

# LES CYCLONES TROPICAUX

Atelier Changement Climatique 2005-2006

Gibet CAMOS DAURELLA

Jean François FILIPOT

Laurent MERTZ

Khaled EMAMDEE

# Table des matières

## **1. Introduction**

### **1.1. Le changement climatique**

**1.2. Les cyclones : qu'est-ce que c'est et pourquoi on s'est intéressé à ce phénomène ?**

**1.3. Les cyclones tropicaux : synthèse des articles de Kerry Emmanuel.**

## **2. Interprétation physique du phénomène**

## **3. Modélisation et simulation numérique**

### **3.1. Modèles de changements climatiques**

3.1.1. 4 familles importantes de scénarios pour 2100

3.1.2. Mécanisme du changement climatique

### **3.2. Simulation numérique**

3.2.1. Résultats obtenus

3.2.2. Vision globale du phénomène actuel et futur

3.2.2.1. Evolution des paramètres de contrôle des cyclones.

3.2.2.2. Evolution de la pression minimale au cœur du cyclone

3.2.2.3. Evolution de la vitesse maximale des vents cycloniques

3.2.2.4. Visualisation globale des différentiels de pression au centre des cyclones et de vitesse des vents cycloniques

## **4. Conclusions et ouverture**

## **5. Annexes**

### **5.1. Modélisation FORTRAN**

# 1. Introduction

1. Le changement climatique
2. Les cyclones : qu'est-ce que c'est et pourquoi on s'est intéressé à ce phénomène ?
3. Synthèse des articles de Kerry Emmanuel

## **1.1. Le changement climatique**

Le climat varie et variera toujours pour des raisons naturelles. Toutefois, les activités humaines augmentent de façon considérable les concentrations atmosphériques de certains gaz, tels que les gaz à effet de serre (principalement le CO<sub>2</sub>), qui tendent à réchauffer la surface de la terre, et les aérosols anthropiques, qui tendent principalement à refroidir.

Le changement climatique se définit strictement comme la « variation statistiquement significative de l'état moyen du climat ou de sa variabilité, persistant pendant une période prolongée (généralement des décennies ou plus) ». Les changements climatiques peuvent être dus à des processus internes naturels ou à des forçages externes, ou encore à la persistance de variations anthropiques de la composition de l'atmosphère ou de l'utilisation des sols.

Au cours du 20<sup>ème</sup> siècle le climat de la planète a subi de nombreux changements. La température moyenne à la surface de la terre s'est élevée d'environ 0,6°C. La couverture neigeuse et les étendues glaciaires se sont réduites et le niveau de la mer s'est élevé de 10 à 20 cm. D'autres changements importants ont été observés concernant les précipitations, la nébulosité et les températures extrêmes.

Bien que des recherches plus approfondies soient nécessaires, la compréhension accrue des processus et des modèles climatiques peut nous aider à mieux comprendre et analyser une partie de ce phénomène de changement climatique et peut-être à prédire des événements futurs. On entend dire dans les médias que certains phénomènes météorologiques extrêmes devraient augmenter en fréquence et/ou en intensité en raison du réchauffement climatique, ainsi que leurs incidences : pertes en vies humaines, souffrances et dommages matériels. Des répercussions éventuelles à grande échelle, peut-être irréversibles, constituent des risques qui n'ont pas encore été évalués de manière fiable ; leur probabilité est très faible mais elle devrait augmenter avec le rythme, l'ampleur et la durée des changements climatiques.

## **1.2. Les cyclones : qu'est-ce que c'est et pourquoi on s'est intéressés par ce phénomène ?**

Dans le cadre du changement climatique il est de plus en plus habituel d'entendre parler des cyclones tropicaux. Tout le monde a entendu parler en 2005 du cyclone Katrina à la Nouvelle Orléans. L'évacuation d'une ville de plus d'un million d'habitants en Louisiane, dans un pays fortement développé nous rappelle la vulnérabilité des régions côtières face aux événements climatiques. D'autant plus qu'avec le réchauffement de la planète et la hausse des océans, les conséquences des cyclones sont amplifiées.

Pour comprendre le phénomène des cyclones nous avons eu recours à une série d'articles scientifiques qui se centrent sur les caractéristiques de ce type de phénomène climatologique.

Des chercheurs comme Kerry Emmanuel ont beaucoup étudié ce phénomène et nous ont aidé dans sa compréhension. Dans notre dossier nous allons exposer les idées et synthèses issues de la lecture d'un certain nombre d'articles scientifiques dans une première partie pour rentrer en matière. Ensuite nous allons chercher de comprendre et analyser de façon rigoureuse et scientifique le fonctionnement physique des cyclones. Finalement dans une troisième partie nous expliquerons la modélisation du phénomène que nous avons utilisée pour confirmer et approfondir sur nos hypothèses théoriques.

### **1.3. Les cyclones tropicaux : synthèse des articles de Kerry Emmanuel.**

Kerry Emmanuel est un chercheur et professeur du Massachusetts Institute of Technology qui a fait beaucoup d'études sur l'intensité des cyclones. Il pense qu'on a avancé dans la prédiction de l'intensité des cyclones et que la variation de celle-ci est liée au climat et donc aussi au changement climatique.

Les cyclones sont avec les tremblements de terre les phénomènes géophysiques qui causent les plus grandes pertes humaines et matérielles. Kerry Emmanuel estime donc qu'il est important d'étudier les variations de fréquence et d'intensité des cyclones tropicaux face aux altérations que l'homme est en train d'infliger au climat. Ce chercheur explique dans ses articles comment il utilise un cycle de Carnot simple pour estimer l'intensité maximale des cyclones sous des conditions de température plus élevées dues à l'augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> anthropique. Cette explication du fonctionnement du cyclone et de la machine de Carnot sera développée dans la partie 2 de ce dossier, lors de l'analyse physique de ce phénomène.

Ce qui nous a paru intéressant dans notre étude, c'est de voir que malgré ses recherches, il affirme ne pas pouvoir prédire les variations de la fréquence des cyclones. Il a fait des modélisations qui lui permettent d'affirmer et de justifier que dans une atmosphère où on doublerait le contenu en CO<sub>2</sub> l'intensité maximale des cyclones augmenterait remarquablement. Cependant, il ne trouve pas de raison évidente qui pourrait justifier une augmentation de la fréquence.

Nous avons lu par exemple que l'augmentation de la fréquence de cyclones tropicaux qui s'est produite dans la région atlantique depuis la moitié des années 90 avait déjà été prédite par des météorologistes et que cela s'explique par un cycle naturel de cet océan et n'est pas en lien avec le réchauffement de la planète. Pourtant l'intensité va augmenté. L'énergie liée à ces phénomènes a augmenté de 70% en moyenne dans le monde dans le courant des 30 dernières années. Cela correspond à une augmentation de 15% de la vitesse du vent maximale et à une augmentation de 60% de la durée de vie des cyclones. Kerry Emmanuel base ses recherches sur la relation existante entre la pression au centre du cyclone et la vitesse maximale du vent. Ceci lui permet de faire ses études malgré les difficultés existantes à mesurer la vitesse des vents d'un cyclone surtout jusqu'aux années 1950 mais encore dans les années 80.

Finalement ce qui met en évidence le lien entre le réchauffement climatique et l'augmentation de l'intensité des cyclones c'est que d'après toutes les observations réalisées par ce chercheur, le changement dans le cycle d'énergie du cyclone est très corrélé à l'évolution du changement de la température à la surface de la mer.

Un phénomène comme le cyclone Katrina ne devrait donc pas être associé au changement climatique mais plutôt être prévisible. Kerry Emmanuel pense qu'il faut voir à quelle échelle temporelle et spatiale on veut étudier ces phénomènes et leur prédiction, et pour cela il faut tenir compte des conditions démographiques et politiques des régions planétaires. Dans l'avenir (dans plus de 50 ans) et à une échelle planétaire, le réchauffement de la terre devrait commencer à avoir une influence visible dans l'activité cyclonique. Cette activité se verrait

intensifiée et serait en plus combinée avec l'augmentation prévisible du niveau des océans (qui amplifierait d'autant la dangerosité des cyclones).

## 2. Interprétation physique du phénomène

### 2.1) Généralités

#### 2.1.1) Définition générale

Un cyclone est un phénomène atmosphérique de grande ampleur (rayon de plusieurs centaines de kilomètres), caractérisé par des vents violents (plusieurs dizaines de mètres par seconde) tournant autour d'une zone où il existe une dépression. Un cyclone est à distinguer d'une tornade, tourbillon violent de beaucoup faible dimension. L'énergie cinétique du cyclone et l'énergie nécessaire pour l'entretenir sont fournies par l'évaporation à la surface de l'océan.

#### 2.1.2) Démarche et hypothèses :

Nous modéliserons le cycle énergétique par un cycle de Carnot, en prenant l'océan comme source chaude et la troposphère comme source froide. Le cycle sera supposé idéal nous n'obtiendrons donc qu'un majorant de la violence du phénomène.

Notre but est d'estimer la violence d'un cyclone, c'est-à-dire sa vitesse maximale. Pour cela nous allons modéliser les échanges d'énergie qui ont lieu au coeur d'un cyclone. L'idée est de faire une analogie avec les cycles de Carnot de la thermodynamique classique, en identifiant des sources chaudes (l'océan, à température constante) et froide (la haute troposphère à 200K). Ce modèle sera essentiellement thermodynamique. Nous ferons l'hypothèse d'un cycle isentropique, qui sera donc le cycle optimal de même que le rendement du cycle de Carnot d'une machine irréversible est toujours inférieur au rendement d'une machine thermique réversible, c'est-à-dire que nous supposons les pertes d'énergie nulles. Nous obtiendrons donc seulement un majorant de la vitesse. Il faudra s'en souvenir lorsque nous confronterons le modèle à la réalité.

Notons tout de suite l'importance de la force de Coriolis dans notre phénomène. Avec une échelle de longueur horizontale  $r$  de 10 km (dimension du coeur du cyclone), une latitude de  $20^\circ$ , une vitesse  $v$  de 30 m/s, on a :

$$\text{Force centrifuge} / \text{Force de Coriolis} = (v^2 / r) / f v = 60$$

L'influence du terme de Coriolis est donc faible dans la région proche du coeur du cyclone. En revanche, elle se fait plus sentir à grande échelle, quand on augmente l'échelle de longueur et réduit l'échelle de vitesse. Néanmoins elle n'apparaîtra pas directement dans nos équations.

### 2.1.3) Description et limites de ce modèle

Le modèle est donc un modèle simplifié de théorie MPI (Maximum Potential Intensity) (IMP en français) : il calcule l'intensité que pourrait avoir un cyclone s'il exploitait au maximum les ressources énergétiques de son environnement. En réalité, d'autres facteurs empêchent le cyclone d'atteindre les valeurs que nous pourrions prévoir, comme la dynamique interne du cyclone, l'environnement atmosphérique ou océanique (à cause des circulations d'eau provoquées par la circulation du vent). Il est donc normal de trouver, pour les cyclones réels, des valeurs plus petites pour la vitesse et plus élevées pour la pression que celles prévues par le modèle. Pour les modèles d'IMP existant, on estime en général qu'environ 2/3 des cyclones atteignent 50% de l'IMP, et seuls 1/5 environ dépassent 75% de l'IMP.

Notons aussi que nous n'étudierons que des cyclones stationnaires, et notre modèle ne sera pas capable de nous apprendre des choses sur la cyclogénèse ou sur les phénomènes qui vont faire disparaître le cyclone.

### 2.1.4) Hypothèses propres au modèle

**\*La température de l'océan est supposée constante**, sur plusieurs centaines de kilomètres.

On ne cherchera donc pas à déterminer des fluctuations à cause d'une différence d'un degré de température.

**\*Non prise en compte de la gravité g** : elle n'apparaît nulle part dans nos équations... En fait, elle intervient de façon cachée : d'une part, c'est elle qui est responsable du gradient de pression vertical. De plus, elle intervient dans la hauteur du cyclone (autre paramètre que nous n'avons pas pris en compte), qui détermine la température à la troposphère, donc le rendement énergétique de la machine cyclonique. Nous pouvons avoir une idée de son effet en calculant le nombre de Froude pour l'échelle verticale : échelle de hauteur : 1 km ; échelle de vitesse verticale : 1 m/s. On trouve alors :

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g \cdot d}} = 10^{-2}$$

Les effets de pesanteur sont donc importants pour la structure verticale du cyclone.

**\*L'hypothèse que l'on a un *cycle* de Carnot**. En réalité, les particules éjectées par le haut ne redescendent pas en bas pour recommencer le cycle. Mais la modélisation dit que ce sont ces particules qui perdent leur énergie à la troposphère pour redevenir des particules « normales » de l'atmosphère, qui reprennent le cycle énergétique une fois qu'elles arrivent à la surface de l'océan. Ce n'est donc qu'un artifice de calcul qui nous permet de faire un bilan énergétique pour un cycle.

### 2.1.5) Mesure de l'intensité d'un cyclone

Il est évident que l'intensité d'un cyclone est caractérisée par la vitesse du vent de surface  $V_s$ . En effet c'est lui qui engendrera (si on excepte les chutes de pluies) les dégâts matériels. La grandeur physique importante pour appréhender l'impact du vent est évidemment la force qu'exerce ce vent sur un objet. Elle est donnée par la relation suivante :

$$F = 1/2 \cdot \rho \cdot u^2 \cdot A \cdot C_D$$

Où :

- $F$  est la force exercée par le vent sur un objet
- $\rho$  est la masse volumique de l'air
- $u$  est la vitesse du vent
- $A$  la surface de l'objet sur laquelle frotte le vent
- $C_D$  le coefficient de traînée qui dépend du nombre de Reynolds ( $Re = \frac{U \cdot L}{\nu}$  avec  $L$  la longueur caractéristique de l'écoulement et  $\nu$  la viscosité de l'air)

Nous pouvons donc affirmer que l'intensité du cyclone (et donc les dégâts potentiels) augmente de façon quadratique avec la vitesse du vent.

#### Remarque sur la quantité d'eau contenue dans un cyclone

Notre modèle n'est pas capable d'évaluer la quantité d'eau contenue dans un cyclone et qui peut être potentiellement déversée sur les zones habitées. La pluie est elle aussi un critère caractérisant le potentiel destructeur d'un cyclone. Néanmoins nous allons voir que la violence du vent généré par un cyclone est directement liée à la chaleur latente que l'océan lui a cédé (voir équations (1), (2) et (3)). Or cette chaleur latente est détenue par la vapeur d'eau aspirée. On peut donc supposer que plus le vent est violent, plus l'apport en vapeur d'eau a été important est donc plus les précipitations risquent d'être importantes. En résumé, on peut avancer que l'intensité des pluies semble être prise en compte implicitement par notre modèle.



## 2.2) Présentation du cycle, écriture des équations

### 2.2.1) Le cycle :

Nous nous plaçons dans le référentiel terrestre non galiléen. Nous étudions comme système un petit volume d'air, qui va parcourir le cycle schématisé sur la figure suivante :

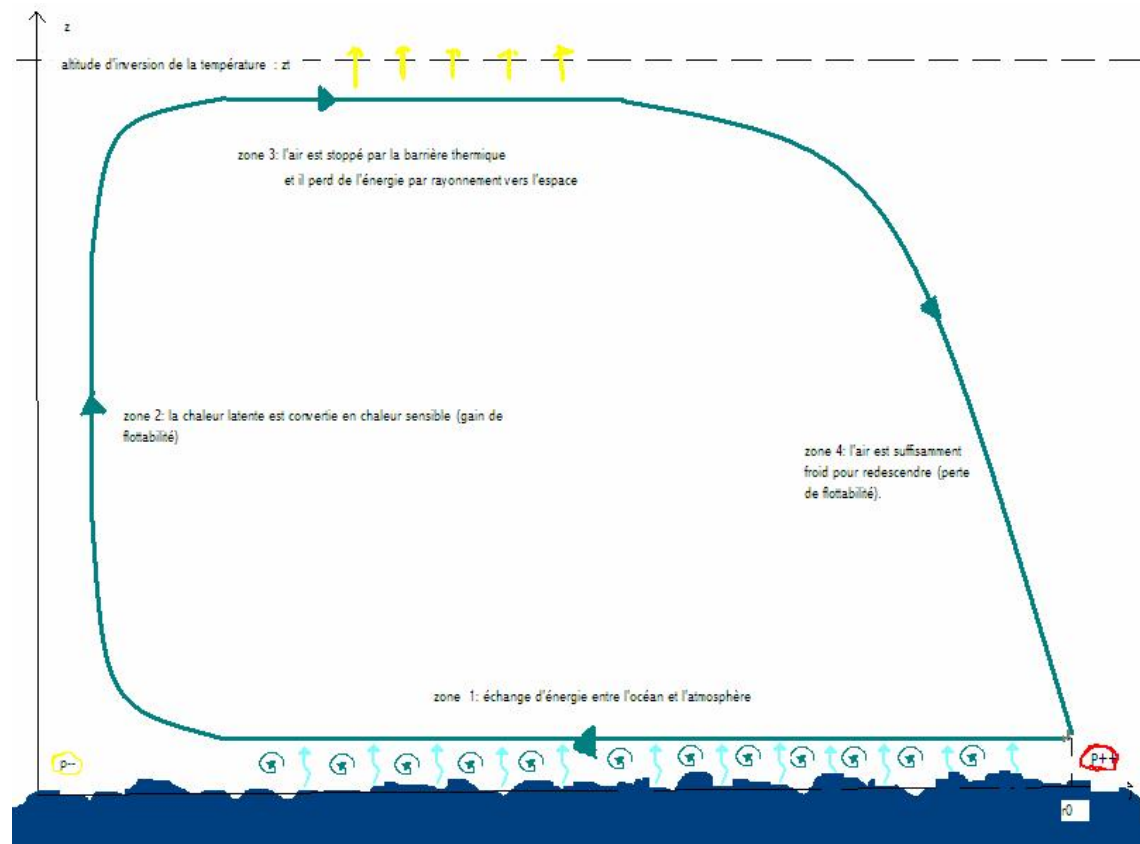


figure 1 : Le cycle de Carnot

Nous allons maintenant examiner ce cycle zone par zone.

## 2.2.2) Les différents zones

### Zone 1 :

Elle est le lieu de la production et de la dissipation d'énergie. Il y a compétition entre la force liée au gradient de pression, la force de frottements la force de Coriolis et la force centrifuge. Finalement, c'est le gradient de pression qui domine cet équilibre. On assiste alors à un mouvement convergent (plus précisément en spirale vers le centre du cyclone). Il y a donc aspiration de l'air vers le centre du cyclone Deux phénomènes physiques importants ont lieu lors de cette aspiration:

Par frottement à la surface de l'océan, l'air se charge en humidité. Ainsi, à cause de l'évaporation, la chaleur totale augmente. Notons que la phase est isotherme, l'évaporation se traduisant par un échange de chaleur, et non une augmentation de la température.

Ceci suppose que l'océan est une source au sens thermodynamique du terme. Une des conditions à la formation d'un cyclone sera que l'océan peut fournir assez d'énergie, c'est-à-dire qu'il soit à une température d'au moins 26°C sur une grande profondeur.

D'autre part la dissipation ou le transfert de l'énergie du cyclone par frottement se fait dans cette même zone. Le vent généré par le cyclone frotte sur les rugosités de l'océan (vagues, vaguelettes). L'énergie est transférée à l'océan sous forme de quantité de mouvement (apparition de courants en surface) ou est dissipée par effet joule. Notre modèle ne discerne pas la dissipation du transfert de quantité de mouvement, en effet on ne s'intéressera ici qu'à l'énergie cédée par le cyclone.

### **En résumé on a :**

**a) Un transfert d'énergie de l'océan vers l'atmosphère :** il y a apport d'énergie sous forme de chaleur latente de vaporisation (la teneur en vapeur d'eau augmente).

**b) Un transfert d'énergie de l'atmosphère vers l'océan :** il y a friction du vent sur la surface de l'océan.

Nous allons maintenant écrire les équations qui traduisent ces deux phénomènes.

**a) La quantité d'énergie par mètre carré fournie au cyclone par l'océan est :**

$$G = \varepsilon \cdot C_k \cdot \rho \cdot V_s \cdot (k_0 - k_a) \quad (1)$$

Où : -  $\varepsilon$  est l'efficacité thermodynamique du cycle thermo :  $\varepsilon = (T_s - T_0) / T_s$   
où T la température de l'atmosphère à la surface de l'océan et T celle de la surface de l'océan  
-  $C_k$  le coefficient d'échange d'enthalpie  
-  $\rho$  la masse volumique de l'air  
-  $k_0$  l'enthalpie de l'océan près de la surface (énergie), dépend de RH (taux d'humidité)

- $k_a$  l'enthalpie de l'atmosphère près de la surface (énergie)
- $V_s$  le vent de surface

**Remarque:**

$\varepsilon$  est à rapprocher du rendement théorique optimal pour un cycle de Carnot classique. Nous pouvons nous interroger sur la signification physique de ce paramètre : comme pour tous les cycles de Carnot de type « moteur »,  $\varepsilon$  est le rapport entre le travail reçu par le système et l'énergie qu'on lui a fourni avec la source chaude (ici, l'océan) (Ceci se démontre avec le deuxième principe). Ici, grossièrement,  $\varepsilon$  est le rapport entre l'énergie cinétique acquise qui sert à entretenir le cyclone et la chaleur fournie par l'océan. Notons que ce travail inclut aussi les pertes d'énergie cinétique à la surface de l'océan. **L'efficacité thermodynamique vaut environ 1/3.**

**b) La densité d'énergie dissipée par friction par le cyclone par mètre carré est :**

$$D = C_D \cdot \rho \cdot V_s^3 \quad (2)$$

Où  $C_D$  est le coefficient de traînée

**Zone 2 :**

Il y a une expansion de l'air ce qui engendre la condensation la vapeur d'eau, la chaleur latente y est donc transférée en chaleur sensible. La flottabilité de la particule d'air augmente, elle monte, le phénomène se répète tout au long de l'ascension.

Remarque : Il existe une zone de calme au centre du cyclone : un cyclone est une situation d'équilibre entre la force centrifuge, la force de Coriolis, et un gradient de pression (un cyclone est causé par une dépression). Au centre du cyclone, nous allons trouver un mur, délimitant une zone très calme anticyclonique. Ceci est dû au fait que la force centrifuge est inversement proportionnelle au rayon vecteur, et finit nécessairement par égaler le gradient de pression.

**Zone 3 :**

Pour une altitude d'environ 10 à 12 Km le profil de température s'inverse : la température augmente. La stratification des couches d'air est donc stabilisée à partir de cette altitude. Ceci implique donc que la particule d'air ne monte plus, cependant elle conserve sa quantité de mouvement est sa trajectoire est déviée horizontalement. Cette transformation est isotherme. L'air perd le reste de chaleur latente par rayonnement infrarouge. Il regagne de l'énergie cinétique par contact avec les mouvements de l'atmosphère.

**Zone 4 :**

Comme nous venons de le voir la particule lors de son mouvement horizontal rayonne de l'énergie vers l'espace jusqu'à atteindre une flottabilité (température) suffisamment basse pour lui permettre de redescendre vers l'océan.

### 2.2.3) Conclusion concernant les différentes zones

La zone 1 est donc la zone clé: elle est le lieu d'une compétition entre apport et dissipation d'énergie. La puissance du cyclone dépendra directement cet équilibre.

En effet, en intégrant sur la surface l'équation  $G=D$  ((1)=(3)) qui gouverne cette zone, en supposant que la plus grande contribution provient de l'intérieur du cercle dont le rayon est celui du vent maximum, on obtient que :

$$V_s^2 \approx \frac{C_k}{C_D} \cdot \varepsilon \cdot T_s \cdot (k_0 - k_a) \quad (3)$$

On voit donc que la violence d'un cyclone dépend de :

- la différence d'énergie (d'enthalpie, de chaleur) entre l'océan et l'atmosphère (énergie contenue dans la chaleur sensible et la chaleur latente)
- La température de la mer et aussi de l'efficacité du cycle, caractérisée par la différence de température entre l'océan et la haute atmosphère
- Le rapport  $ck/cd$

Remarque concernant le rapport  $ck/cd$  :

Il joue lui aussi un rôle remarquable : on pourrait l'interpréter ainsi :

- **(Capacité de l'océan à fournir de l'E) / (capacité de l'atmosphère à dissiper de l'E)**

Il est donc trivial que plus ce rapport est grand, plus l'intensité du cyclone peut être élevée.

### 2.3) Déductions de cette interprétation physique

Les recherches de Kerry Emmanuel visant à évaluer les variations d'intensité des cyclones dues au changement climatique se justifient donc bien. En effet d'après les prévisions, on peut craindre que :

- la température de l'océan va augmenter
- En outre on prévoit que les vents de hautes altitudes vont faiblir plus souvent dans les zones tropicales (cisaillement plus faible) : les cyclones sont alors plus hauts et mieux établis (T0 sera plus faible).

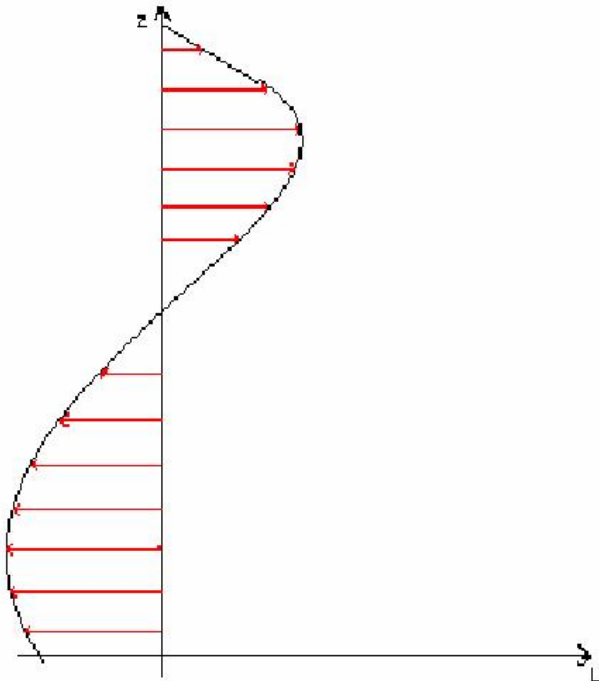
Cela risque d'entraîner un accroissement d'Epsilon et de la différence ( $K_0 - K_a$ ) et donc une augmentation de l'intensité des cyclones.

Remarque : Il faut toutefois rappeler que le modèle que nous utilisons calcule l'intensité maximale que pourrait avoir un cyclone s'il exploitait de façon optimale les ressources énergétiques de son environnement. Or cette intensité maximale n'est jamais atteinte. Il faudra en tenir compte lors de l'analyse de nos données numériques.

## 2.4) Quelques précisions nécessaires :

### 2.4.1) Précision concernant le rôle des vents d'altitudes

Pour qu'un cyclone se développe correctement il faut un faible cisaillement vertical des vents (Le cisaillement vertical est la modification de la direction ou de la vitesse du vent avec l'altitude). Un affaiblissement des vents d'altitude favorise donc une diminution de ce cisaillement. On peut supposer qu'un vent violent en altitude favorise le mélange et empêche donc l'établissement d'une structure bien définie comme celle d'un cyclone. En effet un cisaillement important désorganise une dépression tropicale naissante et l'empêche de se développer. Pour un cyclone à l'état mature, une large zone de fort cisaillement vertical du vent peut provoquer sa dégénérescence et peut-être même sa disparition dans la mesure où le cisaillement interfère avec l'organisation de la convection autour du centre du cyclone. Il est donc important de noter que les modèles numériques prévoient justement un affaiblissement des vents dans les hautes couches de l'atmosphère et principalement dans les zones intertropicales, zones de formation des cyclones.



*figure 2 : exemple de cisaillement de vent*

## 2.4.2) Précision concernant la fréquence

D'autre part les spécialistes des cyclones (notamment k. Emmanuel) ne prévoit pas d'augmentation de la fréquence des cyclones. On pourrait avancer l'hypothèse que l'augmentation simultanée de la fréquence et de l'intensité des cyclones ne serait possible que dans le cas d'une augmentation de la température de la surface de l'océan encore plus marquée que celle prédite par les modèles. En effet, lors qu'un cyclone passe au dessus d'une zone chaude et qu'il se charge en énergie (chaleur latente) la température de l'océan chute brutalement sur une assez grande profondeur (au moins 50 m). L'océan ayant, en général, une inertie thermique importante, le temps de retour à la température initial est relativement long. On peut donc émettre l'hypothèse que c'est cette même inertie qui interdirait l'augmentation simultanée de l'intensité et de la fréquence.

## 2.5) Ordre de grandeur de la puissance dégagée par un cyclone

Pour conclure sur l'interprétation physique de ce phénomène, nous allons tenter d'évaluer simplement la puissance dégagée par un cyclone et la comparer à celle d'une centrale nucléaire.

On s'intéressera exclusivement à l'énergie cinétique dans les calculs suivants.

Considérons une particule fluide quelconque et calculons l'ordre de grandeur de l'énergie cinétique (par unité de volume) qu'elle contient.

$$e_{particule} = 1/2 \cdot \rho \cdot u^2$$

- Ordre de grandeur de  $\rho = 1 \text{ Kg/m}^3$
- Ordre de grandeur de  $u = 10 \text{ m/S}$

Donc l'ordre de grandeur de  $e$  est d'environ  $10 \text{ j/m}^3$

Pour obtenir l'ordre de grandeur de l'énergie contenu dans un cyclone il faut intégrer  $e$  sur tout le volume du cyclone.

On peut supposer que la géométrie d'un cyclone est proche de celle d'un cylindre. Si l'on fait l'hypothèse (très contraignante) que l'ordre de grandeur de  $e$  est constant dans tout le volume du cyclone, le calcul de l'intégrale se restreint à :

$$E_{cyclone} = e_{particule} \cdot Vol_{cyclone} = e_{particule} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot h$$

Où:

- $R$  est le rayon du cyclone
- $H$  la hauteur du cyclone
- Ordre de grandeur  $R = 100 \text{ km}$
- Ordre de grandeur  $h = 1 \text{ km}$

On obtient donc un ordre de grandeur de  $E = 10^{11} \text{ J}$  soit pour une seconde, une puissance de  $P = 100 \text{ GW}$ . Ceci correspond à la puissance de 100 centrales nucléaires ! D'autre part on peut

aussi montrer que l'énergie libérée par un cyclone atteint les 200 à 300 kilotonnes par seconde (bombe d'Hiroshima : 20 kilotonnes). Ces calculs illustrent de façon spectaculaire le pouvoir destructeur de la formidable machine qu'est le cyclone.

### **3. Modélisation**

#### **3.1. Modèles de changements climatiques :**

Notre but est d'évaluer par une simulation numérique l'intensification de l'activité cyclonique d'ici 2100. Nous présentons donc les scénarios possibles pour le contexte économique et environnemental pour 2100. Nous utiliserons le scénario le plus pessimiste (A2).

##### **3.1.1. 4 Familles importantes de scénarios (source rapport IPCC)**

###### **A1**

La famille de scénarios A1 décrit un monde futur dans lequel la croissance économique sera très rapide, la population mondiale culminera au milieu du siècle pour décliner par la suite, et de nouvelles technologies plus efficaces seront introduites rapidement.

On devrait alors observer un renforcement des interactions culturelles et sociales accrues, avec une réduction substantielle des différences régionales dans le revenu par habitant. Cette famille se scinde en 3 groupes selon l'évolution technologique dans le système énergétique.

A1F1 : forte intensité de combustibles fossiles

A1T : sources d'énergies autres que fossiles

A1B : équilibre entre les sources

###### **A2**

La famille de scénarios A2 décrit un monde très hétérogène. Dans lequel on observera l'autosuffisance et la préservation des identités locales accompagné d'un accroissement continu de la population. Le développement économique a une orientation principalement régionale, et la croissance économique par habitant et l'évolution technologique sont plus fragmentées et plus lentes que dans les autres cas.

###### **B1**

Le cas de la famille de scénarios B1 décrit un monde convergent avec la même population mondiale culminant au milieu du siècle et déclinant par la suite, comme dans le cas A1, mais avec des changements rapides dans les structures économiques vers une économie de services et d'information, l'introduction de technologies propres et utilisant des ressources efficacement. L'accent est mis sur des solutions mondiales orientées vers une viabilité économique, sociale et environnementale, y compris une meilleure équité, mais sans initiatives supplémentaires pour gérer le climat.

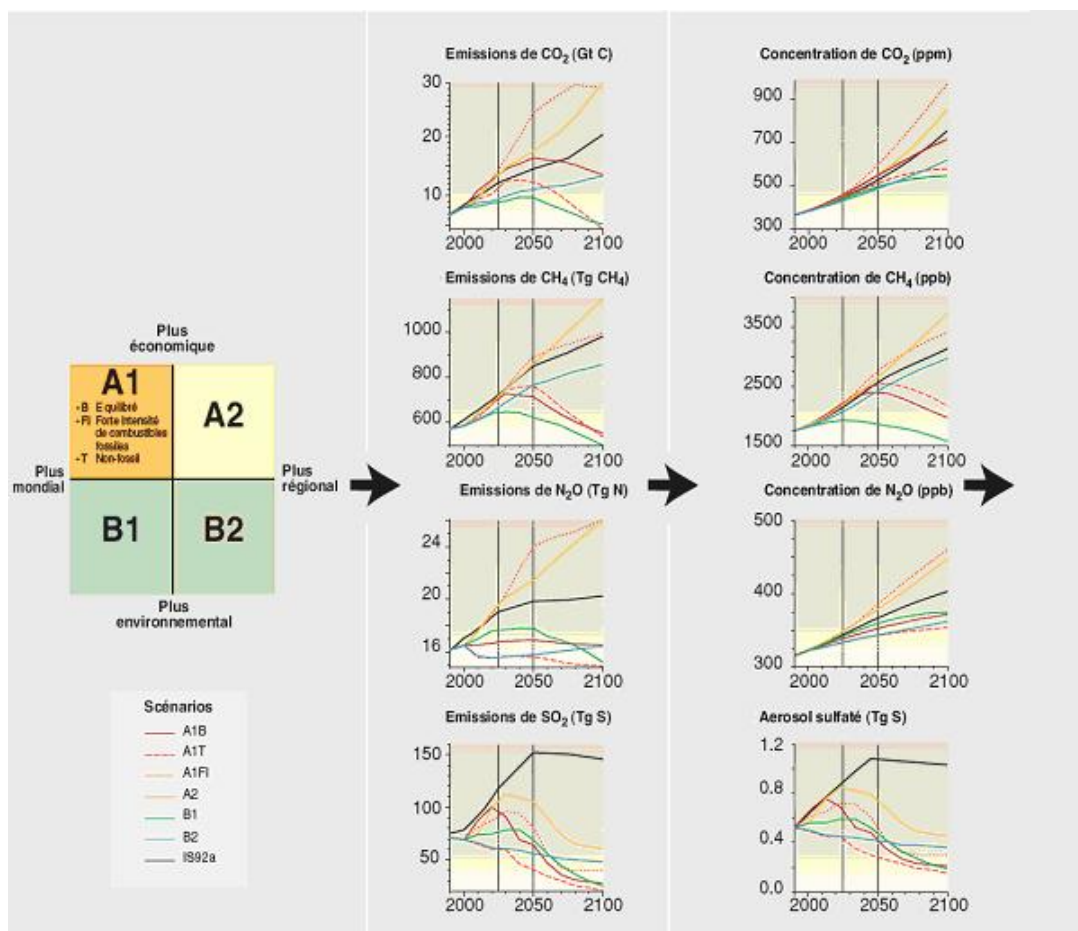
###### **B2**

Le cas de la famille de scénarios B2 décrit un monde où l'accent est mis sur des solutions locales dans le sens de la viabilité économique, sociale et environnementale. La population mondiale s'accroît de manière continue, mais à un rythme plus faible que dans le cas A2 ; il y a des niveaux intermédiaires de développement économique, et l'évolution technologique est moins rapide et plus diverse que dans les cas B1 et A1. Le scénario est également orienté vers

la protection de l'environnement et l'équité sociale, mais il est axé sur des niveaux locaux et régionaux.

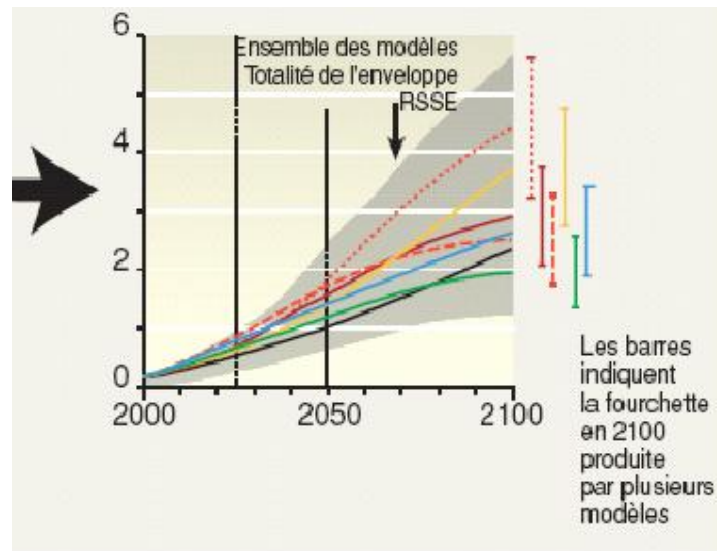
### 3.1.2 Mécanisme du changement climatique

De la même manière que Kerry Emanuel esquissait le mécanisme du changement climatique, dans un de ses articles «The dependance of hurricane intensity on climate » *Nature Vol.326, No.6112, pp.483-485, 2 April 1987 © Macmillian Journals Ltd., 1987* on peut prévoir donc l'impact des différents scénarios sur l'émission, puis la concentration de différents agents tels que le CO<sub>2</sub>, le CH<sub>4</sub>, le N<sub>2</sub>O et le S<sub>2</sub> suivi de celui sur l'évolution des températures comme l'explique ce schéma du rapport ipcc « changements climatique 2001 :Résumé à l'intention des décideurs » disponible à l'adresse internet <http://www.ipcc.ch/pub/un/syrfrench/spm.pdf>





## Variation des températures (°C)



Le constat est cinglant : on ne peut pas échapper au réchauffement climatique et ses conséquences. Dans le pire des cas on pense que le climat se réchauffera d'environ 4,5° Celsius tandis que dans le meilleur on aurait à faire à un réchauffement d'au moins 2° degrés sur l'ensemble du globe.

### 3.2. Simulation numérique

#### 3.2.1 Résultats obtenus

Nous avons voulu, en utilisant la procédure de Kerry Emanuel, évaluer par l'évolution de 2 critères importants, connaître la puissance d'un cyclone. La vitesse maximale des vents dans le cyclone et la pression minimale dans l'oeil du cyclone. Nous l'avons fait à partir de données obtenues par un modèle, utilisé par le laboratoire de météorologie dynamique de Jussieu, parmi les 4 scénarios précédemment cités.

La procédure de Kerry Emanuel prend comme entrées:

- la température de la mer à la surface (SST sea surface temperature)
- la pression à la surface (PSL pression surface level)
- P tableau des couches de pression de la surface de la mer jusqu'à la troposphère (en mb)
- T tableau des couches de température de la surface de la mer jusqu'à la troposphère (en°C)
- R tableau des coefficients de mélange pourcentage de vapeur d'eau dans un volume d'air de la surface de la mer jusqu'à la troposphère en (g/kg)
- NA nombre de couche, dans notre simulation NA=19.

Après exécution de la procédure, on récupère deux données significatives de la puissance d'un cyclone [qui venait à se former ou à passer par là] qui sont :

- la pression minimale au cœur du cyclone
- la vitesse maximale des vents

Ainsi à partir des données météorologiques fournies par Laurent Li, nous avons pu regarder l'évolution de ces critères par rapport à la variation des deux entrées. Cette visualisation est intéressante dans la mesure, où on pourra se faire une idée de l'augmentation de l'activité cyclonique au vue des scénarios possibles pour l'avenir comme l'avait indiqué Serge Planton lors de sa présentation à l'école nationale des Ponts et Chaussées dans le cadre du module « Atelier changement climatique ».

On va regarder avec la plus grande attention les cas de l'Atlantique, du golfe du Bengale et de l'océan Pacifique dans l'état actuel et dans l'avenir.

A partir des données recueillies qui sont celles prévues par le modèle du scénario A2.

Les résultats de la simulation (par la procédure de Kerry Emanuel) donne :

	Atlantique		Golfe du Bengale		Pacifique	
	Vitesse des vents (m/s)	Pmin (mb)	Vitesse des vents (m/s)	Pmin (mb)	Vitesse des vents (m/s)	Pmin (mb)
2000	74,55	923,56	73,28	907,5	81,13	884,6
2100	78,65	912,33	77,24	895,9	81,54	881,9

**Constat : Les cyclones seront plus puissants en 2100, en effet les vents maximums seront plus fort et les pressions au centre plus faibles.**

Dans les graphes suivants, on peut visualiser les résultats obtenus suivant les données recueillies On a voulu placer les résultats obtenus dans une vision d'ensemble où l'on ne fait varier que la température, et nous avons remarqué que, le modèle prévoit, qu'à température égale on peut observer une plus basse vitesse des vents du cyclone et une plus grande valeur de la pression au cœur du cyclone. Ce qui signifie exactement qu'un tel cyclone sera moins puissant que maintenant.

#### **Commentaire:**

Il faut néanmoins noter que la température de l'océan ne peut être modifier que si beaucoup d'autres paramètres sont modifiés (profil température atmosphère et taux d'humidité). Cependant localement lors d'événements climatiques sporadiques on peut supposer une augmentation de la SST tout en ayant les autres paramètres conservés. C'est pour cette raison que nous avons calculé ces graphes.

Les vents d'altitudes n'apparaissent pas explicitement dans les données mais on peut supposer que leur influence est contenue dans le profil de température.

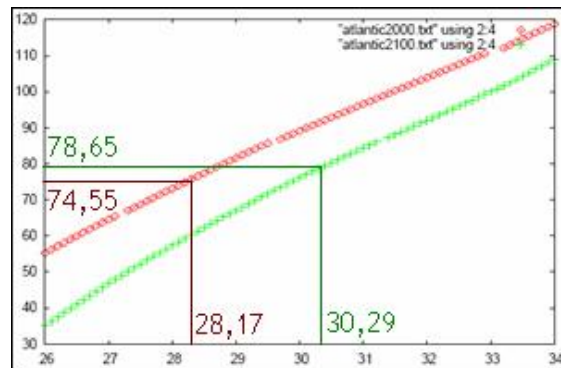
Résultats obtenus (1):

en abscisse la SST en °C

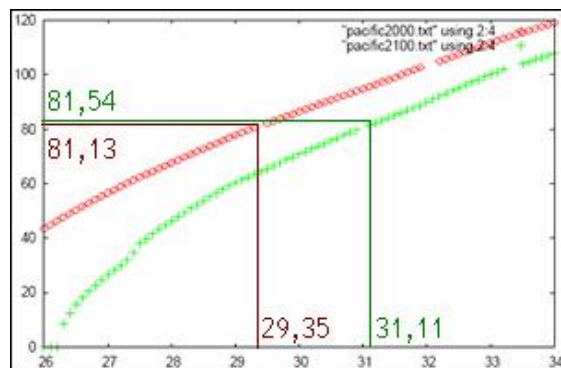
en ordonnée la vitesse maximale des vents internes en m/s

### Evolution de la vitesse maximale du vent en fonction de la SST

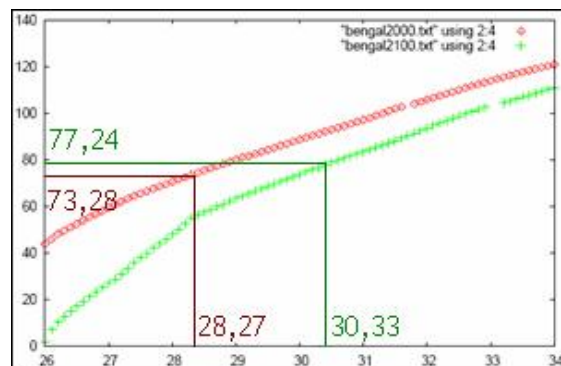
#### Atlantique2000 & Atlantique2100



#### Pacifique2000 & Pacifique2100



#### Bengale2000 & bengale2100



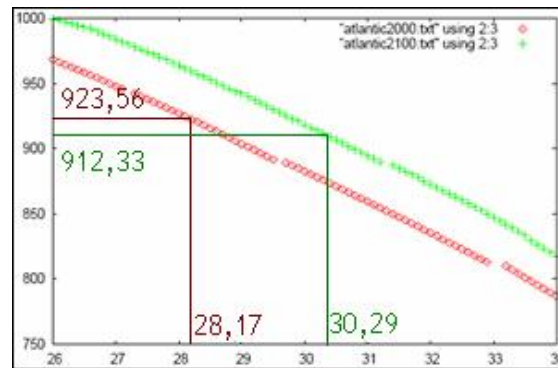
Résultats obtenus (2):

en abscisse la SST en °C

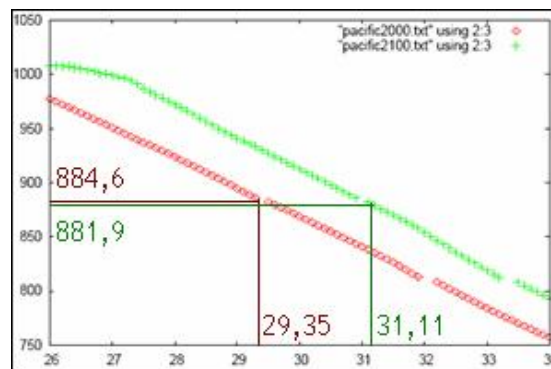
en ordonnée la pression minimale dans l'œil du cyclone (mb)

Evolution de la pression minimale au cœur du cyclone en fonction de la SST

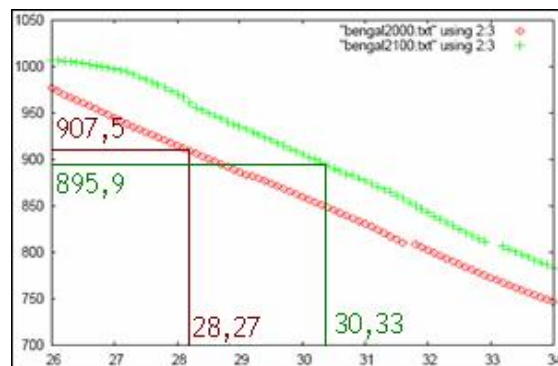
Atlantique2000 & Atlantique2100



Pacifique2000 & Pacifique2100



Bengale2000 & bengale2100



### 3.2.2. Vision globale du phénomène (Scénarios 2000 et 2100)

#### 3.2.2.1 Evolution des paramètres de contrôle des cyclones.

Dans l'étude précédente, nous avons étudié 3 points équi-répartis sur le globe ainsi, afin de la compléter, Laurent Li nous a fourni grâce au matériel informatique disponible au laboratoire de météorologie dynamique plusieurs « mapmonde » sur lesquelles on visualisera les lignes de niveau de pressions minimales et les lignes de niveau de vitesses des vents en 2000 et 2100 ainsi que leurs variations.

La situation 2000 est la situation actuelle.

La situation 2100 est la situation dans laquelle, selon le scénario A2, nous nous retrouverons dans un siècle.

On peut remarquer au niveau du golfe du Bengale par rapport à l'océan Atlantique :

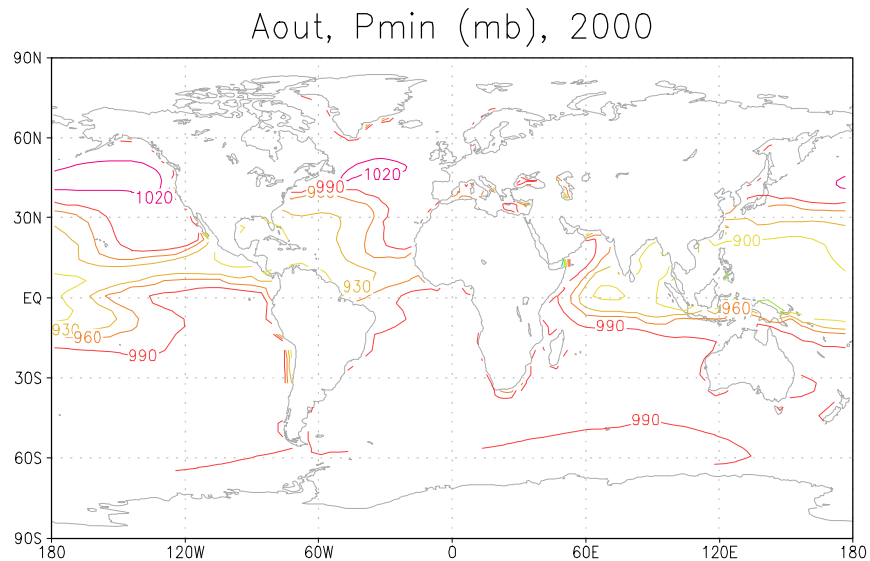
- la température à la surface de la mer est légèrement supérieure,
- de même la pression au sol est inférieure.

Ces deux points pourraient pencher en faveur d'un état plus propice à l'intensification des cyclones dans le Golfe du Bengale par rapport à l'océan Atlantique. Pourtant d'après la simulation numérique, les vents seront plus violents dans l'océan Atlantique. Ceci vient du fait que d'autres paramètres entrent en ligne de compte notamment les paramètres propres au climat de la région que l'on considère.

En effet, il n'y a aucune raison que la répartition des températures, de la pression et du taux d'humidité soient égales dans les 19 couches de l'atmosphère (de la surface de la mer à la troposphère), et ce en tout point du globe terrestre. Ainsi même si à priori l'algorithme de Kerry Emanuel peut se présenter comme un code prenant en entrée deux paramètres ( la température de la mer et la pression au sol), et donne en sortie la vitesse maximale des vents, et la pression minimale au centre du cyclone, ce code prend en compte un certain nombre de données caractéristiques de la région et du climat étudiés.

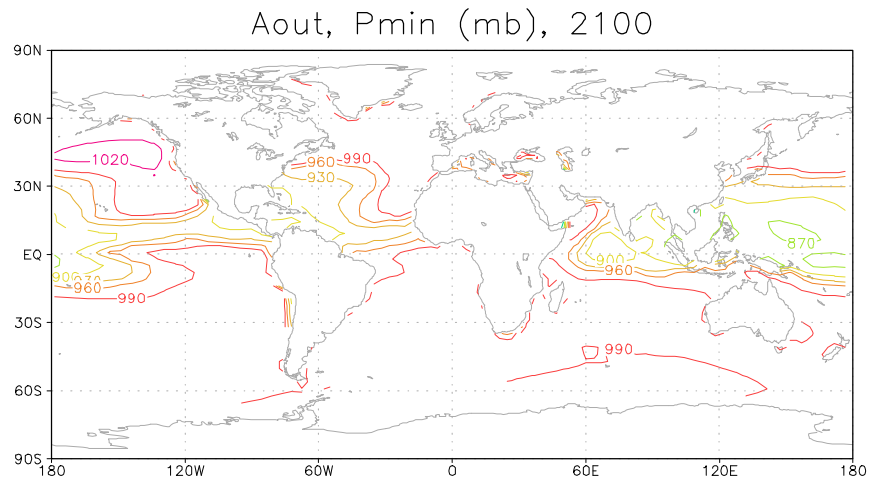
### 3.2.2.2 Evolution de la pression minimale au cœur du cyclone

Figure – Pression minimale (en mb) en août 2000



Les valeurs sont comprises entre 900 et 1020 mb. Elles sont minimales dans le Pacifique Sud, le Pacifique Nord-Est, océan Indien Sud Est, et l'atlantique Ouest. Ce sont dans ces régions que les cyclones générés sont les plus violents.

Figure – Pression minimale (en mb) en août 2100

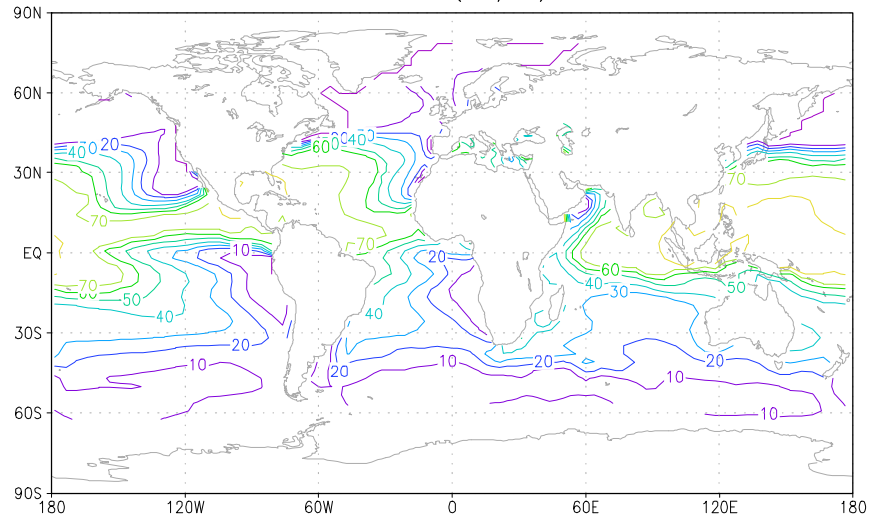


En ce qui concerne le scénario 2100, les valeurs prises par la pression minimale sont comprises entre 870 et 1020 mb.

### 3.2.2.3 Evolution de la vitesse maximale des vents cycloniques

Figure – Vitesse maximale des vents (en mb) en août 2000

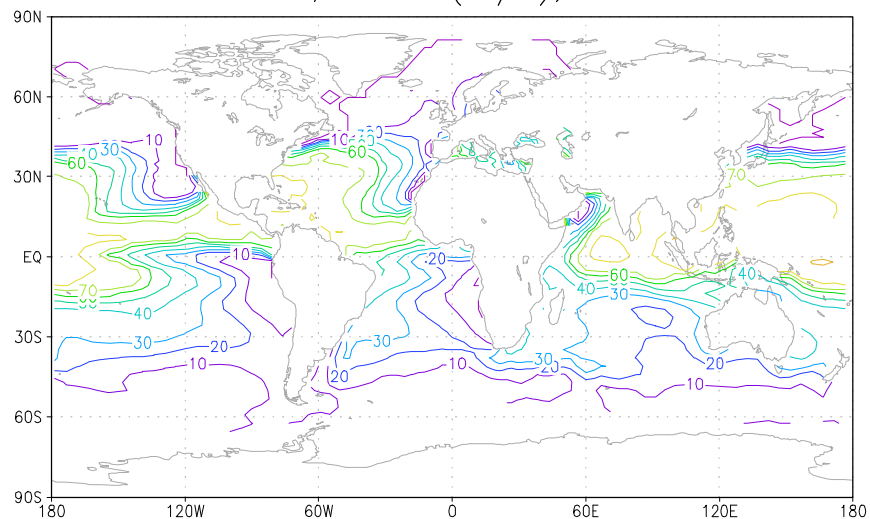
Aout, Vmax (m/s), 2000



En complément des « mapmondes » d'iso-courbes de la pression minimale au cœur des cyclones; dans les zones géographiques où on a une augmentation de la vitesse des vents, on a justement remarqué aussi bien en 2000 qu'en 2100, une diminution de la pression minimale au cœur des cyclones.

Figure – Vitesse maximale des vents (en mb) en août 2100

Aout, Vmax (m/s), 2100



### 3.2.2.4. Visualisation globale des différentiels de pression au centre des cyclones et de vitesse des vents cycloniques

Figure – Variation pression minimale (en mb) entre août 2100 et août 2000

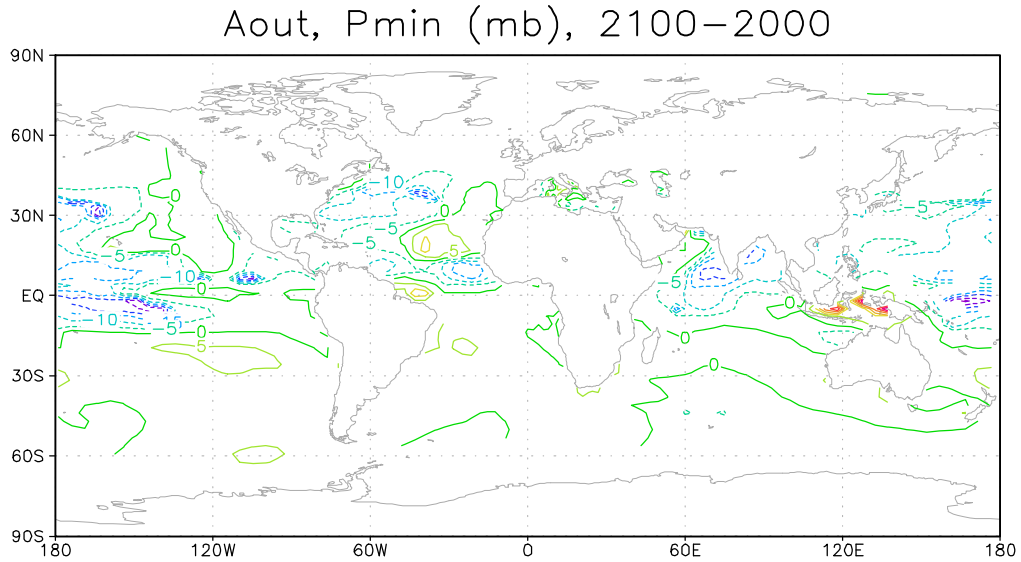
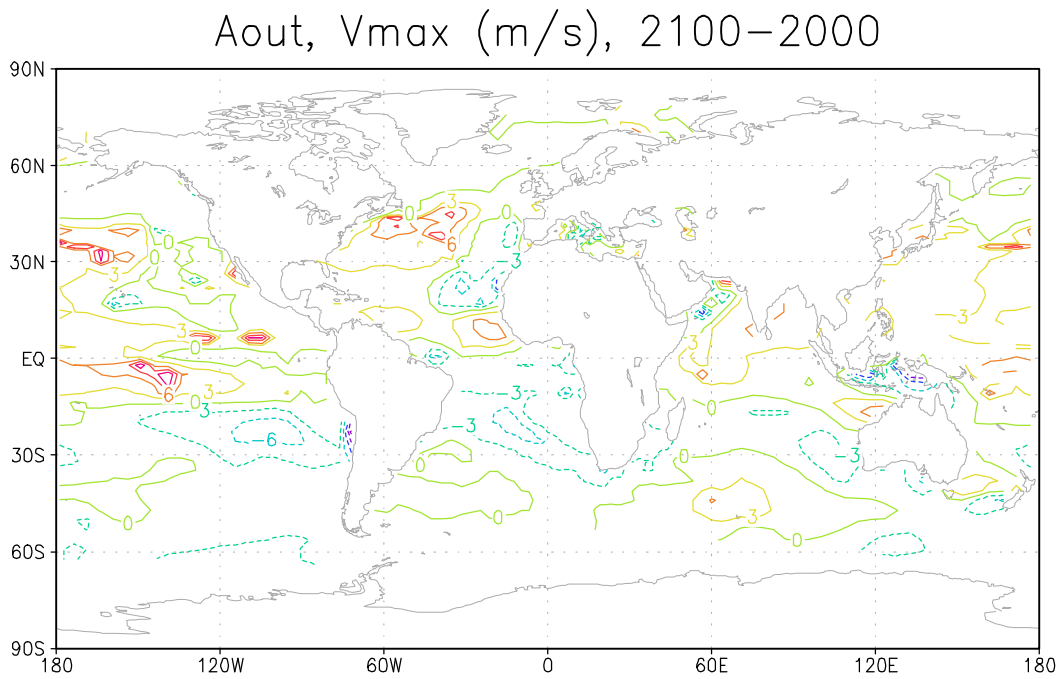


Figure – Variation vitesse maximale (en m/s) entre août 2100 et août 2000





## 4. Conclusions et ouverture

Nous avons réalisé une étude des cyclones et compris leur lien évident avec le changement climatique. En effet la variation des paramètres desquels ces phénomènes météorologiques dépendent fait varier leur comportement. Autrement dit nous avons pu par la lecture d'articles scientifiques, ainsi que par l'approche du modèle physique et enfin par la modélisation, analyser l'évolution des cyclones dans le temps.

La lecture d'articles nous a permis dans une première phase de nous plonger dans le sujet du point de vue scientifique et rigoureux. La recherche des étapes et de la modélisation du phénomène physique nous a permis d'aborder les cyclones et de comprendre leur fonctionnement réel.

Enfin nous avons trouvé fort intéressante la partie d'atelier qui comprenait la modélisation. Nous avons dû pour cette étape surmonter un certain nombre de difficultés dont apprendre à maîtriser le logiciel FORTRAN, chercher des données pour modéliser, chercher des scénarios même pour la modélisation. Nous avons aussi eu à adapter la routine de base de Kerry Emmanuel avec une subroutine que nous avons fait nous-mêmes (voir annexes).

La principale conclusion que nous pouvons en tirer c'est qu'il va se produire une intensification de l'activité cyclonique dans l'avenir avec le réchauffement de la planète. En revanche les études ne nous indiquent point pour le moment qu'il puisse y avoir un lien entre le changement climatique et la fréquence des phénomènes étudiés. Cela nous semble intéressant à souligner car il est commun de croire que l'intensification s'accompagne d'une augmentation de la fréquence alors que cela n'a, pour l'instant, point été prouvé par les chercheurs.

Le changement climatique est un sujet traité par l'IPCC (Intergovernmental Panel for Climate Change) ou GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat). Ce groupe a été fondé en 1988 par les Nations Unies et l'Organisation Météorologique Mondiale, et cherche tous les 6 ou 7 ans d'émettre un rapport volumineux révisé par plus de 2000 chercheurs et chaque représentant des gouvernements sur les aspects du changement climatique. Nous avons eu accès à ces rapports et cela nous a paru particulièrement intéressant pour notre thématique car il aborde l'évolution de sujets tels que la température, les émissions de gaz à effets de serre etc. dont nous nous sommes servis.

De plus il est intéressant de voir de qui est composé l'IPCC. C'est un groupe qui a pour mandat d'évaluer, sans parti pris et de façon méthodique, claire et objective, les meilleures informations d'ordre scientifique, technique et socio-économique au sujet de l'évolution du climat dont on peut disposer à l'échelle du globe. Les évaluations sont fondées dans les publications dont la valeur scientifique est largement reconnue, mais tiennent aussi compte -lorsque la documentation le permet- des stratégies industrielles et des pratiques traditionnelles. Elles mettent à contribution des centaines de spécialistes de toutes les régions du monde.

Il nous a paru intéressant de finir sur l'approche de l'IPCC car celui-ci qui comprend des membres de tous les gouvernements, dont aussi un des Etats-Unis. Or ceux-ci n'ont pas ratifié le protocole de Kyoto visant à la limitation des émissions des gaz à effets de serre et donc à un meilleur contrôle du changement climatique. De plus l'opinion publique américaine est de plus en plus sensibilisée aux problématiques des cyclones et du changement climatique avec des phénomènes qui les atteignent directement tels que le Katrina. Alors nous nous demandons que va-t-il se passer à Seattle en 2007 lors de l'édition du prochain rapport de l'IPCC sur l'inévitable lien entre réchauffement climatique et activité humaine ? Ces événements récents et l'opinion publique américaine vont-ils servir de levier pour que les Etats-Unis ratifient le protocole de Kyoto ?

## 5. Sources

- Articles de Kerry Emmanuel:
  - *Maximum intensity estimation*, 1997
  - *The dependence of hurricane intensity on climate*, 1987
  - *Physical basis of limit calculations*, 1996
  - *Anthropogenic Effects on Tropical Cyclone Activity*, revised September 2005
  - *Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years*, 2005
- A. Kerr Richard, *Is Katrina a Harbinger of Still More powerful Hurricanes?*; Science Vol.309, 16 September 2005
- P. J. Webster, G. J. Holland, J. A. Curry, H.-R. Chang, *Changes in Tropical Cyclone Number, Duration, and Intensity in a Warming Environment*, Science Vol.309, 16 September 2005
- Trenberth Kevin, *Uncertainty in Hurricane and Global Warming*; Science Vol.308, 17 June 2005
- Rapports IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change):
  - « *Changements climatiques 2001: Rapport de synthèse Résumé à l'intention des décideurs* »
  - « *Bilan 2001 des changements climatiques : Les éléments scientifiques* »
  - <http://www.ipcc.ch>
  - <http://www.meteofrance.fr>
  - <http://www.greenfacts.org>
- Marchal Manuel, *Amortir le choc des cyclones*, journal *Témoignages*, 30 août 2005
- Sandi Doughton, *The truth about global warming*, 11 October 2005, *The Seattle Times*