

CRISP Coordinating Unit has been integrated to the Secretariat of the Pacific Community since April 2008 to insure maximum coordination and synergy in the actions related to coral reefs management in the region.

The Initiative for the Protection and Management of Coral Reefs in the Pacific (CRISP), sponsored by France

CRISP Coordinating Unit (CCU)
Programme Manager:
SPC - PO BOX D5 - 98848 Noumea Cedex
New Caledonia
Tel./Fax: (687) 26 54 71
E-mail: ericc@spc.int
www.crisponline.net

CRISP is funded by the following partners:

Presentation of authors.....
Forewords.....

SECTION 1

BERNARD SALVAT (FRANCE) professor at the École Pratique des Hautes Études (EPHE), attached to the Research Unit UMR 5244 CNRS-EPHE-UPVD in Perpignan. After getting a PhD at the Sorbonne University in 1967, he started his work on coral reefs in New Caledonia before moving to French Polynesia where he created the CRIOBE in Moorea. Bernard worked around the planet trying to combine nature conservation issues with human activities. Author of several books and publications on French overseas territories, he played a critical role in the creation and strengthening of the ICRI and the ICRS, for which he organized the Vth symposium in Tahiti in 1985. Bernard was appointed as scientific advisor of the CRISP programme in May 2005.

DENIS ALLEMAND (MONACO) professor of Biology at the Nice-Sophia Antipolis University, is presently scientific director of the Monaco Scientific Center as well as a member of the scientific and technical committee of the Prince Albert II of Monaco Foundation. Denis is a biologist with particular research experience on physiology of marine organisms (sea urchins and cnidarians). He is now focussing on the study of coral physiology (over 90 papers published in this area), with particular emphasis on both biomineralization and symbiosis in the context of climate change (global warming, ocean acidification). In addition he has delivered 18 conference papers at national and international conferences and he is member of the European Academy of Arts, Sciences and Humanities, and of the Commission RAMOGE aiming at the protection of coastal marine environment.

By Dominique Rojat,
Environmental economist
Agence Française de Développement

Whereas, according to the latest Status of coral reefs of
the world: 2008 report TJ -21c8

The problem of ocean acidification ... a planetary issue with multiple scientific, economic and political ramifications ... can only be resolved, if indeed a solution can be found one day, by collective action involving mutually supporting approaches. This review, courtesy of Bernard Salvat and Denis Allemand, addresses such a prospect. The consequences of ocean acidification for the sustainability of coral structures, on which millions of people inhabiting the coastal zones of tropical oceans depend for their economic livelihood, food resources and indeed physical security, which are also major biodiversity reserves, was naturally a strong focus for the CRISP (Coral Reef Initiatives for the Pacific), programme, mainly funded by the French Development Agency (AFD) and the French Global Environment Facility (FGEF) since 2005. The programme's main scientific partner, Joint Research Unit 5244, based on a joint venture between the École Pratique des Hautes Études (EPHE) and the National Centre for Scientific Research (CNRS), was mobilised by AFD to determine the status of available knowledge on this issue.

As early as the 19th Century, Svante ARRHENIUS, from Sweden, highlighted the fact that human beings were modifying the content of the atmosphere in terms of Carbon gas through the use of coal. Using an easy calculation, he estimated that our planet would see a rise of five degrees Celsius by the end of the 20th Century... However, it is only since the 1970s that this issue of the potential human impact on the climate has attracted full scientific attention (Mégie et al., 2002).

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), was created in 1988 by the United Nations Environment Programme (UNEP) and by the World Meteorological Organization. The IPCC has been reporting on this topic subsequently in 1990, 1995, 2001 and 2007.

The acknowledgement of human activities as a cause for climate change has evolved throughout those reports, although it is still controversial.

XIn 1990: The conclusion of the report was that •we do not really knowŽ;

XIn 1995: •A set of clues is suggesting an influence of human beings on global climate changeŽ, meaning a •maybeŽ, which led to the Kyoto Conference (1997);

X

Smith and Buddemeier (1992) were probably the first scientists to pinpoint the effects of climate change on corals, indicating that a doubling of the CO_2 concentrations would lead to decreased pH, which in turn would reduce carbonate concentrations by 2/3 in tropical waters. This would then result in a drop in calcification amongst calcareous skeleton organisms.

In 2004, researchers were ranking acidification as the 37th threat within the 40 identified threats pending on coral reefs future (Kleypas and Eakin, 2007). Today, that ranking has changed within the scientific community, because in 2008, acidification had emerged near the top of threats to the long-term survival of coral reefs. More than 3000 leading coral reef scientists and managers at the 11th International Coral Reef Symposium in Florida (July 2008), concluded that climate change was proceeding much faster than in previous ice-age transitions, and predicted that coral reefs will be seriously damaged by rising temperatures and increasing ocean acidification.

1. ACIDIFICATION PHENOMENON AND CALCIFICATION

1.1. Carbon cycle and anthropogenic CO_2 emissions

The carbon cycle in nature includes flows between atmosphere, ocean and biosphere. It involves organic carbon (sugars and carbohydrates) and inorganic carbon such as carbon dioxide, CO_2 , or calcium carbonate (CaCO_3) as a solid form. As the content of carbonated minerals on the planet contains 30 000 times more inorganic carbon than the atmosphere (Berner et al., 1983), it was believed for a long time that reefs were a CO_2 absorption source to the extent that calcification was proposed as a possible way to store the excess anthropogenic CO_2 (Karube et al., 1992). If reefs are indeed a source of carbon absorption, they cannot be a source of CO_2 absorption, as the production of CaCO_3 creates one Hion, which after titration with bicarbonate produces CO_2 (Gattuso et al., 1999). Instead, coral reefs are indeed a source of CO_2 for the atmosphere. This remains however very low, around 0.02 to 0.08 Gt C per year (Ware et al., 1991), therefore 0.27 to 1.11% of CO_2 current anthropogenic emissions (IPCC 2007).

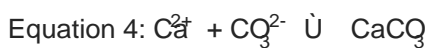
CO_2 concentration in the atmosphere went from 280 parts per million (ppm) at the beginning of the industrial revolution around 1850, to 360 ppm in 1996 (IPCC, 1997), then to 378

PART 1 - ACIDIFICATION PHENOMENON AND CALCIFICATION

increase, whereas bicarbonate ion concentration increases. Oceanic water pH within the surface layers is usually alkaline at around 8.1-8.2. It is to be noted that pH is a logarithmic function of hydrogen ion concentration and that a difference of 0.1 pH unit represents either a 30% increase or decrease in hydrogen ions. Furthermore, it is important to note that the expression "ocean acidification" may lead to misunderstanding in the short term, as oceans will not strictly become acidic (pH lower than 7). They are simply becoming less alkaline, getting more and more acid as the pH diminishes.

1.3. Calcification in calcareous skeleton (or test) organisms

Organisms with a calcareous skeleton (CaCO_3) ensure their own calcification through the global equation involving calcium dissolved in seawater (Ca^{2+}) and carbonate ions (CO_3^{2-}) to create calcium carbonate CaCO_3 (Equation 4).



We will not go further than this simple equation on calcification and

2. OBSERVED EFFECTS OF ACIDIFICATION ON CORALS

After the observation of changes occurring in seawater, we will

are contradictions in the research published to date: calcification decreases by 50% when temperature and $p\text{CO}_2$ partial pressures are high, but calcification does not change when $p\text{CO}_2$ is double and temperature remains stable. They consider that predictions of a calcification decline by 2100 should be revised. The same conclusion was expressed by Atkinson and Cuet (2008). Recently, Rodolfo-Metalpa et al. (2009) obtained similar results on corals from the Mediterranean Sea. Those variations are difficult to explain. Two hypotheses may explain this: i) there is a species variation of coral responses to CO_2 increase. To support this hypothesis, we note that the effects of water acidification have only been studied on 15 scleractinian coral species, whereas there are 1300 hermatypic and ahermatypic corals (Cairns 1999, Erez et al., In press); thus there may be experimental artefacts. Indeed, most expe-

3. PREDICTIONS ON OCEAN ACIDIFICATION AND CONSEQUENCES FOR CORAL REEFS

3.1. Predictions on seawater chemistry

With steadily increasing emissions of CO_2 to the atmosphere, pH in surface waters will have dropped by 0.4 to 0.5 units in 2100 according to IPCC (Raven et al., 2005), in other words pH value will drop from 8.2 to 7.8. The phenomenon would be accompanied by an increase of the current hydrogen ion concentration by a factor 3. The speed of pH change would thus be a hundred times higher than it has been during the last million years. This 7.8 pH, predicted for 2100, has not occurred in the oceans since the Middle Eocene time, 45 million years ago (Veron, 2008). Ocean waters from high latitudes (cold waters) would mainly be affected. This level of acidification would be irreversible and would last for thousands of years. Caldeira and Wickett (2003) have predicted a drop of 1.4 pH units by the end of the 23rd century. Such a drop has never occurred in the last 300 million years except during isolated disasters.

We must underline that pH evolution according to the several scenarios from IPCC is well estimated by specialists, whereas consequences for calcified organisms and ecosystems are much less demonstrated, as we will see later on.

3.2. Predictions on coral reef futures

Since 1998, Gattuso et al. (1998) have stated that coral calcification did not evolve during the last Ice Age (Interglacial Period), while there were minimal variations in carbonate ion concentrations, however such a future decrease might lead to a significant drop in calcification.

Much research work has focussed on the fact that a rise in dissolved CO_2 in the oceans will lead to a decline in calcification that will eventually end up in total dissolution (Kleypas et al., 1999, 2006; Raven et al., 1994), along with mechanical and biological erosion forces that threaten coral reefs. A decrease of 0.2 pH units could reduce the calcification rate by 20 to 50% and will lead to a dissolution phenomenon (Kleypas et al., 2006). With atmospheric CO_2 concentrations of 800 ppm, the pH decrease would be around 0.4 units (Riebesell et al., 2008; Caldeira and Wickett, 2003) and carbonate ion concentrations would decrease by 60%, causing reef erosion. After his paleo-

Dès le XIXe siècle, le Suédois Svante ARRHENIUS, attire l'attention sur le fait que l'homme est en train de modifier la composition de l'atmosphère en gaz carbonique à travers l'utilisation du charbon. A partir d'un calcul relativement simple, il estime que notre planète devrait se réchauffer de 5°C d'ici à la fin du XXe siècle. Mais ce n'est qu'à partir des années 1970 que ce problème de l'action potentielle des activités humaines sur le

Smith et Buddemeier (1992) furent parmi les premiers à attirer l'attention des e ets du changement climatique sur les coraux. La concentration en CO_2 est actuellement proche de 381 ppm en 2006 (Canadell et al. 2007). Elle est actuellement proche de 390 ppm et pourrait atteindre la valeur de 450 ppm entre 2030 et 2050 selon les scénarios (GIEC 2007). Les activités humaines sont en grande partie responsables de cette élévation, notamment à la suite de l'utilisation des réservoirs fossiles d'hydrocarbures. Les activités humaines entraînent une diminution de la calcification des organismes à tests notamment à la suite de l'acidification des océans.

En 2004 les chercheurs classaient l'acidification au 37ème rang des 40 menaces identifiées mettant en danger l'avenir des récifs (Kleypas et Eakin 2007). La communauté scientifique en fait actuellement la menace essentielle pour la survie des récifs coralliens. Plus de 3000 scientifiques et gestionnaires, réunis au 11ème Symposium International sur les Récifs Coralliens en juillet 2008 en Floride, ont estimé que le changement climatique se produirait plus rapidement qu'au cours des transitions glaciaires. Ils ont prédit que les récifs coralliens seraient sérieusement dégradés par l'augmentation de température et l'accroissement de l'acidification des océans.

1. LE PHÉNOMÈNE D'ACIDIFICATION ET LA CALCIFICATION

1.1. Le cycle du carbone et les rejets anthropiques de CO_2

Le cycle du carbone dans la nature comporte des processus qui ont lieu entre l'atmosphère, l'océan et la biosphère. Ils mettent en jeu du carbone organique (sucre et carbohydrates) et du carbone inorganique comme le gaz carbonique ou dioxyde de carbone, CO_2 ou le carbonate de calcium (CaCO_3) une forme solide. À cause du fait que les roches carbonatées à la surface du globe stockent 30 000 fois plus de carbone inorganique que l'atmosphère (Berner et al. 1983), on a longtemps cru que les récifs étaient un puits de CO_2 à tel point que la calcification a été proposée comme un stockage possible de l'excès de CO_2 anthropogénique (Karube et al. 1992). S'ils représentent bien un puits de carbone, ils ne peuvent constituer un puits de CO_2 la formation de CaCO_3 libérant un H^+ qui après titration avec du bicarbonate, produit du CO_2 (Gattuso et al. 1999). Les récifs coralliens constituent bien une source de CO_2 pour l'atmosphère. Celle-ci reste cependant très faible, de l'ordre de 0,02 à 0,08 Gt C par an (Ware et al. 1991), soit 0,27 à 1,11 % des émissions anthropiques actuelles de CO_2 (GIEC 2007).

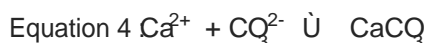
La concentration en CO_2 dans l'atmosphère est passée de 280 parties par million (ppm) au début de l'ère industrielle (vers 1850),

résultants de cette dissociation réagissent alors avec les ions carbonates, plus alcalins que les ions bicarbonates. Le résultat est une diminution de la quantité d'ions carbonates au profit de la formation d'ions bicarbonates et une diminution du pH du milieu (équation 3, sens droit ... gauche). En conclusion, la concentration en ions carbonates décroît avec l'augmentation de la concentration de CO₂ aqueux et atmosphérique, alors que la concentration en ions bicarbonates augmente.

Le pH des eaux océaniques de surface est actuellement alcalin et de l'ordre de 8,1 ... 8,2. Rappelons que le pH est une fonction logarithmique de la concentration en ions hydrogène et qu'une variation de 0,1 unité pH représente 30% d'ions hydrogène en plus ou en moins. Il est à noter que le terme d'acidification des océans peut prêter à confusion car à court terme, les océans ne deviendront pas réellement acides (c'est-à-dire un pH inférieur à 7). Ils deviennent simplement moins alcalins en s'acidifiant petit à petit au fur et à mesure que le pH diminue.

1.3. La calci cation chez les organismes à squelettes calcaire

Les organismes à squelettes calcaire (CaCO₃) mesurent leur calci cation selon l'équation globale faisant intervenir le calcium dissous dans l'eau de mer (Ca²⁺) et les ions carbonates (CO₃²⁻) pour donner du carbonate de calcium CaCO₃ (équation 4).



Nous resterons sur cette équation simple de la calci cation sans entrer dans le détail de la physiologie intracellulaire du corail qui fait intervenir le pH et le rapport des ions carbonates aux ions bicarbonates. En effet, bien que ce point ne soit pas connu de façon précise, il semble qu'une large part de la source de carbone utilisée provienne du CO₂ issu du métabolisme de l'association corail/zooxanthelles (Érez 1978 ; Furla et al. 2000).

La forme ionique ab(2)5.8i1érouolsuesyesenir e mer .1(•)26.7(éq)]Tp.8(ellulJ T* .0395915.962 12.0822 T[(et à x.1(tudes5.8(ellula

PREAMBULO

Ya en el siglo XIX, el químico sueco Svante ARRHENIUS puso de relieve el hecho de que el hombre estaba modificando la proporción de gas carbónico presente en la atmósfera debido al uso del carbón. Estimó, en base a un cálculo relativamente sencillo, que desde entonces hasta fines del siglo XX la temperatura de nuestro planeta debía aumentar 5 grados centígrados. Sin embargo, hubo que esperar hasta los años 1970 que este problema de la acción potencial de las actividades humanas en el clima fuera objeto de la atención de los científicos (Mégie et al. 2002).

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) fue creado en 1988 por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM). El IPCC ha presentado sus informes, de manera sucesiva, en 1990, 1995, 2001 y 2007.

El reconocimiento de la causalidad de las actividades humanas en el cambio climático, que sigue siendo objeto de cierto debate, ha variado según los diferentes informes del IPCC.

En 1990 el informe sobre este tema se puede resumir de la manera siguiente: •no se sabe mucho•.

En 1995: •Un conjunto de elementos sugiere

cu las pes , en ptila 21(C.e estaba mo el C)7(am94 -1.3.22170 Tc .38D.1149.8(esu sil hecholuos cienuera)))TJ e a ci3* -.8

Smith y Buddemeier (1992) contaron entre los primeros en llamar la atención sobre los efectos del cambio climático en los corales al indicar que una duplicación de la concentración de CO_2 que generara una disminución del pH, podía reducir en dos tercios la concentración de carbonatos en las aguas tropicales y conllevar así a una disminución de la calcificación de los organismos con caparazón o esqueleto calcáreo.

En el año 2004 los investigadores clasificaron la acidificación en el 37.º lugar de las 40 amenazas identificadas que ponen en peligro el futuro de los arrecifes (Kleypas y Eakin, 2007). La comunidad científica considera que, en la actualidad, la acidificación constituye la amenaza principal.

1. EL FENÓMENO DE ACIDIFICACIÓN Y LA CALCIFICACIÓN

1.1. El ciclo del carbono y las emisiones antrópicas de CO_2

El ciclo del carbono en la naturaleza consta de procesos que ocurren entre la atmósfera, el océano y la biosfera. Estos organismos liberan carbono orgánico (azúcar y carbohidratos) y carbono inorgánico, como el gas carbónico o dióxido de carbono (CO_2) o el carbonato de calcio (CaCO_3) en forma sólida. Debido al hecho de que las rocas carbonatadas que se encuentran en la superficie del globo almacenan 30.000 veces más carbono inorgánico que la atmósfera (Berner et al. 1983), se creyó durante mucho tiempo que los arrecifes eran un sumidero de CO_2 a tal punto que se propuso la calcificación como un posible almacenamiento del exceso de CO_2 antropogénico (Karube et al. 1992). Si bien los arrecifes representan un sumidero de carbono, éstos no pueden ser un sumidero de CO_2 , ya que la formación de CaCO_3 libera un ión H^+ que después de titración con bicarbonato produce CO_2 (Gattuso et al. 1999). Los arrecifes coralinos constituyen una fuente de CO_2 para la atmósfera. Sin embargo, ésta sigue siendo muy baja, entre 0,02 y 0,08 Gt C por año (Ware et al. 1991), es decir, entre un 0,27 y un 1, 11% de las emisiones antrópicas de CO_2 .

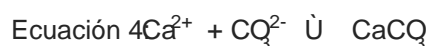
PARTE 1 - EL FENÓMENO DE ACIDIFICACIÓN Y LA CALCIFICACIÓN

que los iones de bicarbonato. Esto da como resultado una disminución de la cantidad de iones de carbonato, favoreciendo la formación de iones de bicarbonato (ecuación 3, entre los tejidos y el esqueleto (Moya et al. 2008; véase para tido derecha - izquierda) y una disminución del pH del medio (mediante producción simultánea de iones H^+), es decir, una acidificación. Se concluye que la concentración de iones de bicarbonato disminuye con el aumento de la concentración de CO_2 acuoso y atmosférico, mientras que aumenta la concentración de iones de bicarbonato.

Actualmente, el pH de las aguas superficiales de los océanos es alcalino y se ubica entre 8,1 y 8,2. Debemos recordar que el pH es una función logarítmica de la concentración de iones de hidrógeno y que una variación de 0,1 unidad pH representa un aumento o una disminución del 30% de iones de hidrógeno. Es menester recalcar que la acidificación de los océanos puede crear confusión porque, a corto plazo, los océanos no llegarán a ser realmente ácidos (es decir con un pH inferior a 7). Éstos simplemente se tornan menos alcalinos debido a que se acidifican paulatinamente, a medida que disminuye el pH.

1.3. La calcificación de los organismos con caparazón o esqueleto calcáreo

Los organismos con caparazón o esqueleto calcáreo se calcifican según la ecuación global en la que intervienen calcio disuelto en agua de mar (Ca^{2+}) y los iones de carbonato (CO_3^{2-}) para dar carbonato de calcio (ecuación 4).



Nos quedaremos con esta ecuación simple sobre la calcificación sin entrar en los detalles de la fisiología intracelular del coral que hace intervenir el pH y la relación entre los iones de carbonato y los iones de bicarbonato. De hecho, aunque este aspecto aún no se haya establecido con exactitud, parece que gran parte de la fuente de carbono utilizada proviene del CO_2 producto del metabolismo de la asociación coral/zooxantela (Erez 1978; Furla et al. 2000). La forma iónica absorbida

por el coral podría ser el bicarbonato que se transformaría a nivel del espacio extracelular comprendido entre los tejidos y el esqueleto (Moya et al. 2008; véase para una revisión Allemand et al. 2004, en prensa). A pesar de que, aparentemente, los mismos implican una modificación local del pH generada por el funcionamiento de la proteína de transporte del calcio hacia ese espacio, la Ca^{2+} ATPasa, que funciona como un intercambiador Ca^{2+}/H^+ (Allemand et al. 2004, en prensa; Zoccola et al. 2004).

Parece ser, en primera aproximación, que la concentración de iones de carbonato constituye un parámetro importante que controla la calcificación (Langdon et al. 2000, Raven 2006, Schneider y Erez 2006). Cuando hay un 100% de saturación de carbonato de calcio (calcita o aragonita), hay un equilibrio entre su fase mineral y su fase acuosa. Por debajo de un 100% la solución es subsaturada y puede haber disolución, mientras que por encima de un 100% la solución es sobresaturada y puede ocurrir la precipitación (Morse y Mackenzie 1990). Las concentraciones de iones de carbonato varían del simple al doble entre las altas latitudes (aguas frías) y las bajas latitudes (aguas cálidas), pero actualmente todas son sobresaturadas en carbonatos de calcio (Orr et al. 2005). Sin embargo, el esqueleto del coral vivo está cubierto por los tejidos del animal, los cuales están fijados al esqueleto mediante sistemas de anclaje muy compactos (Muscatine et al. 1997). De esta manera, los tejidos aíslan el esqueleto del medio externo. El animal parece controlar rigurosamente la composición del fluido pericristalino y mantiene el grado de saturación de la aragonita muy por encima del valor del agua de mar. Por lo tanto, corales incubados durante 8 días en un agua de mar altamente subsaturada en aragonita, continúan calcificando (Cohen et al. 2009). Esta observación hace pensar que por lo menos ciertos corales podrían mantener una tasa de calcificación significativa, aun cuando el agua de mar se torne subsaturada en $CaCO_3$. No obstante, hasta la fecha, no se puede afirmar que todos los corales posean la misma propiedad. Además no se debe olvidar que la construcción del arrecife es el resultado de un equilibrio entre biomineralización y disolución. Si ésta es mayor que la actividad de construcción, el equilibrio neto se orientará hacia la desaparición del arrecife.

2. EFECTOS DE LA ACIDIFICACIÓN CONSTATADOS EN LOS CORALES

Después de constatar los cambios ocurridos en el agua de mar, examinaremos los estudios realizados sobre corales, tanto los de índole experimental, llevados a cabo en laboratorio y mesocosmos, como los realizados con colonias coralinas en medio natural.

2.1. Constataciones acerca del agua de mar

Se constata que el pH ha bajado 0,1 desde el comienzo de la era industrial. Por lo tanto, el mismo se ha •acidado• a pesar de seguir siendo alcalino. Esta disminución del pH se debería a que aproximadamente un tercio de la emisión de CO_2 por parte de los seres humanos se disuelve en el agua de mar (Raven et al. 2005). Esta disminución del pH sólo ha empezado en las aguas superficiales, es decir, en los primeros doscientos metros de profundidad (Haugan et al. 2006).

Después de haber realizado modelizaciones, Orr et al. (2005) concluyeron que en las aguas cálidas se registraba una disminución de un 10% de la concentración de iones de carbonato en comparación con la era preindustrial. Esta disminución es más acentuada en las aguas frías de las latitudes altas debido a una solubilidad de CO_2 superior a la de las aguas cálidas. El pH disminuyó aproximadamente 0,1 unidad durante el mismo período

presión parcial de CO_2 son altas, pero la calcificación permanece normal en caso de una duplicación de $p\text{CO}_2$ la temperatura se mantiene estable. Ellos consideran que se deben revisar las predicciones de disminución de la calcificación para 2100. Atkinson y Cuet (2008) también comparten esa opinión. Recientemente, Rodolfo-Metalpa et al. (2009) obtuvieron un resultado similar en relación con los corales del Mediterráneo. Estas diferencias son difíciles de explicar. Se pueden formular dos hipótesis: i) variabilidad específica de las reacciones de los corales al aumento de CO_2 . Es menester señalar, en apoyo a esta hipótesis, que los efectos de la acidificación de las aguas han sido estudiados experimentalmente en sólo 15 especies de escleractinarios cuando existen 1.300 especies de corales hermatípicos y ahermatípicos (Cairns 1999, Erez et al., en prensa); ii) artefacto experimental. De hecho, la mayoría de los experimentos se han realizado mediante adición de ácido (HCl) en vez de adición de CO_2 , a pesar de que éste reproduce con más fidelidad las condiciones futuras. Asimismo, con el mismo coral (*Stylophora pistillata*), si bien el primer método produce una disminución de la calcificación (Marubini et al. 2008), el segundo método no

3. LAS PREDICCIONES SOBRE LA ACIDIFICACIÓN DE LAS AGUAS Y SUS CONSECUENCIAS EN LOS CORALES Y ARRECIFES

3.1. Predicciones sobre la química del agua de mar

Si continúan las emisiones de CO₂

ANNEXES

References/Bibliographie/Bibliografía.....	X27-29
Figures.....	X30-31
Summary/Résumé/Resumen.....	X32

Albright, R., Mason, B. and Langdon, C. (2008). Effect of aragonite saturation state on settlement and post-settlement growth of *Porites astreoides* larvae. *Coral Reefs* 27, 485-490.

Allemand, D., Ferrier-Pagès, C., Furla, P., Houlbrèque, F., Puvel, S., Reynaud, S., Tambutté, É., Tambutté, S. and Zoccola, D. (2004). Biomineralisation in reef-building corals: from molecular mechanisms to environmental control. *C.R. Palévol.* 3, 453-467.

Allemand, D., Tambutté, É., Zoccola, D. and Tambuyé, S. (In press). Coral calcification, cells to reefs. In *Coral and Coral Reefs*, (ed. Z. Dubinsky): Springer.

Anthony, K., Kline, D. I., Diaz-Pulido, G., Dove, S. and Hoegh-Guldberg, O. (2008). Ocean acidification causes bleaching and productivity loss in coral reef builders. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 105, 17442-17446.

Atkinson, M. J. and Cuet, P. (2008). Possibilities of ocean acidification on coral reef biogeochemistry: topics for research. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 373, 249-256.

Berner, R. A., Lasaga, A. C. and Garrels, R. M. (1983). The carbonate-silicate geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon dioxide over the past 100 millions years. *Amer. J. Science* 283, 641-683.

REFERENCES/BIBLIOGRAPHIE/BIBLIOGRAFÍA

- Gattuso, J. P., Frankignoulle, M. and Smith, S. V. (1999). Measurement of community metabolism and significance in the coral reef CO₂ source-sink debate. *Proc. Natl. Acad. Sc. USA* 96, 13017-13022.
- Kleypas, J.A. and Eakin, C.M. (2007). Scientists' perception of threats to Coral reefs: results of a survey of coral reef researchers. *Bull. Mar. Sci.* 80, 419-436.
- Haugan, P.M., Turley, C. and Poertner, H.O. (2006). Effects on the marine environment of ocean acidification resulting from elevated levels of CO₂ in the atmosphere. Directorate for Nature Management, Trondheim, Norway, 2006-1, 1-33.
- Langdon, C., Takahashi, T., Sweeney, C., Chipan, D., Goddard, J., Marubini, F, Aceves, H, Barnet, H. and Atkinson, M. (2000). Effect of calcium carbonate saturation state on the calcification rate of an experimental coral reef. *Global Biogeochemical Cycles* 14, 639-654.
- Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P.-J., Hooten, A. J., Steneck, R. S., Greenfield, P., Gomez, E., Harvell, C. D., Sale, P. F., Edwards-Kalman, K. et al. (2007). Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science* 318, 1737-1742. <http://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstb.2006.2249>
- Laugh, J.M. and Barnes, D.J. (2000). Environmental controls on the growth of the massive coral *Porites*. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 245, 225-243.
- Hughes et al. (2003). Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs. *Science*, 301, 929-931.
- Martin, S., Gazeau, F., Orr, J. et Gattuso, J.P. (2008). Acidification des océans et ses conséquences. *Lettre pigb-pmrc France*, 21, 5-16.
- IPCC (2007). Climate changes conclusions: synthesis report. Working Group I, II and III contributions to the fourth evaluation report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (principal authors: Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (published under the supervision of)). IPCC, Geneva, Switzerland, 103 pages. Downloadable on: <http://www.ipcc.ch>
- Marubini, F., Ferrier-Pages, C. and Cuif, J.-P. (2003). Suppression of growth scleractinian corals by decreasing ambient carbonate ion concentration: a cross-family comparison. *Proc. Royal Soc. B* 270, 1-23.
- Johnson J.E. and Marshall P.A. (2007). Climate change and the Great Barrier Reef Marine Park Authority and Australian Greenhouse Office, Australia, 1-818.
- Marubini, F., Ferrier-Pagès, C., Furla, P. and Allemand, D. (2008). Coral calcification responds to seawater acidification: a working hypothesis towards a physiological mechanism. *Coral Reefs* 27, 491-499.
- Jokiel, P.L., Rogers, K.S., Kar, I.B., Andersson, A.J., Cox, E.F., and Mackenzie, F.T. (2008). Ocean acidification and calcifying reef organisms: a mesocosm investigation. *Coral Reefs*, 27, 473-483.
- Mégie, G., Barré, P. et Jouzel, J. (2002). Le réchauffement climatique : historique scientifique et politique- scénarii futurs. *Lettre pigb-pmrc France n° 14*, 67-77.
- Karube, I., Takeuchi, T. and Barnes, D. J. (1992). Biotechnological reduction of CO₂ emissions. *Adv. Biochem. Eng. Biotechnol.* 46, 63-79.
- Morse, J.W. and Mackenzie, F.T. (1990). *Geochemistry of sedimentary carbonates*. Elsevier, Amsterdam, 1-707.
- Kleypas, J. A., Buddemeier, R. W., Archer, D., Gattuso, J. P., Langdon, C. and Opdyke, B. N. (1999). Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on coral reefs. *Science* 284, 118-120.
- Moya, A., Tambutté, S., Bertucci, A., Tambutté, E., Lotto, S., Vullo, D., Supuran, C. T., Allemand, D. and Zoccola, D. (2008). Carbonic anhydrase in the scleractinian coral *Stylophora pistillata*. *J. Biol. Chem.*, 1-16.
- Kleypas, J. A., Feely, R. A., Fabry, V. J., Langdon, C., Sabine, K.L. and Robbins, L. L. (2006). Impacts of ocean acidification on coral reefs and other marine calcifiers: a guide for future research. In: A report from a workshop held 18-20 April 2005, St. Petersburg, FL, sponsored by the National Science Foundation, the National Oceanic and Atmospheric Administration and the U.S. Geological Survey, pp. 88 pp.: NSF - NOAA - USGS.
- Muscantine, L., Tambutté, E. and Allemand, D. (1997). Morphology of coral desmocytes, cells that anchor the calcicoblastic epithelium to the skeleton. *Coral Reefs* 16, 205-213.
- Orr, J. C., Fabry, V. J., Aumont, O., Bopp, L., Doney, S. C., Feely, R. A., Gnanadesikan, A., Gruber, N., Ishida, A., Joos, F. et al. (2005). Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature* 437, 681-686.

Raven, J. A. (2006). Sensing inorganic carbon as CO_2 and HCO_3^- .
Biochem. J. 396, e5-e7.

Raven, J. A. and Johnston, A. M. (1994). Algal DIC pumps and atmospheric CO_2 . In Regulation of atmospheric CO_2 and O_2 by photosynthetic carbon metabolism, eds. N. E. Tolbert and J.

FIGURES

X

Fig. 1. Past (white diamonds, data from Pearson and Palmer, 2000) and contemporary variability of marine pH (grey diamonds with dates). Future predictions are model derived values based on IPCC mean scenarios.

From Blanckford J.C. and Gilbert F.J. (2006) pH variability and CO₂ induced acidification in the North Sea. /Journal of Marine Systems/ 64, 229-241.

X

Fig. 2. From : Martin, S., Gazeau F., Orr, J., Gattuso, J.P. (2008) L'acidification des océans et ses conséquences. /Lettre PIGB PRMC France/, 21, 5-16.

X

Fig. 3. From : Martin, S., Gazeau, F., Orr, J., Gattuso, J.P. (2008) L'acidification des océans et ses conséquences. /Lettre PIGB-PRMC France/ 21, 5-16.

Fig. 4. From : Martin, S., Gazeau, F., Orr, J., Gattuso, J.P. (2008) L'acidification des océans et ses conséquences. /Lettre PIGB-PRMC France/, 21, 5-16.

X

Summary

The increase in atmospheric carbon dioxide is leading to an increase in dissolved CO_2 in the oceans, leading to another increase in hydrogen ions and therefore a relative acidification, although the pH still remains slightly alkaline. In addition, this will also lead to fewer available carbonate ions. This concentration contributes to the transformation of calcium ions from a solid state (calcium carbonate) to a liquid state. Thus, the calcification rate will similarly decrease in all carbonate skeletal organisms, including corals. The risk of such a drop in calcium carbonate saturation is that dissolution factors, combined with mechanical destruction and bioerosion, will reverse coral reef construction and fragmentation of the structure. It is generally thought that the concentration of atmospheric carbon dioxide, currently of 386 ppm, should not exceed 450-500 ppm to avoid this situation. However, according to IPCC scenarios, such values will be reached in less than a century.

More research is required to determine the effects of increasing seawater acidification on more coral species, specially through physiological studies on corals and their symbiotic zooxanthellae to establish the potential adaptability of some species.