le nombre de nids de tortues peuvent être des indicateurs de la variabilité interannuelle du climat sur les zones de nourrissage ainsi que celle de leur régime alimentaire (Bjorndal in Lutz & Musick 1997).

Les espèces se nourrissant plus haut dans la chaîne alimentaire, comme la tortue caouanne, sont donc apparemment moins sensibles au changement climatique au niveau de leur régime trophique. Ainsi, la quantité de mollusques et le crustacés reflète plus l'intégration de caractéristiques climatiques sur plusieurs années (Broderick et al, 2001). Cependant, des effets inattendus du changement climatique peuvent toucher ces espèces à priori moins sensibles. Par exemple, les crustacés, composants majoritaires de l'alimentation des caouannes, vont voir leur survie et leur taux de croissance directement modifiés par l'acidification des océans (par des conséquences néfastes sur leur carapace) (UNEP 2006).

Les routes migratoires

Le trajet et l'ampleur des migrations des tortues adultes varient considérablement entre les espèces mais deux tendances se dégagent. Certaines espèces, comme les tortues vertes, imbriquées et caouannes naviguent entre les sites de ponte et leurs secteurs d'alimentation utilisés pour la totalité de leur période inter-reproductrice. Dans leurs cas, les migrations se font par une nage active, avec une intervention possible des courants qui

peuvent parfois les aider à atteindre rapidement leur cible, ou au contraire leur imposer des contraintes de navigation.

D'autres espèces, comme les olivâtres et les luths, quittent les zones de ponte pour atteindre un environnement pélagique où elles se nourrissent et se déplacent de façon aléatoire. Les processus océanographiques majeurs ont une influence importante sur les déplacements des luths, considérés soit comme des migrations soit comme des séjours prolongés dans de vastes zones d'alimentation (Luschi et al, 2003).

Le changement climatique pourrait avoir une influence importante sur la dynamique des populations de tortues marines par des changements dans le comportement migratoire (McMahon & Hays, 2006). Les tortues pourront en effets soit modifier leurs trajets suite à une baisse du recrutement des habitats de nourrissage existants, une diminution des ressources en nourriture ou une disparition des sites de ponte, soit (pour les espèces qui se laissent dériver) se laisser emporter dans des zones inhabituelles suite à une modification des courants océaniques. Malheureusement, le travail d'analyse des relations possibles entre les déplacements des tortues marines et la dynamique océanique est trop récent et des tendances ne peuvent être dégagées.

V) Discussion

Alors que l'on considérait jusqu'à présent certaines activités humaines comme première cause du déclin de certaines espèces (par exemple les pêcheries à la palangre pour les caouannes), le réchauffement climatique est devenu, en quelques années, une menace bien identifiée, à priori majeure, mais difficilement quantifiable en terme d'impact sur les populations actuelles.

Il est apparu dans les paragraphes précédents que les tortues marines peuvent être potentiellement affectées par les effets du changement climatique à toutes les étapes de leur cycle de vie. Le changement climatique les touche à la fois au niveau temporel (cycle saisonnier, taux de croissance, temps d'incubation,...), au niveau spatial (aires de distribution, routes migratoires,...) et au niveau physique (condition corporelle, morphologie des émergentes,...) de façon directe et indirecte (en modifiant par exemple l'abondance de leurs proies). Les tortues marines sont présentes des régions subpolaires aux régions tropicales en passant par les zones tempérées et sont distribuées sur toute une gamme d'habitats marins pélagiques et côtiers ainsi que d'habitats terrestres. Elles se présentent donc aujourd'hui comme un excellent bio-indicateur pour étudier les effets du changement climatique à l'échelle locale et à l'échelle mondiale (Drew et al, 2007).

Un des exemples les plus probants du lien entre les tortues marines et le climat est la relation entre le nombre de nids pondus sur une plage une année donnée et la quantité de proies disponibles dans le milieu marin quelques mois auparavant, à des centaines voire des milliers de kilomètres plus loin. Cette relation entre la variabilité interannuelle des pontes et l'abondance des proies de tortues marines peut nous renseigner sur tout dérèglement connu par l'écosystème présent sur les aires de nourrissage et ainsi nous permettre d'estimer l'impact du changement climatique, si aucune autre activité anthropique n'est mise en cause dans ce dérèglement.

Malheureusement, les effets reconnus du changement climatique global ne font souvent qu'accentuer les menaces déjà existantes pesant sur les tortues marines. Si l'on prend l'exemple des habitats terrestres de ponte, l'érosion des plages et l'augmentation de la température du sable ne sont que des éléments perturbateurs supplémentaires venant s'ajouter à ceux causés par l'urbanisation côtière croissante : apparition de lumières artificielles, bruit, tassement des plages, pollution, construction de défenses côtières (remblais, murs) infranchissables pour les tortues.

Les interrogations persistent quant à la capacité des tortues marines à s'adapter aux changements rapides des conditions climatiques prévues par le monde scientifique pour les 100 prochaines années. De quelle capacité de résilience pourront faire preuve les tortues

face à des bouleversements majeurs affectant potentiellement toutes les étapes de leur cycle de vie et qui se rajoutent aux menaces croissantes déjà exercées par les activités humaines (pêche accidentelle, braconnage, pollution, trafic maritime...) ?

Selon Chaloupka et al (2008), les tortues marines auront 4 moyens basiques de s'adapter au changement global :

- Un décalage des périodes de ponte vers des saisons plus froides
- Un déplacement des zones de ponte vers des plages soumises à des températures plus fraîches
- Un déplacement des aires de nourrissage vers des eaux plus froides et productives
- Une extinction au niveau régional lorsque la combinaison des facteurs environnementaux ne permet pas d'adaptation possible.

Cette analyse concerne les tortues caouannes, qui sont actuellement, avec les tortues imbriquées, l'espèce de tortue marine la plus étudiée dans le cadre du changement climatique. Ces prédictions ne sauraient bien entendu s'appliquer à toutes les espèces étant donné la variabilité de leurs caractéristiques biologiques, écologiques et comportementales.

De telles adaptations sont possibles et se sont déjà déroulées durant les temps géologiques.

Reece et al (2005) ont montré grâce à la phylogéographie et à la génétique des populations que des modifications géographiques des sites de ponte des tortues caouannes sont survenues dans l'Atlantique durant le Pléistocène en raison des fluctuations du climat et du niveau de la mer. Certaines populations qui existent aujourd'hui pourraient même s'être éteintes durant le Pléistocène en raison du refroidissement des eaux et de leur confinement géographique (populations pondueuses de la mer Méditerranée). On s'aperçoit que les tortues marines, au sexe thermo-dépendant, ont montré un taux d'extinction minimal à chaque changement extrême de température et ont donc su s'adapter en modifiant leur aire de distribution (Cooperative Holocene Mapping Project Members, 1988 in Janzen 1994). En se basant sur la façon dont les tortues se sont adaptées aux bouleversements du climat dans les temps géologiques, de nouvelles recherches, menées dans le Queensland en Australie, tentent d'expliquer comment des populations actuelles de tortues à dos plat pourraient réagir au changement climatique. Selon Limpus, « les tortues à dos plat continueront vraisemblablement de pondre sur certaines plages avec des dunes hautes, simplement en rampant simplement plus haut pour creuser leur nid » (ISTS, 2007).

Ce type d'étude est essentiel et crucial pour la mise en place de plans de conservation futurs. Le suivi de la ligne de côte et des profils de plage, l'enregistrement des températures de surface et des températures au sein des nids ainsi que d'autres indicateurs de l'évolution du climat à long terme devront être utilisés et couplés avec les résultats des suivis de populations de tortues marines pour aboutir à une meilleure compréhension des mécanismes les liant au changement climatique.

En effet, les prochains changements dans le climat sont prévus pour être rapides et pourraient empêcher les mêmes réponses progressives qui avaient fonctionné lors des précédents événements climatiques de se mettre à nouveau en place de manière naturelle (Janzen, 1994). Les analyses génétiques quantitatives et les données comportementales suggèrent que les populations à sexe thermo-dépendant pourraient être incapables d'évoluer assez rapidement pour contrecarrer les effets négatifs du changement global des températures. On pourrait alors, au vu de l'état actuel des stocks de tortues marines, se diriger rapidement vers une vague d'extinction pour les sept espèces de tortues marines existantes.

VI) Conclusion

En raison de leur cycle de vie long et complexe, les tortues marines sont aujourd'hui considérées comme des espèces particulièrement vulnérables au changement climatique. Cette situation préoccupante, accrue par les nombreuses menaces anthropiques qui pèsent sur les tortues marines partout dans le monde, doit être un moteur pour la réflexion et la mise en place d'actions de recherche, de conservation et de sensibilisation adaptées à cette nouvelle problématique.

Les premières études scientifiques sur l'impact du changement climatique sur les tortues marines ont été relatées ici, et malgré le manque de données actuelles, les résultats laissent d'ores et déjà entrevoir de nombreuses modifications des traits de vie de ces espèces. Des études approfondies devront être instaurées pour comprendre les phénomènes en jeu et permettre l'élaboration de plans de conservation et de recommandations vis-à-vis des décideurs.

En Polynésie française, pays d'outre-mer français où a été initiée cette synthèse bibliographique, la connaissance scientifique sur les tortues marines reste relativement limitée, que l'on parle des stocks, de la répartition des populations ou de leurs sites de nidification. Il devient alors extrêmement difficile de mettre en place des programmes de recherche visant à estimer l'impact du changement climatique sur leurs populations et traits de vie, alors même que les îles de Polynésie et en particulier les atolls se présentent comme une zone géographique particulièrement vulnérable à ce changement. Les enjeux des perturbations de la biodiversité face à ce bouleversement majeur se doivent être considérés par les acteurs des collectivités concernées, non seulement parce que les îles polynésiennes ont un rôle d'indicateur des modifications du climat mais parce qu'aujourd'hui ces perturbations sont susceptibles de toucher l'économie et le mode de vie des populations locales. A ce titre, les tortues marines sont des espèces emblématiques qu'il convient de mieux connaître pour les protéger efficacement.

Face à ce constat et dans le cadre du projet « Sensibilisation de la population au changement climatique » initié par l'IFRECOR Polynésie, réalisé par l'association *te mana o te moana* et financé par le Haut-commissariat de la République en Polynésie française, cette synthèse bibliographique a permis la réalisation de supports de sensibilisation sur les tortues marines et le climat. Ces supports, destinés au grand public et présentés sous la forme de posters, de banderolles ou de conférences, seront délivrés aux scolaires polynésiens et à la population locale dans le cadre de journées événementielles dédiées à la protection de l'environnement.

VIII) Références bibliographiques

- Aebischer N. J., Coulson J. C., Colebrook J. M., 1990. Parallel long-term trends across four marine trophic levels and weather. *Nature* **347**, 753-755.
- Archaux F., 2003. Birds and climate change. *Vie Milieu* **53**, 33-41.
- BE Allemagne 2008 numéro **367** (10/01/2008) - Ambassade de France en Allemagne / ADIT.
- Beaugrand G., Reid P. C., Ibanez F., Lindley J. A., Edwards M., 2002. Reorganization of North Atlantic marine copepod biodiversity and climate. *Science* **296**, 1692-1694.
- Booth D. T., 1998. Effects of incubation temperature on the energetic of embryonic development and hatchling morphology in the Brisbane river turtle *Emydura signata*. *Journal of Comparative Physiology B* **168**, 399-404.
- Broderick A. C., Godley B. J., Hays G. C., 2001. Trophic status drives interannual variability in nesting numbers of marine turtles. *The Royal Society Proceedings* **268**, 1481-1487.
- Brodeur R. D., Sugisaki H., Hunt Jr G. L., 2002. Increases in jellyfish biomass in the Bering Sea : implications for the ecosystem. *Marine Ecology Progress Series* **233**, 89-103.
- Cambers G., 1997. Beach changes in the eastern Caribbean islands: hurricane impacts and implications for climate change. *Journal of Coastal Research*, Special Issue **24**, 29-38.
- Chaloupka M., 2003. Stochastic simulation modeling of loggerhead sea turtle population dynamics given exposure to competing mortality risks in the western south Pacific region. In: Bolten A., Witherington B. *Loggerhead Sea Turtles*. Smithsonian Books, Washington DC, 274-294.
- Chaloupka M., Kamezaki N., Limpus C., 2008. Is climate change affecting the population dynamics of the endangered Pacific loggerhead sea turtle? *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **356**, 136-143.
- Coulson T., Milner-Gulland E. J., Clutton-Brock T., 2000. The relative roles of density and climatic variation on population dynamics and fecundity rates in three contrasting ungulate species. *The Royal Society Proceedings* **267**, 1771-1779.
- Drew C., Hawkes L., Pesquero M., Baker J., Hansen L., 2007. Marine turtles : a vehicle to understand and adapt to climate change in marine and coastal ecosystems. WWF- Mac Arthur Workshop. Poster.
- Finkler M. S., Knickerbocker D. L., Claussen D. L., 2000. Influence of hydric conditions during incubation and population on overland movement of neonatal snapping turtles. *Journal of Herpetology* **34**, 452-455
- Fish M. R., Côté I. M., Gill J. A., Jones A. P., Renshoff S., Watkinson A. R., 2005. Predicting the impact of sea level rise on caribbean sea turtle nesting habitat. *Conservation biology* **19**, 482-491.
- Godley B. J., Broderick A. C., Glen F., Hays G. C., 2002. Temperature dependent sex determination of Ascension Island green turtles. *Marine ecology* **226**, 115-124.
- Greve W. et al., 2001. Predicting the seasonality of North Sea zooplankton. *Senckenbergiana maritima* **31**, 263-268
- Grossman D., 2004. Spring forward. *Scientific American* **290**, 85-91.

- Hallett T., Coulson T., Pilkington J., Clutton-Brock T., Pemberton J., Grenfell B., 2004. Why large-scale climate indices seem to predict ecological processes better than local weather. *Nature* **430**, 71–75.
- Harley C., Hughes A., Hultgren K., Miner B., Sorte C., Thornber C., Rodriguez L., Tomanek L., Williams S., 2006. The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecology Letters* **9**, 228–241.
- Hawkes L., Broderick A., Godfrey M., Godley B., 2007. Investigating the potential impacts of climate change on a marine turtle population. *Global Change Biology* **13**, 923–932.
- Hays G. C., Richardson A. J., Robinson C., 2005. Climate change and marine plankton. *Trends in Ecology and Evolution* **20**, n° 6.
- Hays G., Broderick A., Glen F., Godley B., 2003. Climate change and sea turtles: a 150-year reconstruction of incubation temperatures at a major marine turtle rookery. *Global Change Biology* **9**, 642–646.
- Hoegh-Guldberg O., 1999. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Marine and freshwater research* **50**, 839-866.
- Hoegh-Guldberg O., 2005. Low coral cover in a high-CO2 world. *Journal of Geophysical Research* **110**.
- Horrocks J. A., Scott N. M., 1991. Nest site location and nest success in the hawksbill turtle, *Eretmochelys imbricata*, in Barbados, West Indies. *Marine Ecology Progress Series* **69**, 1-8.
- IPCC, 1997. The Regional Impacts of Climate Change: an Assessment of Vulnerability. Watson R.T., Zinyowera M. C., Moss R. H. Cambridge University Press, UK. 517p.
- IPCC, 2001. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2001: Synthesis Report. A contribution of Working Groups I, II and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Watson R.T. and the Core Writing Team. Cambridge University Press, 398p.
- IPCC, 2002. Les changements climatiques et la biodiversité. Document technique V du GIEC. 89p.
- IPCC, 2007. Summary for Policymakers. In: 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., Hanson C.E. Cambridge University Press, 7-22.
- International Sea Turtle Society, 2007. Scientists debate climate change impact on sea turtles. Newsletter.
- Jaksic F. M., Silva S. I., Meserve P. L., Gutierrez J. R., 1997 A long term study of vertebrate predator responses to an El Nino (ENSO) disturbance in western South America. *Oikos* **78**, 341-354.
- Janzen F. J., Paukstis G. L., 1991. Environmental sex determination in reptiles: ecology, evolution, and experimental design. *Quarterly Review of Biology* **66**, 149-179.
- Janzen F. J., 1994. Vegetational cover predicts the sex ratio of hatchling turtles in natural nests. *Ecology* **75**, n°6, 1593-1599.
- Janzen F. J., 1995. Experimental evidence for the evolutionary significance of temperature-dependent sex determination. *Evolution* **49**, 864-873
- Knutti R., Stocker T. F., 2000. Influence of the thermohaline circulation on projected sea level rise. *Journal of Climate* **13**. Letters.

- Limpus C., Reimer D., 1994. The loggerhead turtle, *Caretta caretta*, in Queensland: a population in decline. *Proceedings of the Australian Marine Turtle Conservation Workshop*, Canberra, Australia. Queensland Department of Environment and Heritage and Australian Nature Conservation Agency, 39–59.
- Limpus C., Reed P., Miller J., 1985. Temperature dependent sex determination in Queensland sea turtles: intraspecific variation in *Caretta caretta*. In: Grigg G., Shine R., Ehmann H. *Biology of Australasian Frogs Reptiles*. Royal Society of New South Wales, Sydney, 343–351.
- Luschi P., Hays G. C., Papi F., 2003. A review of long-distance movements by marine turtles, and the possible role of ocean currents. *Oikos* **103**, 293-302.
- Lutz P. L., Musick J. A., 1997. *The biology of sea turtles*. CRC press Marine science biology. 432 p.
- Madsen T., Shine R., 1999. The adjustment of reproductive threshold to prey abundance in a capital breeder. *Journal of Animal Ecology* **68**, 571-580.
- McCleery R. H., Perrins C. M., 1998. Temperature and egg-laying trends. *Nature* **391**, 30–31.
- McMahon C., Hays G., 2006. Thermal niche, large-scale movements and implications of climate change for a critically endangered marine vertebrate. *Global Change Biology* **12**, 1330–1338.
- Miller K., 1993. The improved performance of snapping turtles (*Chelydra serpentina*) hatched from eggs incubated on a wet substrate persists through the neonatal period. *Journal of Herpetology* **27**, 233-236
- Mortimer J. A., 1995. Factors influencing beach selection by nesting sea turtles. In: Bjorndal K. A., *Biology and conservation of sea turtles*. Smithsonian Institution Press. Washington DC, 45-51.
- Musick J. A., Limpus C. J., 1997. Habitat utilization and migration in juvenile sea turtles. In: Lutz P. L., Musick J. A., *The biology of sea turtles*. CRC Press, 137–164.
- Packard G. C., Miller K., Packard M. J., Birchard G.F., 1999. Environmentally induced variation in body size and condition in hatchling snapping turtles (*Chelydra serpentina*). *Canadian Journal of Zoology* **77**, 278-289.
- Paskoff R., 1994. *Les littoraux, impact des aménagements sur leur évolution*. Paris, Masson, coll.Géographie, 254 p.
- Petit J., Prudent G., 2008. *Changement climatique et biodiversité dans l'outre-mer européen*. UICN, Bruxelles. 174 p.
- Pike D., Antworth R., Stiner J., 2006. Earlier nesting contributes to shorter nesting seasons for the loggerhead seaturtle, *Caretta caretta*. *Journal of Herpetology* **40**, 91–94.
- Post E., Stenseth N. C., 1999. Climatic variability, plant phenology and northern ungulates. *Ecology* **80**, 1322-1339.
- Reaser J. K., Pomerance R., Thomas P. O., 2000. Coral bleaching and global climate change: scientific findings and policy recommendations. *Conservation biology* **14**, n°5, 1500-1511.
- Reece J., Castoe T., Parkinson C., 2005. Historical perspectives on population genetics and conservation of three marine turtle species. *Conserv. Genetics* **6**, 235–251.
- Rhen T., Lang J. W., 1999. Temperature during embryonic and juvenile development influences growth in hatchling snapping turtles, *Chelydra serpentina*. *Journal of Thermal Biology* **24**, 33-41.
- Richardson A. J., Schoeman D.S., 2004. Climate impact of plankton ecosystems in the Northeast Atlantic. *Science* **305**, 1609–1612.

Root T., Price J., Hall K., Schneider S., Rosenzweig C., Pounds J., 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature* **421**, 57–60.

Saba V., Pilar S., Reina R., Spotila J., Musick J., Evans D., Paladino F., 2007. The effect of the El Niño Southern Oscillation on the reproductive frequency of eastern Pacific leatherback turtle. *Journal of Applied Ecology* **44**, 395–404.

Short F. T., Neckles H. A., 1999. The effects of global climate change on seagrasses. *Aquatic Botany* **63**, 169–196.

Solow A. R., Bjørndal K. A., Bolten A. B., 2002. Annual variation in nesting numbers of marine turtles: the effect of sea surface temperature on re-migration intervals. *Ecology Letters* **5**, 742–746.

Taylor A. H., Allen J. I., Clark P. A., 2002. Extraction of a weak climatic signal by an ecosystem. *Nature* **416**, 629–632.

Thomas C. D., Cameron A., Green R. E., Bakkenes M., Beaumont L. J., Collingham Y. C., Erasmus B. F. N., Ferreira de Siqueira M., Grainger A., Hannah L., Hughes L., Huntley B., van Jaarsveld A. S., Midgley G. F., Miles L., Ortega Huerta M. A., Peterson A.T., Phillips O. L., Williams S. E., 2004. Extinction risk from climate change. *Nature* **427**, 145–148.

UNEP, 2006. In dead waters - disponible en ligne: < http://www.unep.org/pdf/InDeadWater_LR.pdf >

Vieux C., Chancerelle Y., Aubanel A., Salvat B., 2008. Les modifications de la ligne de ravinage dans les îles de la Société (Polynésie française) : un indicateur des pressions anthropiques en zone côtière. *Journal de la Société des Océanistes*, 126-127, année 2008-1/2.

Wallace B., Jones T., 2008. What makes marine turtles go: a review of metabolic rates and their consequences. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **356**, 8–24.

Walker T. A., Parmenter C. J., 1990. Absence of a pelagic phase in the life cycle of the flatback turtle, *Natator depressa* Garman. *Journal of Biogeography* **17**, 275–278.

Webster P. J., Holland G. J., 2005. Changes in tropical cyclone number, duration and intensity in a warming environment. *Science* **309**, 1844–1846.

Weishampel J. F., Bagley D. A., Ehrhart L. M., 2004. Earlier nesting by loggerhead sea turtles following sea surface warming. *Global change biology* **10**, 1424–1427.

Wilkinson C., Linden O., Cesar G., Hodgson G., Rubens J. and Strong A.E., 1999. Ecological and socioeconomic impacts of 1998 coral bleaching in the Indian Ocean : an ENSO impact and a warning of future change? *Ambio* **28**, 188–196.

Wilkinson C., 2004. Status of coral reefs of the world: 2004. United States coral reef taskforce, Australian Institute of marine Science, Townsville, Australia.

Wikelski M., Thom C., 2000. Marine iguanas shrink to survive El Niño. *Nature* **403**, 37–38.

Wuehrich B., 2000. How climate change alters rhythms of the wild. *Science* **287**, 793–795.