



**HAL**  
open science

## Milieux stables, Milieux instables

Hervé Regnauld

► **To cite this version:**

Hervé Regnauld. Milieux stables, Milieux instables. DEA. Université de Rennes 2, master Géographie et Aménagement, 2008. cel-00331862v1

**HAL Id: cel-00331862**

**<https://cel.hal.science/cel-00331862v1>**

Submitted on 18 Oct 2008 (v1), last revised 24 Oct 2008 (v2)

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Département de Géographie et Aménagement,

Master *Géographie, Aménagement, Société Environnement*  
**GASE**

# "Milieux stables, milieux instables"

## Master 1



*Phalcobuenus australis*, régulateur d'abondance chez les Albatros, Iles Falkland.

Hervé Regnauld, 2008-2009

[\*herve.regnauld@uhb.fr\*](mailto:herve.regnauld@uhb.fr)

**Université de Rennes 2, Place du Recteur H.Le Moal, 35043 Rennes Cedex**

## ***Cours 2008-09 "Milieux stables, milieux instables"***

### ***Avant-propos***

Ce cours est "en construction", pour la cinquième année consécutive (Master 1 habilité en 2004) . Il est destiné à deux publics : les étudiants de Master 1 spécialités « T.A.S.E » (télé-détection), « E.S.O. » (géo sociale) et "Gestion de l'Environnement".

- *Pour les étudiants de Master TASE et ESO*, il fait partie d'un ensemble (une UE) qui est partagée en 18h de géographie physique et 18 heures de géographie humaine et dont l'évaluation se fait par

- 1) un écrit tiré au sort entre les deux cours
- 2) un dossier préparé par l'étudiant, selon son choix, sur un des thèmes abordé par l'un des cours.

Un TP terrain de quatre/cinq jours a lieu au second semestre pour mettre en pratique les savoirs acquis lors du cours. Il a souvent lieu sur l'île d'Ouessant.

Ces modalités d'examen obligent les étudiants à travailler les deux aspects de la discipline (physique et humaine), ce qui est indispensable à leur culture générale et constitue une excellente préparation aux concours de Capes et d'Agreg. Elles permettent aussi aux étudiants de valoriser, par le dossier, leur domaine de prédilection, ce qui est utile à leur démarche de futur chercheur.

- *Pour les étudiants du Master "Gestion de l'Environnement"* l'examen est un écrit obligatoire.

La première version de ce cours (fait en 2004-2005) a été évaluée par les étudiants (positivement). Cependant deux types de critiques sont apparus. Les premières portent sur le fait que ce cours est difficile pour des étudiants qui n'ont pas un bon back ground en géographie physique. Les secondes signalent que la bibliographie est également difficile pour qui ne maîtrise pas un minimum l'anglais scientifique. Ces deux critiques sont exactes. Si des étudiants arrivant en Master de Géographie depuis d'autres disciplines ont des difficultés de mise à niveau, ils peuvent, d'abord lire les cours de licence de géo disponibles sur le disque K:/ Regnaud, puis, dans un second temps me demander par mail un complément d'information. Au début de la séance suivante je ferai un rappel sur le sujet que l'on m'aura demandé d'expliquer. Pour ce qui concerne la biblio je n'ai qu'une réponse : travaillez votre anglais.

Ce cours a été modifiée et augmenté pour 2005-2006. Sous ce nouvel aspect, qui ne le rend pas moins difficile, mais qui tente de le rendre plus clair, il a de nouveau été évalué en janvier 2006. Le résultat est de nouveau positif. Les étudiants ne font plus de reproche au sujet de la biblio en anglais. Cela tient au fait que leur dossier biblio les convainc de l'importance des articles écrits en anglais. Ils continuent cependant à trouver le cours difficile, car « trop différent du niveau de L3 ». Je réponds qu'en M1 c'est normal ! Toutefois dans la version 2007 j'ai introduit deux nouveaux chapitres plus « faciles » que les précédents, plus concrets, et l'un d'entre eux se prête à une forme d'exercice de lecture de paysage. Cette nouvelle version a été évaluée positivement en janvier 2007, légèrement modifiée pour l'année suivante et de nouveau évaluée positivement en février 2008. Elle a reconduite en 2008/2009.

## **Séance 1 : Intro et biblio. Equilibre et stabilité.**

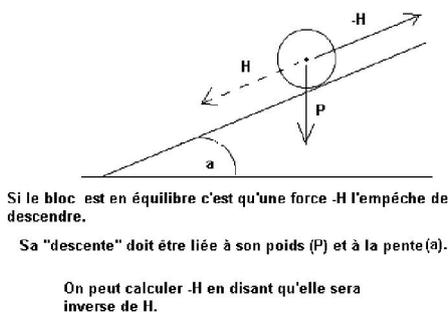
***L'enjeu de cette séance d'introduction est d'aborder la notion de stabilité comme un équilibre, c'est à dire une égalité***

**Définition (provisoire) de la notion d'équilibre** comme une égalité entre deux forces (groupes de forces) rendant le mouvement impossible.

Supposons un bloc en "équilibre" sur une pente. S'il est immobile c'est que deux forces s'annihilent, l'une liée à son poids (et à la pente) qui tend à le faire descendre, l'autre qui le retient.

Expérimentalement on peut attacher le bloc à un ressort, faire varier l'inclinaison du plan et mesurer l'extension du ressort.

Sur une vraie pente le problème peut être posé comme ci dessous (Figure 1).



relation  
trigonométrique  
simple

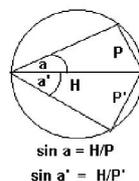


Figure 1 : équilibre théorique sur une pente.

Pour calculer la force -H il est facile de calculer la force de direction inverse et intensité égale, qui dérive d'une relation trigonométrique simple (elle varie comme  $\sin a$  et est fonction du poids P). Cette force est donc dépendante de la masse du bloc et de l'angle de la pente.

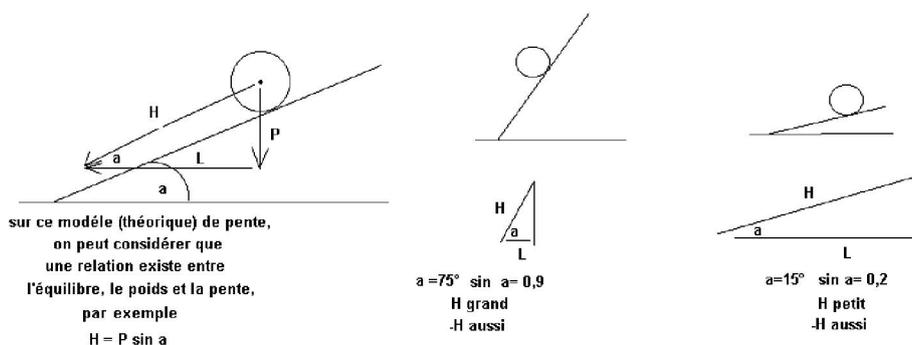


Figure 2 : Quelques variations selon l'angle de la pente.

En faisant varier la pente (donc  $a$ ) on voit tout de suite que si la pente est forte, -H doit être grand. Sur le dessin il est possible de se tromper. Ce qu'il faut mesurer c'est la grandeur de H par rapport à P et surtout à l'angle  $a$ , pas la longueur absolue de H.

En effet, sur le terrain H n'existe pas comme sur le dessin. Le modèle de stabilité a postulé que pour calculer la force ( c'est -H) qui empêche le bloc de tomber, on calculerait (parce que c'est plus simple du point de vue des angles) une force fictive, opposée en direction, mais égale en intensité. Sur la pente à 75° si une force qui retient le bloc existe, alors elle doit bien être grande (égale à 0,9 le poids du bloc). Cela veut dire qu'il faut "fortement" retenir le bloc pour qu'il ne tombe pas. Pourtant sur le dessin H "paraît " petit.

Sur une pente faible (*sin* a petit) il suffit d'une force plus faible pour retenir le bloc. La encore le dessin doit être bien compris.

Dans les deux cas on peut (intuitivement) comprendre que ce qui est dessiné (la "longueur " de H ), c'est non pas la force qui retient le galet de tomber mais la quantité de frottement que le sol délivre pour s'opposer à la chute. La force, elle, est dirigée dans l'autre sens (vers le haut de la pente) et son intensité peut être d'autant plus faible que le frottement est fort. Si le bloc pèse 10 kg, alors à 75° ("longueur" courte et "frottement" faible) la force -H doit être de 8kg, alors que pour 15° ("longueur" grande et "frottement" fort) il suffit qu'elle soit de 2kg.

Dans la pratique cette force est procurée par la relation entre la rugosité du sol et celle du bloc.

Il convient de tirer deux leçons de ce court exemple:

1) un modèle numérique d'équilibre n'est pas toujours intuitivement simple. Dans ce cas précis pour calculer la force qui nous intéresse , celle qui "empêche" le bloc de tomber, on calcule son opposée, qui, graphiquement est inverse de ce qu'on attend : longue pour une faible pente, courte sur une pente forte.

2) Cet exemple *est très simpliste*. Le début du cours de M1 tronc commun (la notion d'espace) en montrera les limites. Cependant, à ce stade, on peut retenir que la stabilité sur une pente est liée au *sin* de la pente. C'est une donnée exacte. Mais elle est largement insuffisante. En réalité la forme des blocs joue énormément. Sur une plage de galets, le haut de plage comporte généralement des galets plutôt plats et le bas des galets plutôt ronds. Ils peuvent avoir exactement le même poids. En théorie (si le modèle au dessus est exact) à poids et pente égale ils devraient avoir le même équilibre. Sauf qu'un galet plat a une grande surface de contact avec le substrat tandis qu'un galet rond n'a qu'une faible surface de contact. Les frottements vont être bien différents...En plus un galet plat peut "surfer" avec les vagues et le jet de rive, donc être propulsé haut sur l'estran, alors qu'un galet rond n'est pas si favorisé...(voir séances 10 et 11)

Sur le terrain la notion de stabilité est rarement aussi numériquement simple que dans les modèles.

On peut surtout critiquer la notion de stabilité en introduisant l'idée de durée. Cela revient à penser que les conditions de stabilité peuvent être perturbées et que, en conséquence du mouvement peut être imposé par une instance *supérieure* à celle qui crée les conditions d'équilibre. C'est la notion de hiérarchie scalaire. On va l'examiner avec deux cas.

1) Le bloc est stable, mais la tectonique s'en mêle et l'inclinaison, la pente du versant.. ( le gradient? régulier ou pas) sont modifiés et le *sin* change. C'est un cas fréquent de déstabilisation des pentes à cause de séisme, de volcanisme...

2) Une deuxième possibilité est que la pente du versant ne change pas mais que le bloc s'effrite (gélifraction, cryoclastie..) et le bloc n'a plus une forme (donc un centre de gravité) mais des fragments avec plusieurs formes donc plusieurs possibilités (ou non possibilités, vu la dispersion des fragments et des centres de gravité) d'équilibre. C'est souvent ce qui arrive dans les talus d'éboulis meubles comme les effondrements de falaises de head en Bretagne. Les morceaux effondrés ont rarement une forme constante dans le temps.



Figure 3 : Ce versant est situé en Islande. Il est souvent déstabilisé par de petits séismes, et l'action du gel est aussi importante. Ici on voit surtout des tracés d'avalanche et de ruissellement.

Ces deux exemples posent la question d'un déterminisme scalaire. Dans le premier cas la stabilité est mise en cause par un déterminisme d'échelle spatiale plus grande que le versant. Il s'agit d'une tectonique (très probablement) régionale. Dans le second cas, c'est une échelle spatiale plus "petite", plus "réduite" que celle du versant qui est en cause, c'est la cohésion interne de chaque bloc. Les relations entre la stabilité et l'échelle ne sont ni univoques, ni simples.

### Milieu (définition très provisoire) :

Selon le dictionnaire de Lévy et Lussault, (2003) ce serait l'ensemble des conditions qui agissent sur le comportement d'un objet (d'étude) et le forcent (forcing = déterminant) éventuellement à modifier son comportement . Rappeler ici (si besoin est, cela dépend du back ground disciplinaire des étudiants) l'idée de système et de rétroaction (positive/négative) dans le but de faire comprendre que la relation action /réaction n'est pas simple.

La carte ci dessous tente de poser le problème du "milieu" en termes spatiaux.

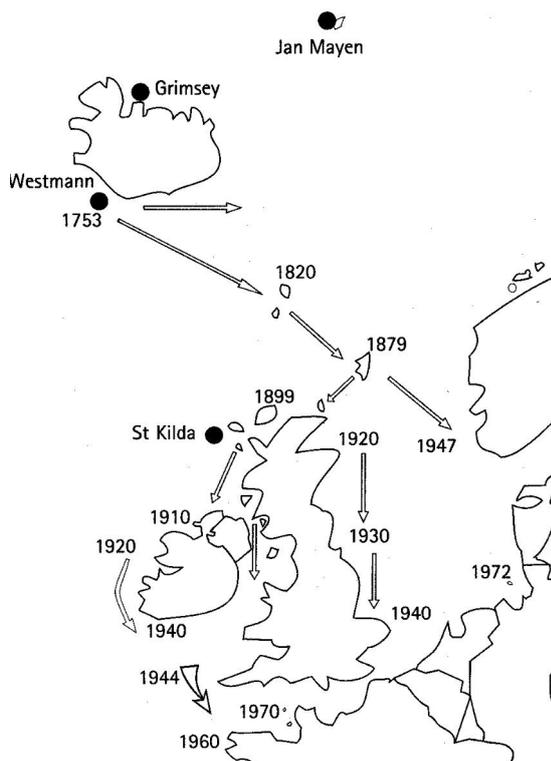


Figure 4 : Déplacements historiques des populations de pêtrel fulmar.

L'image ci dessus (Vansteewegen C., 1998 ) montre les modifications de la répartition du pétrel fulmar depuis le XVIII<sup>ème</sup> siècle. L'oiseau est il "instable"? Est-ce son "milieu" de prédilection qui se déplace vers le Sud? (ce serait au contraire du réchauffement climatique!!!). Le questionnement ne trouve pas de réponse simple!!!

**Discuter :** et si des randonneurs marchent sur l'éboulis étudié dans la partie précédente ??? (et ne pas répondre de façon définitive sur les proportions éventuelles d'anthropique et de physique en matière d'environnement)

**Poser des problèmes** ( à ce stade du travail, ce sont des problèmes provisoires.. que l'on sera peut être amené à reformuler..) :

en Géographie Physique : milieu (probablement) a un sens, stabilité n'a pas (probablement) de sens.

(en a parte) , en Géographie Humaine : quelle notion de durée est référentielle pour définir des équilibres/stabilités? Quel sens social a le mot "stabilité" ? Que signifierait milieu?

Y a t il une approche géographique qui intégrerait ces aspects (milieu, stabilité... évolution, changement..) un peu (semble t il?) contradictoires??

### **Un plan possible pour aborder cette problématique pourrait être le suivant**

1)La stabilité est un équilibre, qui connaît, dans le temps différentes évolutions. Notion d'équilibre statique puis d'équilibre mobile dans le temps. Notion de système, avec remobilisation de connaissances acquises en licence. (**séances 1, 2 et 3, page 8**)

2) La stabilité et l'instabilité ont des relations qui sont complexes. On peut les appréhender à différentes échelles (nous sommes géographes!) . On examine donc les modèles de stabilité qui sont invariants avec l'échelle (régularité, dont les fractales sont un exemple) et ceux qui sont hyper dépendants de l'échelle (chaos avec la notion, très scalairement dépendante, de conditions initiales). Il y a des changements en fonction de l'intensité des forçages (externes au système) et de la résilience (interne) des systèmes (**séances 4 et 5, page 15**). Ces deux séances sont - intentionnellement- très théoriques.

3) La réalité concrète qui fait l'objet des interrogations scientifiques des géographes (dans mon cas ce sont des milieux physiques) ne répond pas toujours complètement bien à ce que la théorie voudrait. Les cours suivant (dont l'un est un peu conçu comme un TD) abordent des exemples de comportements environnementaux de plus en plus complexes avec des exemples pris, presque toujours, sur le littoral. (**séances 6 et 7 p. 24, 8 p. 29, 9 p. 33, 10 p. 35, 11 p. 46, 11bis p. 54, et 12 p. 59**) d' Afrique du Sud, du Portugal, de Nouvelle Zélande, de Crète, des Falkland. Chaque exemple repose sur une situation concrète dont certaines (en littoral) ont fait l'objet de questionnements importants en terme d'aménagement. ***Il s'agit donc de cas concrets qui posent des problèmes scientifiques, dont aucun n'est résolu avec des compétences standard ou des recettes banales. Il n'y a de solution à des problèmes nouveaux qu'avec des connaissances nouvelles.***

C'est cette recherche constante de solutions nouvelles qui fait l'intérêt du métier d'aménageur ou de géographe - chercheur.

**Bon Travail.**

Bibliographie :

Dodd et al, 2003 : Understanding Coastal Morphodynamics Using Stability Methods. *J. Coast. Res.*, 19, 4 : 849-865.

Jomelli V, Pech P., 2004 : Effects of the little ice age on avalanche boulder tongues in the french Alps. (Massif des Ecrins). *Earth Surface Processes and Landforms*, 29 : 553-564.

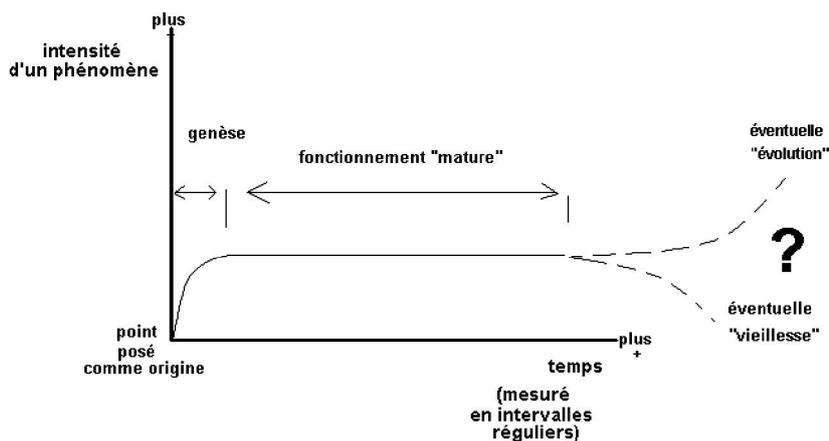
Lévy J. et Lussault M. (dir.), 2003 : *Dictionnaire de la géographie et de l'espace des sociétés*. Belin, 1-1034.

Vansteenkoven C., 1998 : *L'Histoire des oiseaux*. Delachaux et Niestlé, 1-336.

## Séances 2 et 3 : Equilibre mobile.

*La séance est essentiellement consacrée à la façon dont l'équilibre (défini comme égalité, cf séance précédente) se conserve, ou pas, dans le temps.* Elle est essentiellement fondée sur la communication de A. Cooper au colloque de Oct 2004 (PICG 495), qui faisait la synthèse de près de 20 ans de ses travaux sur les embouchures de fleuves en milieu méso tidal.

### 1) Equilibre statique



### Notion d'équilibre par non variation

l'égalité est conservée dans la durée

Figure 5 : Equilibre et durée, présentation simple.

Ce croquis (figure 5) appelle plusieurs commentaires, donnés ci après sans ordre vraiment réfléchi.

Si on pense qu'un phénomène "commence" et "finit" alors la notion de stabilité élimine les périodes de croissance et de décrépitude. Dans une pensée systémique, il n'y aurait (peut être) de stabilité qu'en dehors des périodes de systèmogenèse et de systèmolyse ???

Quel est l'indicateur (dans un objet géographique) qui est juste pour indiquer (mesurer) une stabilité?

Que va devenir cet "équilibre" quand le système vieillit? Il faut donc s'interroger sur la notion de durée...

### 2) Equilibre avec tendance, sur le plus ou moins long terme

Il arrive qu'un phénomène (un objet étudié) soit le résultat de plusieurs processus. Une population est (en quantité) dépendante du rapport entre naissances et décès. En règle générale beaucoup d'objets étudiés par les géographes peuvent s'expliquer (en partie) par des flux (entrée et sortie) donc s'analyser en terme de bilan. Si on a un flux d'entrée qui est de 10% (par rapport à la quantité présente au temps T) et un flux de sortie de 8% , à chaque itération il y a un bénéfice net de 2%. La population croit. En un sens l'effectif (le nombre d'individus) n'est pas stable du tout. En revanche la relation

entrée sortie est stable (0,8). Il y a donc stabilité et changement, ce qui montre que ces deux termes ne sont aucunement contraires.

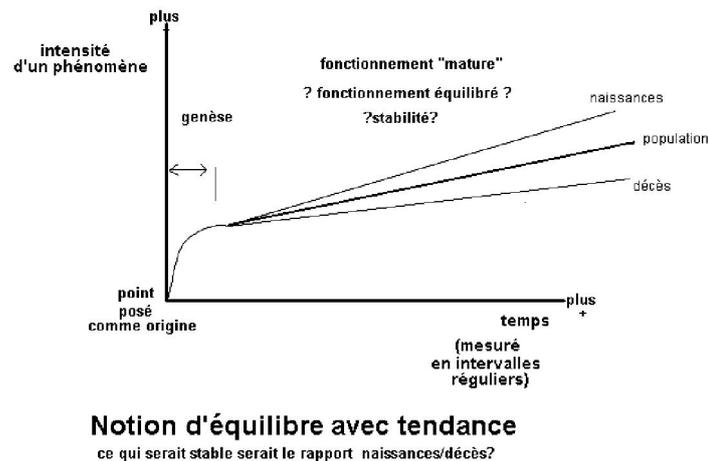


Figure 6 : Equilibre et tendance évolutive

Habituellement on considère qu'une tendance est statistiquement significative si elle est observée durant trente ans d'affilée (norme climatologique).

**2-1** Equilibre avec tendance (et inversion momentanée de tendance.. mais subsistance d'une tendance malgré tout)

Imaginons une population de petits oiseaux insectivores, à la durée de vie courte et à la démographie galopante (par exemple des troglodytes). Ils vivent deux (?) trois ans et peuvent pondre (par couple) de quatre à six oeufs. Chaque individu pèse aux alentours de 6 à 12 grammes. C'est un des 5 oiseaux les plus nombreux en France.

Ils pondent vers Mars. Si, fin Mars, début Avril survient un gel très fort, les petits meurent et les adultes font une ponte de remplacement. Celle ci compense plus ou moins les décès et la population garde (à peu près) les mêmes effectifs. La photo, prise le 31 Mai 2004, montre une ponte de remplacement dans une haie près de Rennes avec quatre oeufs dont deux éclos.



Figure 7 : Nid de troglodytes (Prairies Saint Martin, Rennes)

Si fin Septembre un gel précoce et intense survient ce sont les adultes ou sub adultes qui meurent. Il y a moins de reproducteurs pour l'année suivante et la population va (probablement) décroître.

Si l'on ajoute à cela que les insectes (dont les troglodytes se nourrissent) sont eux mêmes dépendants de la température, il est facile de comprendre que les effectifs vont être fluctuants en relation avec les "moyennes" météo.

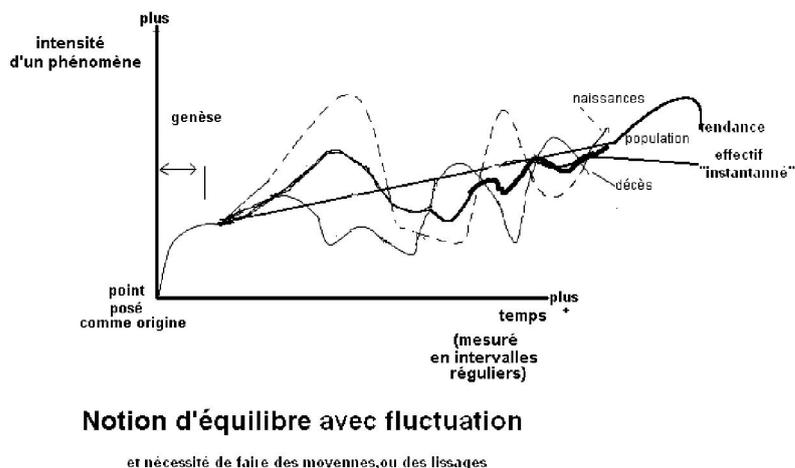


Figure 8 : Equilibre par fluctuations se compensant plus ou moins

Si l'on veut apprécier une éventuelle stabilité (des effectifs) il faudra faire une moyenne sur plusieurs années. Il faudra ensuite se demander si les effectifs de troglodytes sont représentatifs de l'ensemble du milieu ou pas. Cette dernière question est très délicate!!

**2-2) Equilibre plus ou moins cyclique ( i.e. plus ou moins sinusoidal ?)**

Ce type d'équilibre est souvent expliqué par un retard (un délai) entre un phénomène et un autre. C'est souvent le cas entre disponibilité de nourriture et nombre de naissances. Ce schéma fonctionne très bien dans tous les cas où il y a fourniture d'une quantité de matière (flux d'entrée) et métabolisation, utilisation de ce flux pour fabriquer un flux de sortie.

En morphologie littorale il y a un exemple hyper classique : celui du niveau d'inondation des marais maritimes. Il va être décrit (rapidement ci après). L'accumulation a lieu un peu après les V.E. pendant le début du déchet.

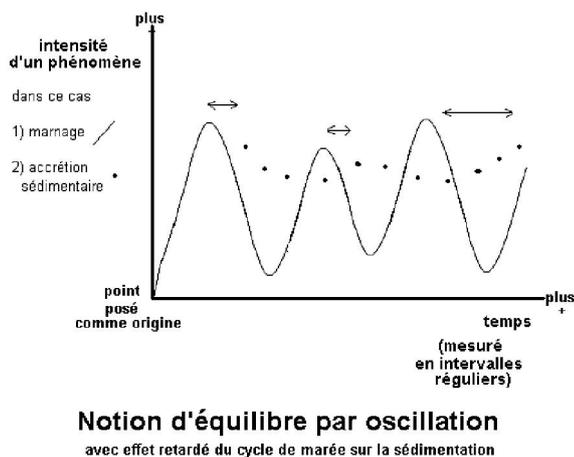


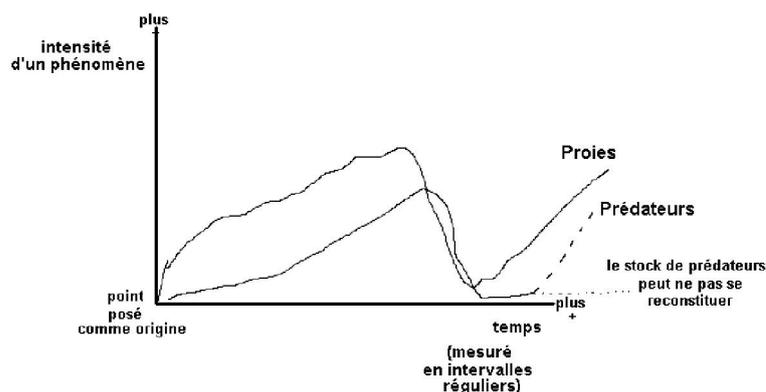
Figure 9 : Equilibre avec oscillations décalées par un temps de réponse.

Dans un marais maritime une part importante du sédiment est apportée par les courants de marée. On pourrait donc s'attendre à ce que lorsque les courants sont les plus forts (en vives eaux) il y ait des taux d'accumulation sédimentaire plus élevés. En fait, en vives eaux les courants forts apportent beaucoup de matière mais ils en enlèvent aussi, essentiellement parce qu'ils atteignent des parties des étiers qu'ils ignorent habituellement et qu'ils déstabilisent leurs berges (ou évacuent du matériel effondré des berges pendant la période précédente de revif). En bilan apport/enlèvement, le solde n'est pas grandement positif. Le moment où il y a le plus d'accumulation est juste après la vive eau (au début de la période de déchet). Certes les courants sont moins forts et apportent (théoriquement) moins de matériel mais ils n'érodent plus (tout ce qui est érodable a déjà été enlevé). En bilan apport/enlèvement le solde est largement positif à ce moment. Sur le croquis ci dessus, le pic de la courbe en pointillé est toujours après le pic de la courbe en continu.

Bien sur ce modèle ne fonctionne qu'en l'absence d'autres perturbations, comme des houles plus ou moins fortes, des pluies importantes....etc.... Il ignore le rôle, pourtant essentiel, de la végétation et/ou du pâturage... Il est donc très théorique, mais pas faux pour autant.

### 2-3) Equilibre avec rupture et reconstitution

C'est un cas assez fréquent dans les populations animales. Des prédateurs, qui dépendent de peu de proies (diète peu variée) croissent tant que le nombre de proies croit. Cela peut durer plusieurs années. Mais au fur et à mesure que le nombre de prédateurs augmente, la compétition entre prédateur pour les proies augmente aussi. Les jeunes (prédateurs) doivent souvent chercher des territoires ailleurs. La situation est tendue. Il suffit d'une mauvaise année pour la démographie des proies et tout le système s'écroule. Souvent la (presque) totalité des prédateurs s'exile. Les proies peuvent alors reconstituer leurs stocks et redevenir abondantes. C'est alors qu'un prédateur (par exemple un jeune chassé d'un territoire voisin) s'installe et que le cycle de croissance peut recommencer.



Notion d'équilibre par rupture et reconstitution

*Figure 10 : Sur ce croquis il faut comprendre que la re-croissance des prédateurs peut venir à partir d'individus migrants depuis une colonie étrangère, parce que la population locale peut avoir totalement disparu.*

Dans certains cas le cycle ne recommence pas. Au large du Canada, dans l'Atlantique du Nord Ouest la pêche a tellement exterminé les morues que leurs stocks ne se reconstituent plus. Aubaine extraordinaire, un des aliments préférés des morues étaient les larves de homard! Aujourd'hui, faute d'être mangés jeunes par les morues, les homards sont devenus plus abondants et génèrent des profits importants.

Dans tous les exemples précédents il est facile de voir que, quelque soit la configuration du détail du système, il est toujours possible, sur le long terme, d'interpréter les fluctuations, changements... en termes de variabilité et il est toujours possible de construire une courbe (lissée ou moyenne) de tendance. Il suffit de prolonger le temps d'un ordre de grandeur...

### **3) Equilibre avec événements, plusieurs types de non retour à l'état initial**

La question qui se pose dans les exemples suivants est de savoir ce qu'il advient quand une situation d'équilibre (telle que décrite auparavant) est perturbée par un changement extrêmement intense. Y a-t-il (ou pas) capacité à revenir au système initial? Chaque exemple est pris dans le domaine de la paléo-ethnologie.

#### **3-1) Equilibre initial, changement radical et nouvel équilibre non durable**

Ce cas est classique en ethnologie. Dans de nombreux pays les animaux avaient une activité de migration sur de vastes distances (les bisons aux USA) et les hommes, par des progrès techniques ont mis en cause la liberté de circulation sur ces étendues. Avant que les blancs n'arrivent les Indiens (qui ignoraient le cheval) ne pouvaient chasser que les bisons éclopés ou malades et ne prélevaient que peu de bêtes. On estime qu'il y avait un seul immense troupeau qui migrait entre le Texas et le Canada et qui comprenait plusieurs hardes de 4 à 5 millions de têtes chacune!! Les estimations varient entre 15 et 30 millions de têtes. A partir de l'arrivée des chevaux, vers 1680 (?) pour les tribus du sud des actuels USA, les Comanches, les Osages (c'est bien avant que les blancs ne soient physiquement en train de coloniser la prairie) ont pu chasser les bisons, en tuer de très grandes quantités. Les armes à feu sont également arrivées.

Il en a résulté qu'il devenait plus facile de vivre en tuant les bisons qu'en cultivant la terre et plusieurs tribus ont abandonné l'agriculture et la sédentarité pour devenir nomades. Elles ont inventé une nouvelle civilisation, celle des Indiens des Plaines (comme dans Danse avec les Loups) avec des tipis, des cérémonies, une très forte division du travail entre hommes et femmes, une forte valorisation de l'indépendance du guerrier, des périodes de chasse et des périodes de vie en communauté en alternance et... l'obligation de se procurer par le troc les produits agricoles que l'on ne cultivait plus. Une autre obligation était de dépendre des blancs pour les armes, la poudre et les balles.

Les Cheyennes auraient accompli cette rupture vers 1770-1780, les Sioux vers 1760, les Comanches vers 1745-50. Cela représente quelques 10 à 30 000 Indiens en tout, ce qui est extrêmement peu. Les populations de bisons ont cependant commencé à décliner fortement. Il faut 8 à 10 bisons pour faire un seul tipi, et il faut refaire le tipi tous les deux-trois ans. On estime qu'il fallait que les Indiens tuent près de 100 000 bisons par an rien que pour leurs tentes, et près de 50 000 pour leurs vêtements en peau. Dès les années 1830, avant que les blancs aient mis en place une chasse industrielle, le stock de bison était en très mauvais état et Catlin le signale déjà (vers 1832-35) en disant que cela entraînera la fin des Indiens. Avec les armes à feu à plusieurs coups cela a été encore plus vite (vers 1840 ?), et la chasse industrielle mise en place par les blancs dans les années 1850-1860 a fini par réduire le troupeau à peu de hardes isolées et décimées.

Dès lors que la principale ressource en nourriture était fortement diminuée, les Indiens des plaines n'ont pas pu s'opposer longtemps à la colonisation blanche, et malgré une victoire militaire en 1876 (Little Big Horn) ils ont subi beaucoup de massacres et ont tous fini par "accepter" la vie en réserve.

Aujourd'hui, avec des efforts de "conservation" on a reconstitué entièrement l'écosystème bison / prairie sauf qu'au lieu des quelques 15-20-30 (?) millions de bisons initiaux, il y en a maintenant de 10 à 12 mille. Il n'y a pas possibilité de retour à l'état initial (avant l'arrivée des chevaux).

#### **3-2) Equilibre avec égalité nouvelle (phénomène de substitution)**

Il s'agit encore d'un grand classique en ethnologie. Venus de Tahiti, ou d'une île où l'on parlait une langue très semblable au tahitien, les Maoris sont arrivés en Nouvelle Zélande vers (environ) 800

(après J.C) et ont débarqué sur deux îles dont les animaux n'avaient jamais vu d'hommes. Le plus grand animal local était un oiseau proche de l'autruche le Moa, qui pouvait peser 300kg et ne volait pas. Les Maoris l'ont chassé et exterminé en quelques siècles. Les Moas étaient éteints vers 1200. En Nouvelle Zélande il n'y a pas de mammifère terrestre indigène sinon la chauve souris. Les Maoris avaient apporté le chien et le rat, tous deux destinés à l'alimentation. Ils pouvaient aussi pêcher, ou, au Sud, chasser le phoque. L'essentiel de leur alimentation venait des plantes cultivées dans leurs jardins. Les protéines animales étaient rares.

Assez rapidement les Maoris sont devenus cannibales. Du point de vue des blancs c'est complètement inacceptable. Du point de vue des polynésiens (tahitiens en particulier) qui accompagnaient les blancs, c'était aussi totalement inacceptable. Du point de vue Maori, c'est un usage alimentaire parfaitement normal, et régi par de très strictes règles. On ne mange que les ennemis males pris au combat, on adopte leurs femmes et leurs enfants et on renforce ainsi sa propre tribu.

Des études de paleo ethnologie ont permis d'établir que le régime alimentaire à base de Moa avait été - avantageusement- remplacé par celui qui incluait le cannibalisme (rituel, pas quotidien). Il y a substitution positive. Il y a aussi organisation sociale qui permet plus de stabilité puisque le cannibalisme a pour objet de résoudre les conflits par assimilation de la tribu vaincue et construction d'un nouveau territoire, à terme plus peuplé (parce qu'en paix), plus grand (par conquête) et moins conflictuel.

Cet exemple ne vise absolument pas à faire l'éloge du cannibalisme. Il vise à montrer que la notion de stabilité n'a rien à voir avec celle de valeur de civilisation, même quand elle s'applique à un système social.

#### **4) Pas d'équilibre perceptible à une échelle de temps T+Tn**

4-1) Mais perceptible à l'échelle T+ (Tn+1) .. retour au début

Il s'agit d'une question d'échelle de temps. Il suffit, pour comprendre un phénomène apparemment désordonné, de prolonger les observations sur 2, 3 4 ou n fois plus longtemps et on s'aperçoit qu'il y a des régularités. (C'est le cas du climat sur 100 10<sup>3</sup> ans)

4-2) A aucune échelle de temps documentée, voir 5

5) Mise en cause de la notion d'équilibre, en ce qu'il n'y pas d'échelle de temps "pertinente" pour l'apprécier. (ce cas est le plus fréquent en géomorphologie littorale.. faute de données quantifiées sur de longues durées. Les climatologues ont des données plus fiables sur des temps plus longs et peuvent aventurer des conclusions moins hasardeuses - ou plus sérieuses- avec des données plus vérifiables.)

Le débat épistémologique est de comprendre si

-la notion d'équilibre est fondamentale, et s'il faut, en conséquence, que la science rassemble ses données dans l'optique de les rentrer dans des modèles de type process-response ou entrées-sorties ou tout modèle lié à une idée de bilan ou de changement.

-la notion d'équilibre est inopportune et la question devient alors de comprendre un comportement sans qu'un bilan ne détermine ni le déficit ou l'abondance, donc le plus ou le moins, donc... par extension (abusive à coup sur) le bien et le mal.

Nous verrons cela dans la séance suivante.

#### **Conclusion (locale, circonstancielle et partielle) :**

En géographie la *composante* aménagement exige (et c'est à mon avis à juste titre) qu'à des questions socialement légitimes... les "scientifiques" apportent de réponses socialement efficaces.

A cause de cela, les modèles de types entrée - sorties sont (me semble-t-il) les plus efficaces.

Malgré cela ils sont mal capables d'éviter les jugements de valeurs (dont vous savez combien ils peuvent être dépendants des circonstances) .

[Quelle entrée est positive, quelle entrée est négative? Planter des forêts entraîne-t-il une diminution (par piégeage) du CO2 émit par des industries?].

Mais les modèles de type "comportemental" (ceux qui, nous verrons cela dans les cours suivants) éliminent le jugement de bilan ou de valeur, ils ont pour immense qualité d'être plus exacts et pour immense défaut d'être de relativement mauvais prédicteurs.

Rien n'est simple sous le soleil.

Bibliographie :

de Planhol X, 2004 : *Le paysage animal*, Fayard, 1-1127

Belich J., 1996 : *Making people, a history of the New Zealanders*. Penguin, 1-497.

Catlin G. (édition 1989) : *North american Indians*, Penguin 1-522.

Jablow J., (édition 1994) : *The Cheyenne in plains indian trade relations*, 1795-1840. University of Nebraska Press, 1-100.

Salmond A., 1991 : *Two Worlds, first meetings between Maoris and Europeans*, 1642-1772. Viking, 1-477.

Starkey A., 1998 : *European and native american warfare*, 1675-1815. University College Press, London, 1-208.

## **Séance 4 et 5 : Equilibre mobile et régularité non linéaire (une approche basique de la notion de fractalité, qui est parfois juste sur le terrain)**

*L'enjeu de ce cours (en deux séances) est d'exposer deux types de comportements face à la notion de stabilité. Un comportement fractal est stable à toutes les échelles (en théorie). Un comportement chaotique est instable, à toutes les échelles aussi.* Le cours commence par un exemple très concret, dont la compréhension fait appel à des notions expliquées par la suite.

*La forme pyramidale que les grands continents affectent à leurs extrémités se reproduit fréquemment sur une moindre échelle, non seulement dans l'Océan Indien (péninsules Arabique et Indienne, presqu'île de Malacca) mais encore dans la Méditerranée, où déjà Erathostène et Polybe avaient comparé sous ce rapport les péninsules Ibériques, Italiques et Hellénique. L'Europe elle-même, dont la surface est cinq fois moindre que celle de l'Asie, peut être considérée comme la péninsule occidentale de la masse presque entièrement compacte du continent asiatique. Cela est si vrai que, sous le rapport du climat, l'Europe est pour l'Asie ce que la presqu'île de Bretagne est au reste de la France. (Humboldt 1845)*

### **1) Un exemple : la non stabilité d'une plage et son évolution dans le temps.**

Une plage change constamment de forme. Que ce soit en plan ou en profil, d'une marée à l'autre, d'un train de houles à l'autre, d'une saison à l'autre, elle connaît des modifications. Pour une plage réflexive en milieu macrotidal, ces changements peuvent concerner la pente du profil et la faire varier de 10 %. Les microformes sur la plage (croissants, bermes, sillons, baïnes...) peuvent aussi changer de place, cesser d'être présentes, changer de volume... Parfois des tempêtes apportent du sédiment supplémentaire et créent des nappes étendues de matériel nouveau, les cônes de tempête. Les tempêtes peuvent aussi enlever du matériel et laisser la trace de cette érosion, sous forme de micro-falaises. Une observation attentive des changements de forme dans le temps et des conditions dynamiques ne permet de conclure à aucune relation statistique simple entre tempête et érosion, calme et accumulation, obliquité des houles et croissants, amplitude des houles et pente. En combinant ces processus entre eux, en introduisant le marnage (et sa variation), en ajoutant le vent (et ses variations), on ne trouve pas davantage de relation claire. Sherman et Bauer (1992) ont théorisé cette impossibilité en parlant de variabilité intrinsèque à la plage.

A l'échelle des années cependant, il arrive que l'on puisse établir des régularités dans le comportement des plages. On peut par exemple observer une plage située dans la presqu'île de Rhuys (Morbihan) qui est ouverte sur la Baie de la Vilaine et donc relativement abritée des houles atlantiques (par la chaussée de la Teignouse et les îles de Houat et Hoedic). Cette plage, située à proximité du château de Suscinio, engraisse assez régulièrement et les mesures faites durant la dernière décennie font état d'un apport régulier de sédiment qui, à la longue, exhausse le fond dans la zone intertidale, permet le transit du sable sur des dunes qui engraisent et l'accumulation de sable dans les marais situés derrière la dune. Il y a donc une évolution qui montre une nette tendance à l'engraissement, explicable par un bilan sédimentaire positif.

La question est de savoir pourquoi une variabilité finit par donner une variation. L'hypothèse de travail est qu'un comportement chaotique à une échelle de temps petite peut "se résoudre" en comportement linéaire à une échelle de temps plus grande. C'est exactement l'inverse d'une *catastrophe*.

## Une approche de la forme par des flux de sédiment

L'idée qui est à la base ce travail part du constat que si on ne peut lier simplement temps (les dynamiques successives) et forme (les réponses morphologiques à ces dynamiques), c'est qu'une approche linéaire et continue du temps n'est pas, ici, pertinente. On travaillera donc sur une population de situations et non pas sur une succession.

On définit la situation comme l'état de la plage à un temps  $T'$ , à condition qu'on connaisse le temps précédent,  $T$ . La notion de situation fait donc référence non pas à un pur présent mais à ce que le présent entretient, comme relation de trace morphologique, avec le passé immédiat (notion d'effet mémoire). Pour simplifier, on réduira cet état à une quantité de sédiment présent en un point et mesurée en 2D. Il s'agit, matériellement, de l'altitude ( $h$ ) d'un point donné sur le profil. D'un moment  $T$  à un moment  $T'$ , on peut mesurer le changement d'altitude du point (donc un changement de quantité de sédiment, c'est-à-dire un mouvement, qui peut être positif ou négatif), puis rapporter ce changement à une durée, donc calculer sa vitesse  $v'$  qui est, pour simplifier, une quantité d'énergie. On a  $v' = h' - h / t' - t$ . On peut ensuite faire un diagramme en nuage de points qui relie les mouvements et les vitesses. Il suffit d'indiquer en  $x$  les quantités  $h'$  et en  $y$  les vitesses  $v'$ . Chaque situation est donc définie par deux coordonnées. Ce diagramme (quantité de mouvement / quantité d'énergie) est un diagramme des phases. La population des situations se répartit dans l'espace du diagramme autour d'une valeur moyenne. Chaque situation étant datée, on peut tenter de reconstituer, sur le diagramme, les étapes qui font que les situations se succèdent. Le résultat est édifiant (fig. 11).

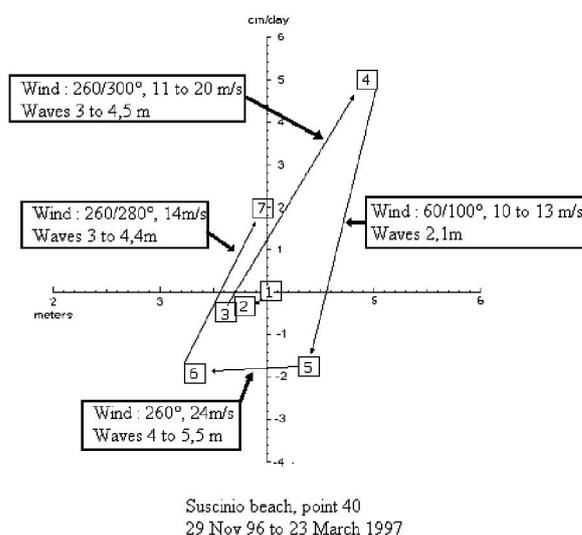


Figure 11 : Dynamique d'une plage, presqu'île de Rhuy. (Regnauld et Louboutin, 2002)

On constate que les situations ont, dans le temps une sorte de rotation autour d'un centre. Le comportement de la plage est une sorte d'oscillation autour de conditions moyennes (le point M). Nous appelons ce comportement une *temporalité rythmique*. Le mot rythme ne renvoie pas à la métrique régulière et répétée d'un morceau de Rock'n Roll, mais à la pulsation telle que Boulez (1995) l'étudie chez Stravinsky : « la pédale grave rythmique acquiert ses propres fluctuations périodiques ». Malheureusement, nos données ne sont pas assez nombreuses pour vérifier si ce type de comportement est chaotique et fractal. Selon toute apparence, mais sur des critères qualitatifs, cette oscillation se tient à l'intérieur d'un périmètre bien défini. On ne trouvera pas, sur cette plage, un point du profil qui associerait un mouvement de 3 mètres et une vitesse de 10 m/s. On ne trouvera pas davantage un point se déplaçant de 1 cm à une vitesse de 0,01 cm/jour... (on ne saurait d'ailleurs pas le mesurer, ce qui est une autre limite). Nous postulons donc qu'il existe un *attracteur étrange*, (ce terme sera aussi défini,

qualitativement, plus loin dans le texte), c'est à dire un périmètre, des bornes entre mouvement et énergie, qui définissent tous les mouvements possibles.

Nous n'avons pas les moyens de vérifier si les mouvements successifs d'un point équivalent aux mouvements simultanés de beaucoup de points (notion d'ergodicité). Intuitivement, nous pensons que c'est le cas en nous fondant sur la variété des comportements d'un profil à l'autre, au même moment. Le comportement est probablement chaotique.

Il est aussi très probablement multifractal. Si l'on prend des situations distantes d'une journée, puis des situations distantes de semaines, on obtient à peu près les mêmes configurations en rotation. Ce n'est évidemment pas la forme de la plage qui est fractale, mais son comportement dans le temps. On observe le même type d'oscillations sur une semaine que sur un mois, à un facteur d'amplitude (3 à 4) près. C'est probablement un peu lié au cycle de marée. Il n'est pas certain, en revanche, que l'amplitude des fluctuations observées sur une année soit 12 fois plus grande que sur un mois, ni 100 fois plus petite que sur un siècle. La fractalité n'est pas indifférente à l'échelle de temps, sa dimension change par segments, elle est donc multifractale. A l'échelle du siècle ou du millénaire en revanche, l'idée que ces comportements morphologiques soient fractals n'est pas à exclure. On peut démontrer (Regnauld et al., 2004) que la variabilité de l'apport d'énergie des houles à une plage durant un cycle de marée est équivalente à celle qui a eu lieu durant l'Holocène parce que, en domaine macrotidal, le marnage (dans ce cas 13 mètres, mais des valeurs de 5/6 mètres peuvent suffire au calcul) est équivalent à la remontée du niveau marin sur la période. L'équivalence de la variabilité d'apport d'énergie est établie à partir des grandeurs identiques des valeurs limites qui la bornent, mais la variabilité des comportements à l'intérieur de ces bornes n'est pas assez bien connue pour qu'on puisse calculer si elle est fractale.

Toujours selon une approche qualitative, le comportement de cette plage permet d'envisager comment le chaotique se lisse en fractal puis en linéaire. A l'échelle des jours, des processus élémentaires, le sable va et vient sur le profil de façon chaotique. A l'échelle des semaines ou des mois, le comportement en rotation peut être analysé. Si, par un artifice de calcul, on décide qu'une érosion est une vitesse négative et qu'une accumulation est une vitesse positive, alors on distingue que le point moyen, autour duquel la rotation se fait n'est pas, sur l'axe des y à zéro, mais au-dessus. La moyenne des vitesses étant positive, cela signifie qu'il y a un apport de sédiment. Si l'on disposait d'une très longue série (des valeurs quotidiennes sur 10 ans et plus), on verrait probablement que le point M n'est pas fixe. En y il reste positif, en x il doit certainement très légèrement croître. La figure 12 représente le comportement chaotique, fractal et, sur le long terme, linéaire dont nous pensons qu'il décrit le comportement de la plage.

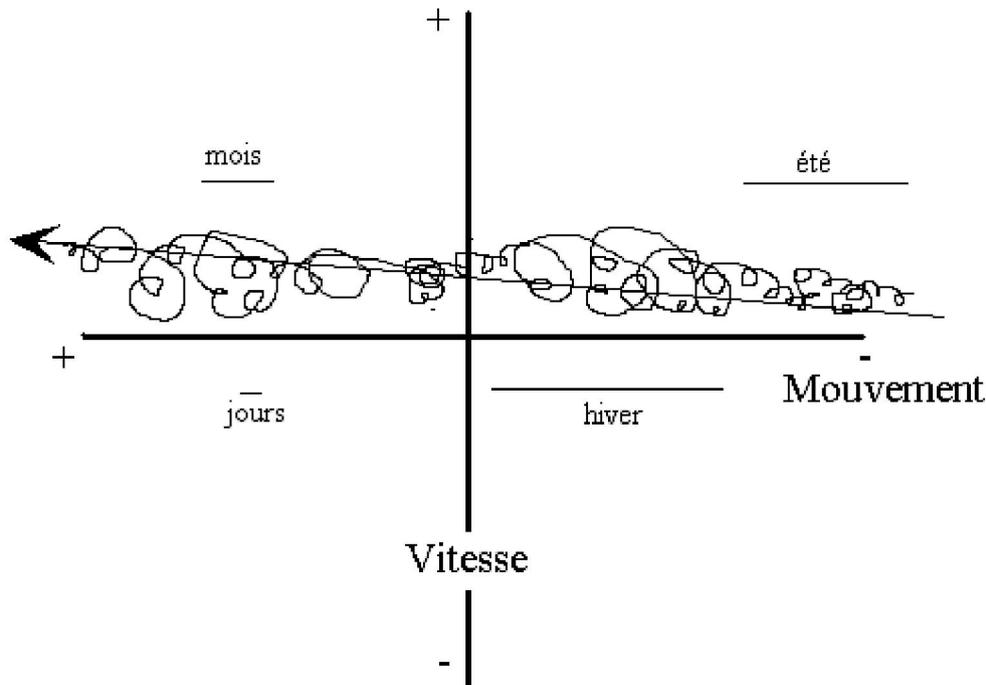


Figure 12 : (Baudelle et Regnauld, 2004) Diagramme décrivant qualitativement le comportement d'une plage, à partir de données quantitatives partielles. La longueur des segments correspond à la durée correspondante. A l'échelle des jours, le comportement est chaotique avec une variabilité bornée à une gamme réduite de vitesse et de mouvements. A l'échelle du mois, le comportement est toujours chaotique mais avec une amplitude plus grande. Le cycle vives eaux-mortes eaux joue un rôle. Entre jours et mois, il y a une fractalité de comportement. A l'échelle de l'année, on distingue les mois d'été (énergie et amplitude réduites) des mois d'hiver (énergie plus forte et amplitude plus grande). La flèche indique le mouvement du point M, qui traduit la tendance linéaire à l'engraissement. Il n'y a pas eu de très grosse tempête durant nos observations.

Le système décrit correspond donc à un flux de sédiment qui arrive à la plage, qui s'y dépose pour partie et qui, pour une autre partie ne fait qu'y passer et va engraisser la dune derrière. La combinaison de ce transit et de cette accumulation explique une part de la variabilité morphologique, comme d'autres facteurs, par exemple les cycles de marée. La plus grande partie de la variabilité est inexpliquée, mais ce manque n'empêche pas de comprendre la tendance à l'accumulation. D'un point de vue théorique, il y a, en un seul et unique lieu, succession de temporalités rythmées dont certaines s'expliquent pas des modèles anciens, d'autres par des modèles modernes, dont les présupposés méthodologiques sont contradictoires entre eux en particulier à cause des conceptions du temps qui est linéaire et irréversible dans un cas, rotatif et répétitif dans l'autre. Il est remarquable de constater que le fonctionnement de la plage est complètement indifférent à cette contradiction.

## 2) Les fractales : contraintes scalaires et variabilité formelle

L'idée de base qui organise les techniques de calcul fractal (Mandelbrot, 1967) est simple et dérive directement des travaux sur la relativité. La mesure d'une chose dépend de l'outil de mesure que l'on utilise. Le mathématicien B. Mandelbrot a eu l'intuition de transformer "outil" en "échelle".

### *Fractale et continuité : des temporalités classiques*

Les techniques de calcul fractal sont simples à comprendre. Imaginons un géant et un nain qui, liés par une aventure commune (tels un Ent et un Hobbit dans *Le Seigneur des Anneaux*), doivent longer exactement la berge d'une rivière à la recherche d'un objet précieux. Il leur faut en suivre toutes les

sinuosités du tracé parce que l'objet est très petit. Un mauvais magicien leur impose une contrainte : ils ne peuvent changer de direction qu'à chaque pas et ils doivent compter leurs pas et leurs changements de direction. Le géant (Ent) parcourra 10 mètres à chaque pas et pourra pas à pas suivre toutes les sinuosités sauf si elles sont d'une dimension inférieure à 10 m. Le Hobbit, dont la foulée est d'un mètre, pourra parcourir toutes les sinuosités dont la dimension est comprise entre 10 et 1 m. Si à la fin de la journée le Hobbit a fait 10 fois plus de pas et qu'il a changé 10 fois plus souvent de direction que le géant, la berge de la rivière est fractale. La figure 13 en donne une illustration imagée.

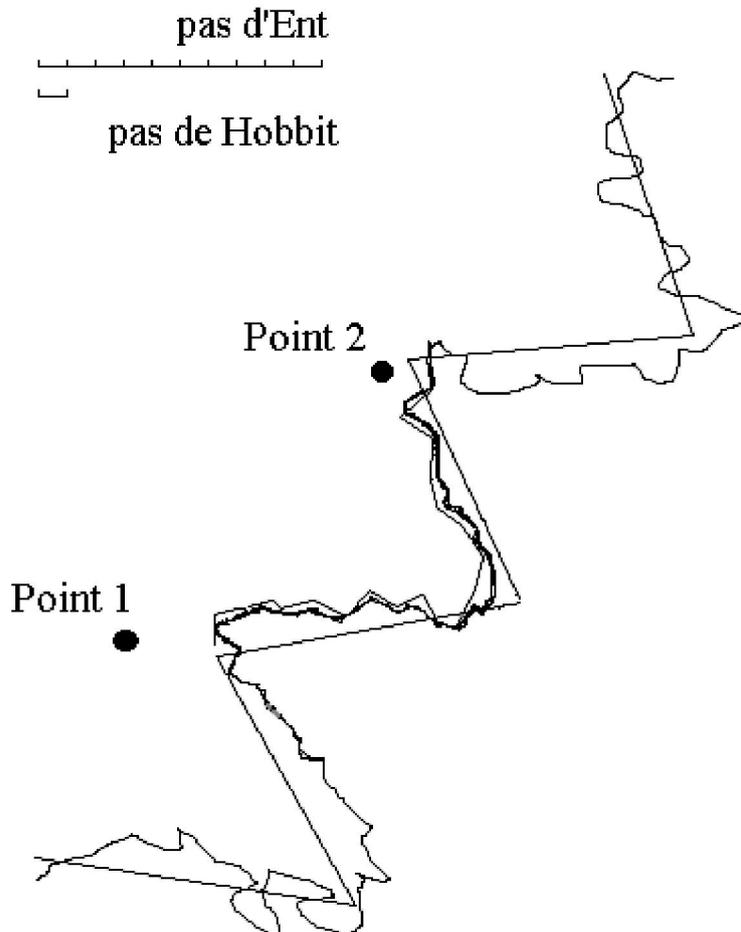


Figure 13 : Fractales et tracé (Baudelle et Regnauld, 2004). Entre le point 1 (inclus) et le point 2 (exclu) le tracé de la rivière est en gras. Pour le suivre, l'Ent fait deux pas et change 2 fois de direction (une fois à partir de 1 où il était arrivé selon une direction qu'il ne poursuit pas, une deuxième fois entre 1 et 2). Le Hobbit fait 20 pas et change 20 fois de direction. Cela permet de conclure que le cours de la rivière qu'ils suivent est fractal, à condition que le détail du calcul soit fait. Avant le point 1, la configuration des sinuosités fait que le Hobbit parcourrait, proportionnellement, plus de chemin que l'Ent, si bien que la berge de la rivière n'est probablement pas fractale.

On définit la *fractalité* comme une invariance d'échelle : un phénomène est le même si on le mesure en mètres ou en kilomètres. Le phénomène est indifférent à la définition spatiale de l'instrument ou au pas d'échantillonnage. On utilise plus souvent un compas (ou des boîtes) que la foulée d'un Hobbit, mais le principe reste le même. Humboldt (citation *supra*) le faisait à l'oeil nu à partir de l'examen des cartes. A partir de cette constatation géométrique, il "extrapolait" même à la dimension climatique ce rapport de similitude et d'échelle. Aujourd'hui, avec les outils dont nous disposons, par exemple un logiciel de traitement d'image, on mesure un tracé en le décomposant en petits segments connexes, puis on recommence avec des segments plus petits. La relation logarithmique entre le nombre de

segments d'une part (nombre de composantes connexes), la taille des segments (rapport d'*homothétie*) d'autre part, doit donner une droite dont la pente est la dimension fractale.

Cette approche a connu un vaste succès en géographie. Dès le début des années 1990, on a éprouvé le besoin de faire des articles de synthèse pour juger, avec du recul, de l'intérêt de telles analyses (Robert, Roy, 1993 ; Xu et al., 1993 ). Des synthèses plus récentes (en géographie physique) ne le remettent pas en cause (Trugdill, Roy, 2003). Ces travaux indiquent toutefois que les objets fractals sont assez peu fréquents si l'on exige que l'objet soit parfaitement fractal. Ils indiquent aussi qu'un objet parfaitement fractal est tout à fait dépourvu d'intérêt puisqu'une fois décrit par satellite, son examen au microscope n'apportera rien de nouveau. C'est un objet dont la croissance dans le temps est uniformément régulière à toutes les échelles.

En revanche, avec de nouvelles techniques et des nuances dans l'interprétation des résultats, les fractales ont nourri des réflexions qui concernent de très nombreux objets intéressants (Leduc et al., 1994).



cette plante est elle fractale?

### *Fractale, discontinuité géométrique et discontinuité temporelle*

Beaucoup d'objets sont fractals par intervalle. Entre l'échelle 1 et l'échelle 10, ils ont par exemple une dimension fractale  $D_1$ . Entre l'échelle 10 et l'échelle 25, la dimension passe à  $D_3$ . Entre les échelles 25 et 42, c'est  $D_2$ ... Un tel objet est multifractal et chaque échelle où la dimension change est significative d'une rupture, d'un seuil, d'une problématique possible. Entre certaines bornes, les réseaux de drainage sont multifractaux, et les systèmes d'érosion peuvent être corrélés à des pentes et des précipitations par des lois de puissance afin d'expliquer la forme de ces réseaux.

Un travail sur les dimensions fractales des volcans italiens démontre ainsi très simplement combien, dans cette perspective, ce qui compte, ce n'est pas du tout telle échelle d'analyse mais la variation de ses échelles. Les auteurs étudient la dimension fractale des courbes de niveau et déterminent des sous-ensembles topographiques (des portions distinctes de versant) qui ont chacun leur type particulier de multifractalité. Ce qui devient alors une problématique scientifique n'est pas (seulement) d'étudier le volcan à l'échelle du cône (et du risque de coulée immédiat et local) ou à celles de la province magmatique (et du risque séculaire d'explosion) ou du bloc tectonique (et du risque millénaire de cassure/séisme). Ce qui importe, c'est de repérer, sur le terrain, les lieux où le changement d'échelle (en l'occurrence par le truchement de la variation de la dimension fractale de la topographie 2D ou 3D) et ensuite de comprendre pourquoi, comment, il y aurait peut-être là une ligne de faiblesse, un lieu particulier.

Dans le premier cas (lier une problématique à une échelle et à risque), on utilise l'échelle comme discriminant premier. C'est l'échelle qui fixe la problématique, donc la compétence du spécialiste. Au morphologue, l'étude de la forme de la coulée, au pétrographe l'étude de la composition du magma, au tectonicien l'étude de la mobilité des croûtes. Dans le deuxième cas, il y a étude numérique du terrain, puis détermination de sites spécifiques, puis nécessité pour les différents spécialistes de travailler ensemble à résoudre une interrogation localement posée mais dont la signification déborde l'échelle locale. Ici l'échelle est un outil d'analyse, elle désigne un lieu, elle impose une multidisciplinarité et elle ne définit pas de problématique.

Du point de vue théorique, on a un exemple curieux de temporalité : le volcan a une temporalité dont le moins qu'on puisse dire est qu'elle est discontinue (éruption/dormance) et variable (intense/calme) et pour l'étudier on va rechercher des lieux qui ont une continuité spatiale (connexité) et une discontinuité dimensionnelle (changement de dimension fractale) ; on étudie bien un versant du volcan, mais précisément là où il change. C'est l'entre-deux des échelles.

Dans l'article en question, le changement morphologique ne renseigne malheureusement pas toujours sur la dynamique volcanique parce que les auteurs démontrent que celle-ci est parfois due à des processus érosifs liés au climat, et non au volcan. Le monde, même numérique, n'est donc pas toujours conciliant avec les chercheurs, de sorte que bien des concepts anciens conservent parfois une certaine efficacité.

### **3) Un nouveau déterminisme : le chaos**

Les idées qui fondent les théories du chaos ont été pour partie initiées par R. Thom (1974), qui a établi une *théorie des catastrophes*, et pour partie formulées par Feigenbaum (1978) qui a construit une *théorie de l'universalité*. Ce second travail part d'une posture presque philosophique : lorsqu'un système devient chaotique, des lois universelles doivent exister, que le système soit un tas de sable, l'évolution d'une espèce, des cotations en bourse ou autre chose...

Lorsqu'on observe un signal quelconque (la variation d'une quantité de lumière, le déplacement d'un objet...) et qu'on le représente sur un graphe avec le temps en abscisse, les tracés obtenus le plus souvent sont linéaires. C'est le cas de la réponse d'un grain de sable parfaitement rond à un vent parfaitement unidirectionnel dont seule la vitesse changerait. On peut trouver une fonction  $f$  pour décrire cela. Dans d'autres cas, on obtient des tracés dont les fluctuations principales restent linéaires (on les explique avec la relation  $f$  mais dont le détail comporte des irrégularités inexplicables, c'est-à-dire non descriptibles par  $f$ ). On appelle cela un bruit et on dit qu'il est "sur"  $f$ . C'est le cas de la réponse d'un grain non parfaitement circulaire soumis au même vent. Dans d'autres cas on obtient des tracés absolument pas linéaires. C'est le cas d'un vrai grain de sable (donc non régulier) soumis à un vrai vent (donc instable). Il n'y a que du bruit.

Une intuition fondamentale suggère que le bruit provient de la structure spatiale de la matière (elle fut formulée par Bak et al. en 1987). Un système étendu comporte des éléments et ces éléments comportent des degrés de liberté différents. Leur combinaison ne peut que devenir de plus en plus complexe. Ce qui est en jeu n'est pas la simple "dimension" du système : il n'est pas plus complexe parce qu'il est plus grand. Ce qui importe, c'est la notion de système fait d'éléments indépendants, répartis dans l'espace. Chaque élément possède  $x$  (de 1 à  $n$ ) possibilités d'agir et  $y$  (de 1 à  $m$ ) voisins. S'il agit avec l'action  $x_{n1}$  sur le voisin  $y_{m1}$ , il se passe quelque chose. C'est déterministe, donc

prédictible. Un ensemble d'actions sur un ensemble de voisins peut fonctionner en système et engendrer un objet spatial que des géographes étudient. Ce système d'actions peut être analysé comme une combinaison de déterminismes. Rien n'oblige cependant à ce que les actions observées soient les seules possibles, ni qu'elles s'appliquent aux seuls voisins concernés... Quel qu'il soit, le système n'est jamais que le résultat circonstancié d'un "choix" parmi un ensemble immense de choix possibles. En général, quand le nombre d'actions est petit, le comportement du système est prévisible et linéaire. Quand le nombre d'actions est grand, il se passe une "bifurcation", une "catastrophe", une "avalanche" et le système devient *chaotique*, c'est-à-dire non prédictible sans pour autant être désordonné ou aléatoire.

Cette approche intuitive du chaos (qui est inexacte dans le détail, mais assez juste pour servir d'image) peut être précisée avec de très nombreux exemples. Le plus célèbre est celui du tas de sable. Soit un tas conique sur lequel on ajoute par le sommet des grains un à un. Au début le tas croît en hauteur et en périmètre. A partir d'une certaine taille (ou d'un certain nombre de grains, si on a la patience de les compter), lorsqu'on ajoute un grain, celui-ci, au lieu de rester là où il tombe, se déplace et s'installe ailleurs. Il peut provoquer un petit effondrement. A ce stade l'impact de chaque grain peut provoquer des événements mais ce qui survient entre deux grains en un endroit du tas n'a pas de conséquence sur le comportement de deux autres grains en un autre endroit. Il y a dissociation spatiale des comportements. A partir d'une quantité plus grande de grains, tout change. Chaque grain en plus provoque un effondrement le long de la pente. En moyenne, il s'évacue du tas par effondrement au bas de la pente une quantité équivalente à ce qu'on ajoute en haut. Les comportements spatiaux sont alors, en un sens, connectés, liés, ils impliquent ce que P. Bak appelle une communication au sein du tas. Le tas est devenu un système alors qu'avant il n'était qu'une juxtaposition de grains. Ce système a un comportement qui n'est jamais au repos, jamais en équilibre, toujours troublé par des effondrements, mais ce système a une pérennité et sa forme d'ensemble (hauteur, pente moyenne, circonférence) est remarquablement constante. Il ne croît ni ne décroît, quelle que soit la durée pendant laquelle on ajoute du sable... Cet état est qualifié d' *état critique auto-organisé*

### *Chaos et géographie physique*

En géographie, ce type d'état est fondamental : il fait que le passage du temps ne change pas grand chose parce que le système a une résilience extrêmement forte. Cette résilience est dépendante d'une forme très peu changeante (elle conserve ses dimensions moyennes) mais jamais exactement identique à elle-même (il y a toujours un grain qui arrive et un qui part, celui qui arrive n'occupe pas forcément la place de celui qui part...). La résilience est donc liée à un "espace d'accueil" qui permet le mouvement des grains. L'échelle nécessaire à cette résilience est donc bien précise, il s'agit d'un déterminisme. On parle de *chaos déterministe*. Cette échelle est celle qui permet à une quantité de mouvement et à une quantité de matière de lier un flux (donc une vitesse, donc un temps) et une forme (donc des dimensions, donc un espace). Il y a d'abord une dynamique, ensuite son actualisation dans une forme et après, et seulement en terme de conséquence, une durée et des dimensions. A l'échelle du phénomène, espace et temps sont seconds par rapport au mouvement.

La théorie du chaos est pourtant loin d'être intuitive. Chacun pense à partir de son vécu plutôt qu'à partir de théories mathématiques. Nous pensons spontanément qu'il y a d'abord du temps et de l'espace, qu'avec les deux on mesure des vitesses, et qu'ensuite on mesure des flux. La physique relativiste avait déjà profondément mis cela en cause en faisant du temps et de l'espace une sorte de continuum énergétique. Peu de géographes avaient pensé que cette révolution scientifique, qui inféode les *a priori* (temps et espace) à la primauté de la structure de la matière, aurait des conséquences sur la géographie. Celle-ci n'étudie pas des particules relativistes, mais des systèmes spatiaux d'échelles bien différentes.

Les travaux de P. Bak ou M. Feigenbaum, à partir de cette posture philosophique de recherche d'universalisme, démontrent que le chaos n'est pas dépendant d'une échelle et ne se limite pas aux particules. Les états critiques auto-organisés sont très probablement les meilleurs outils d'étude de très nombreux phénomènes spatiaux complexes en géographie physique.

Les scientifiques actuels doivent de plus en plus souvent réfléchir à partir de tels fondements. Mais la mise en œuvre mathématique, au contraire des fractales, n'est pas toujours simple. D. Turcotte (1992)

en donne des exemples variés. En théorie, il faut un très grand nombre d'événements. Il faut ensuite démontrer que  $x$  événements se produisant en même temps donneraient statistiquement le même résultat qu'un seul événement se répétant  $x$  fois (c'est le principe d'*ergodicité* qui définit une équivalence méthodologique temps-espace). Il faut démontrer que tous ces résultats sont différents les uns des autres, mais qu'ils sont tous situés dans certaines limites (que l'on utilise pour définir ce qu'on appelle un *attracteur étrange* qui est l'ensemble de tous les résultats possibles) (Aschan-Leygonie, 2000). Dans la pratique, avec quelques centaines de pixels extraits d'un modèle numérique de terrain, on peut tenter des approches intéressantes (Regnauld et al., 1994) mais mathématiquement très simplifiées, afin de proposer, par exemple, de réfléchir à la façon dont la tectonique joue sur le tracé chaotique de drains élémentaires en milieu côtier.

#### Bibliographie :

Bak P., Tang C., Wiesenfeld K, 1987 : Self organised criticality and explanation of the 1/f noise. *Physical Review Letters*, 59, 381-386.

Baudelle G., Regnauld H., 2004 : *Echelles et temporalités*, Belin.

Feigenbaum M.J., 1978 : Quantitative universality for a class of non linear transformations. *Jo. Sta. Physics*, 19 : 25-35.

Humboldt A. (édition 2000) : *Cosmos*, tome 1, Utz : 1-573.

Mandelbrot B., 1967 : How long is the coast of Britain ? *Science*, 156, 637-640.

Regnauld H, Louboutin R., 2002 : Sediment transport in beach and coastal dune environment, Brittany, France. *Sedimentary Geology* 150 : 17-29.

Regnauld H., Ramos A., Dias J.A., Gouéry P., 1994: Chaotic distribution of ravines in the Arrabida region: implication for recent tectonics. *Gaïa*, 9:103-108.

Robert A., Roy A., 1993 : La modélisation fractale et la variabilité spatiale des phénomènes naturels. *Géogr Phys. et Quat.*, 47:3-19;

Roy P.S., Cowell P.J., 1996 : Simulation Modelling of Large Scale Coastal Behaviour: A Review. IGCP 367 Annual Meeting, Late Quaternary Coastal Records of Rapid Change : Applications to présent and future conditions, Sydney : 1-16.

Thom R., 1974 : *Modèles mathématiques de la morphogenèse*, C.Bourgeois.

## Séances 6 et 7 : Equilibre mobile cyclique et évolution non linéaire. (cours incomplet)

*L'enjeu de ce cours (étalé sur deux séances) est de montrer la complexité de la notion de stabilité dans le temps. Il aborde le changement climatique afin d'exposer combien la notion de réponse différée (lagged response an anglais) est un élément essentiel à la connaissance des conditions de stabilité/instabilité. Après quelques rappels, deux exemples successifs sont présentés, pour appréhender le problème à deux échelles de temps. En premier lieu le cours se fonde sur un article (débatu) de Ruddiman et traite du passage climat chaud/climat froid*

A cause du mécanisme de l'albedo, la quantité de chaleur introduite dans l'atmosphère dépend, en grande partie (mais pas exclusivement), de la quantité d'insolation reçue et de l'extension des surfaces en glace, qui réfléchissent la lumière et ne la transforment que très peu en chaleur. La quantité de chaleur exportée par l'atmosphère dépend (en grande partie) des gaz à effet de serre (voir cours des années précédentes). On peut donc considérer qu'une modélisation de ces trois facteurs pourrait expliquer la stabilité ou l'instabilité de cette quantité de chaleur, donc du climat global.

### 1) Quelques rappels au sujet de la chaleur dans l'atmosphère.

L'insolation dépend, en gros de trois variables qui sont la précession, l'obliquité et l'excentricité.

L'excentricité est celle de la révolution de la terre autour du soleil. Elle se fait selon une ellipse mais le grand axe de cette ellipse varie, au point que parfois l'ellipse est proche de la forme d'un ballon de foot, parfois proche de la forme d'un ballon de rugby (c'est une image bien sur!!, la variation n'est pas si grande!). Cette variation est cyclique sur environ 110 000/ 125 000 ans. Elle fait varier la quantité de lumière reçue (en fonction de la distance terre / soleil) de quelques fractions de % (et cette valeur chiffrée est en discussion...)

L'obliquité est celle de l'axe de rotation de la terre (celui qui passe par les pôles N et S) par rapport au plan dans lequel se fait la révolution autour du soleil, le plan de l'écliptique. Cette variation est de l'ordre de 3° et a une période de l'ordre de 40 000 ans. La conséquence en insolation est forte. On sait que lors des équinoxes les rayons du soleil frappent à la verticale l'Equateur et lors des solstices, les Tropiques. La distance Equateur / Tropic est fonction de l'obliquité, actuellement 23° 27'. Un degré fait à peu près 111 km en latitude. Si cette obliquité change, la position des Tropiques change aussi, ainsi, d'ailleurs que celle des cercles polaires. Un changement de 3° signifie, matériellement, que la position des Tropiques, et des Cercles Polaires, varie (en Nord/Sud) de 330 km. Il est évident que cela joue fortement sur le climat.... par le changement que cela impose à l'insolation, qui serait dans une proportion que l'on estime (mais dont on discute) autour de quelques %.

Enfin la précession est due à la différence entre la durée d'une révolution et la position dans l'espace (par rapport aux étoiles) que la terre occupe à chaque début/ fin de révolution (on peut simplifier la représentation en disant que la terre fait toujours la même révolution mais que entre temps le soleil bouge un peu..). Le cycle est de l'ordre de 20 000 ans. Cela ferait varier la quantité de lumière de l'ordre du un %.

En théorie la somme de ces fluctuations (qui sont trois types d'équilibres cycliques) devraient expliquer le climat. Milankovitch le pensait. Des calculs précis, fait par de nombreux scientifiques (dont certains parmi les plus actifs dans ce domaine sont Berger et Loutre) montrent que cela est assez vrai.

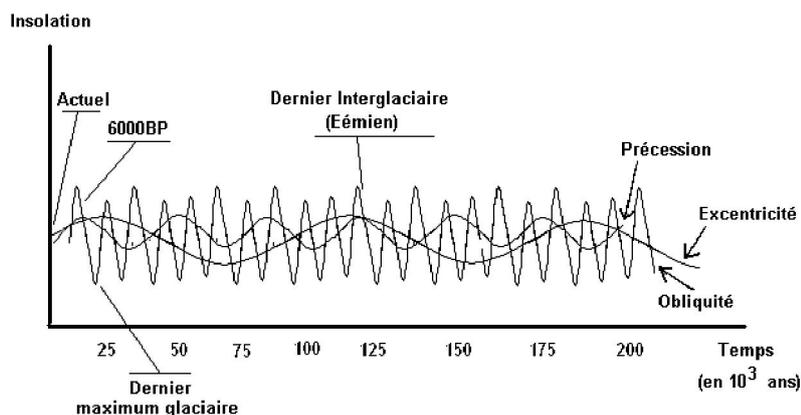
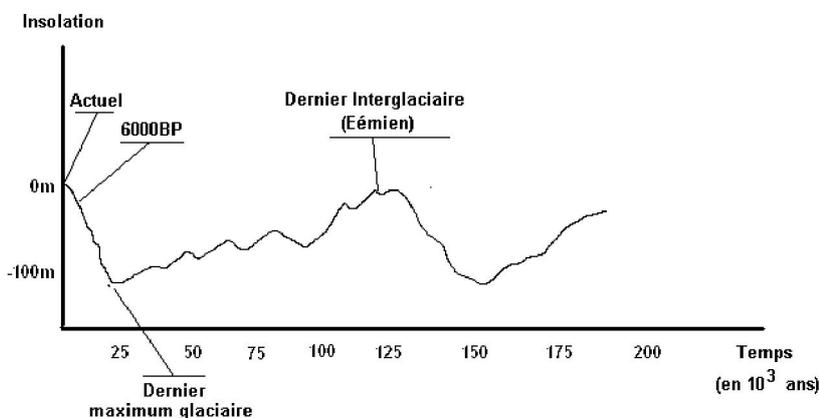


Figure 14 : Les principaux forçages astronomiques.

Les "pics" de froid et de chaud coïncident plutôt bien avec des périodes où les trois cycles sont "hauts" ou "bas". C'est assez clair pour l'Eémien, moins évident pour le dernier maxi glaciaire (22 ou 24 000 BP). Ça ne colle pas trop bien pour l'Actuel, mais ça tombe pile comme il faut pour l'optimum chaud néolithique (vers 4800BP?).

L'inconvénient est que cela ne colle pas très bien pour le niveau marin.



Niveau ( global et simplifié) des Océans

Figure 15 : Evolution du niveau marin

La figure 15 (dont le détail n'est pas exactement indiscutable...) montre que le niveau baisse pendant quelques 100 000 ans d'environ 100m, avec des fluctuations (ici simplifiées), puis remonte rapidement (20 000 ans) de la même hauteur. L'explication classique a été de dire que la neige mettait quatre fois plus de temps à s'accumuler et à se transformer en glace continentale (l'eau prise dans les glaces continentales, les inlandsis, fait alors défaut à l'océan dont le niveau baisse), que la glace continentale ne mettait de temps à fondre (et à réintroduire l'eau dans l'océan dont le niveau monte). Ceci est expérimentalement vrai. Mais ça n'explique pas les fluctuations.

Il est très difficile de lier chaleur (due à l'insolation/effet de serre) *et* volume en glace *et* niveau marin. Une des raisons est que le niveau marin ne change pas seulement en fonction du volume des glaces mais aussi en fonction de sa dilatation thermique. A quantité d'eau égale, l'eau chaude occupe plus de volume que l'eau froide. Une autre raison est qu'il n'y pas de lien simple entre chaleur et volume des glaces.

## 2) Changement climatique et niveau marin, les décalages temporels selon Ruddiman.

L'article de Ruddiman, en 2003 présente (génialement) une vue de la question. Ruddiman a participé à Climap, à Specmap et travaille depuis la fin des années 70 sur la modélisation du changement climatique. Son avis est, bien sur, un avis individuel, mais il est l'un des quelques rares scientifiques (avec Shakelton, Hays, Berger, Bard, Jouzel, Petit, Pirazzoli, Chappell, Lambeck, Pelletier...) à pouvoir proposer une synthèse (très consensuelle dans son optique générale, mais pas indulgente avec tous les points de détails..) avec quelques chances de voir les choses avec recul et discernement.

Il dresse d'abord un historique des étapes de la modélisation du problème (avec les programmes Climap de 1976 et Specmap de 1993) en insistant sur la qualité du travail déjà effectué. Climap avait décrit les relations entre les facteurs orbitaux, la quantité de chaleur et le niveau marin. Les premiers liens entre fonte des glaces, courants marins profonds et climats aux basses latitudes avaient été envisagés. Specmap avait décrit une grande partie des fluctuations en indiquant les vitesses relatives de réchauffement et de refroidissement. Pour cela on avait modélisé la durée qu'il fallait pour qu'une fonte d'un inlandsis au Nord ait des effets au Sud. On expliquait ainsi de très nombreux décalages chronologiques entre les deux hémisphères, décalages que la seule différence d'insolation entre les deux hémisphères ne suffisait pas expliquer. (par exemple quand l'été de l'Hémisphère Nord est à un pic *chaud* d'excentricité, l'hiver de l'hémisphère sud est à pic *froid* d'excentricité. C'est juste un exercice à résoudre graphiquement).

Il reste que ces modèles continuent à poser comme premier des rythmes fondés sur l'excentricité, avec une domination des périodes chaudes tous les +/- 120 000 ans, et de périodes froides entre les deux, décalées de 100 000 ans. (100 000 ans de refroidissement, 20 000 de réchauffement).

Ceci est exact et ne doit pas être remis en cause. Mais dès lorsque les modèles n'expliquent pas les fluctuations entre les pics froids et chauds, il faut, dit Ruddiman, les modifier. Il propose donc une nouvelle approche (qui n'invalide pas ce que les autres ont de bon!), fondée uniquement sur l'obliquité (O) et la précession (P), et dans la quelle l'excentricité (E) ne joue pas, sinon comme paramétrant les deux premiers. Autrement dit tous les changements climatiques s'expliqueraient pas une combinaison de O et P, il y aurait juste leur intensité relative qui varierait en fonction de E.

Le forçage par l'obliquité.

C'est le plus efficace, car c'est celui qui joue le plus sur la géographie de la distribution de la lumière (les tropiques bougent de 330km!!!).

Pour comprendre la figure ci dessous il faut comprendre quelques mécanismes basiques.

1) La glace fond quand la luminosité augmente en été, mais elle fond avec un retard d'environ 6500 ans. (Ce nombre est objet de discussion). La glace fond plus (et plus vite) dans l'hémisphère Nord parce que les inlandsis y sont situées plus au Sud (à cause de la disposition des reliefs, comme la Scandinavie ou le Labrador..) alors que dans l'hémisphère Sud l'Inlandsis est forcément très au Sud : il n'y a pas de terre au Nord! (pas d'inlandsis sur les Shetlands du Sud ni les Malouines). L'inlandsis est Antarctique...

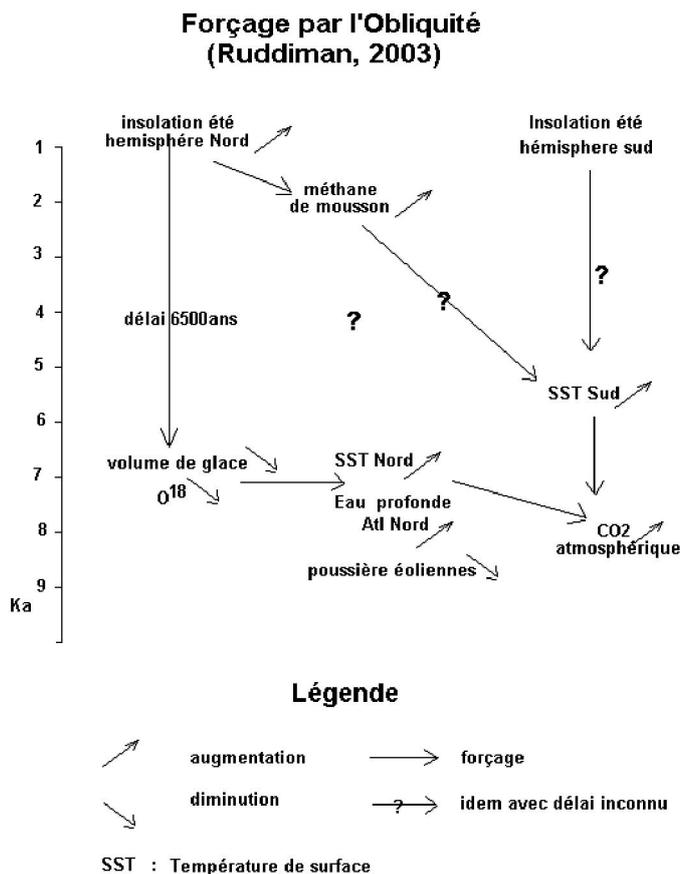


Figure 16 (d'après Ruddiman, 2003) : Obliquité et forçage climatique, une proposition de synthèse.

2) il y a du carbone dans l'eau et du carbone dans l'air. Les deux sont censés s'équilibrer l'un l'autre comme deux gaz dissous dans un autre, et qui s'appuieraient sur les deux cotés d'une seule membrane (en l'occurrence la surface de la mer, séparant un gaz, l'atmosphère... d'un autre médium considéré comme un gaz, l'eau de mer, tous les deux contenant du C dissout). Seul le C de l'atmosphère joue (immédiatement) sur l'effet de serre.

En période froide (et sèche) il y a beaucoup de vent, qui transporte des particules depuis la terre vers la mer. Les eaux marines sont fertilisées par ces poussières et plus d'animaux y vivent, plus de carbone y est donc fixé sous forme solide (dans ces animaux) et non dissoute. Donc il y a moins de pression partielle de C dans l'eau, donc moins dans l'air (donc il y en a moins disponible pour l'atmosphère et l'effet de serre).

3) Quand la glace fond, elle fabrique de l'eau froide qui coule au fond de l'océan (densité) et forme la NADW (North Atlantic Deep Water). Cette eau froide bloque les réactions chimiques (il s'agit de réactions un peu "semblables" à celles des milieux karstiques, provoquées par l'eau sur le sédiment profond ou moyennement profond) et peu de carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>) est produit par dissolution. Il ne peut se combiner qu'avec peu de CO<sub>2</sub> marin et l'excès de celui-ci est donc disponible pour être exporté de la mer vers l'atmosphère. En fait il y a excès dans l'eau, une pression partielle élevée et transfert dans l'air pour compensation par équilibre. Le réchauffement peut alors s'accélérer.

En revanche, durant une période froide, la glace ne fond pas (ou peu), il y a peu de NADW, donc plus (davantage) de dissolution, donc plus de CaCO qui peut se combiner avec plus de CO<sub>2</sub> dissout, qui est donc fixé dans l'eau et qui n'est pas disponible pour passer de l'eau dans l'air.

2 et 3 donnent deux raisons pour expliquer que les périodes froides tendent à confiner le carbone dans l'eau. 1 indique comment les périodes froides peuvent être remises en cause par une fonte d'été de l'Inlandsis du Nord.

Le schéma de Ruddiman (qui ne modifie que très légèrement les schémas de Specmap) explique comment, avant que la glace du Nord ne fonde et modifie la circulation des NADW, le méthane des zones de moussons (voir plus bas) peut entraîner une hausse relative de la SST au Sud et - éventuellement - une déstabilisation de la glace antarctique d'hiver.

Il y a de larges surfaces de terres entre 0 et 25°Nord. Il y a de larges surfaces d'eau entre 0 et 25° Sud. Au delà de 25° la différence est encore plus flagrante (plus d'eau au Sud, plus de terre au Nord). On voit donc que, suivant l'hémisphère, ce qui réchauffe la terre ou la mer peut jouer différemment sur le climat.

Dans le cas de ce croquis, (obliquité et insolation été boréal) il y a plus de fonte en été au Nord, plus de production de NADW, moins de dissolution (et moins de fertilisation par les poussières) plus de CO<sub>2</sub> disponible dans l'eau, donc plus dans l'air, donc plus de disponible pour l'effet de serre. Autrement dit l'air se réchauffe avant que la glace n'ait fondu!!

Dans le cas de ce croquis, (obliquité et insolation été boréal) il y a plus de pluies sur la zone intertropicale plus vaste, plus de forêts et plus de méthane produit par décomposition des végétaux morts. Il y a plus d'effet de serre et réchauffement de l'atmosphère.

Dans le schéma ci dessus, Ruddiman explique que l'augmentation de l'insolation d'été dans l'hémisphère nord en été a plusieurs effets :

- 1) un effet différé, (6500 ans) sur la fonte des inlandsis nordiques
- 2) un effet immédiat (à cause de l'extension de l'espace parcouru par la Zone Inter Tropicale de Convergence) sur la végétation intertropicale, qui produit beaucoup de méthane. C'est un gaz à effet de serre, qui réchauffe donc vite la planète avant que la glace n'ait réellement commencé à fondre. Les températures d'eau océanique au Sud augmentent alors que l'Inlandsis ne bouge pas (mais le délai est inconnu, d'où le ? sur la figure, délai évalué cependant à un ou deux millier d'années, le temps de fabriquer une forêt équatoriale).

Ce qu'il faut retenir de cette partie du cours est le lien entre système (bilan de chaleur), espace concerné (un ou deux hémisphère, terre ou mer) et le décalage temporel entre forçage et réaction. Le décalage dans le temps n'est pas lié à la distance, mais à la vitesse du processus de diffusion. Ces derniers (le vent, le courant...) sont très variables et le système qui tente de décrire leurs interactions est donc complexe.

### **3) Les changements brutaux et le convoyeur dans l'Atlantique Nord, un système à trois mode de régulation**

Sur des pas de temps plus courts, les choses ne sont pas véritablement plus simples. Il existe des changements très rapides qui sont observés et mal compris, en lien avec des événements dits « Heinrich » ; « Dansgaard –Oeschger » et avec le grand convoyeur.

Bibliographie (à compléter par celle du cours de morphologie littorale de Licence3, UED) :

Maslin M.A., Thomas E., 2003 : Balancing the deglacial global carbon budget : the hydrate factor. *Quat. Sci. Rev.*, 22 :1729-1736.

O'Hare G., Jonhson A., Pope R., 2005 : Current shifts in abrupt climate change : the stability of the North Atlantic conveyor and its influence on future climate. *Geography*, 90,3 : 250-266.

Ruddiman, 2003 : Orbital insolation, ice volume and green house gases. *Quat. Sci. Rev.* 22 : 1597-1629.

## Séance 8 : Espace et stabilité (une discussion sur la notion de limite???)

*L'enjeu du cours est de montrer des systèmes stables, perturbés par des événements extrêmes, qui reviennent à l'état initial en passant par des étapes inégalement longues. On compare donc des lagged responses avec des fréquences d'événements.* La séance est fondée sur des exemples pris dans des estuaires en Afrique du Sud, à partir d'articles de Cooper.

En Afrique du Sud, côte Est, le long du courant des Aiguilles, l'environnement marin est micro tidal, proche des houles d'Alizé mais avec des swell d'Ouest ( on est à 35° Sud) et le climat a un caractère méditerranéen avec une très forte irrégularité des précipitations. Le long de la côte, les affleurements géologiques sont changeants et les substrats des bassins versants varient entre des espaces plans et des territoires escarpés. Dans les estuaires les forçages principaux (forçage signifie "déterminant") sont les débits, la marée et les houles, et les crues. Houles et marées sont des phénomènes relativement réguliers. Régulier ne veut pas dire qu'elles ont la même intensité tout le temps, mais qu'elles existent tout le temps. Les crues sont occasionnelles. Le débit du bassin versant est plutôt régulier dans le temps (annuellement) mais fortement variable suivant les lieux. Il y a donc une sorte de forçage de fond, houles et marées, tandis que deux forçages événementiels s'y rajoutent. Avec une forte variabilité dans le temps, les crues, avec une forte variabilité dans l'espace, les débits (cependant, crue et topographie du bassin versant ne sont pas deux forçages totalement indépendants!!)

On peut donc concevoir que les estuaires vont dépendre (dans leur morpho-sédimentologie) de la relation entre ce qui dépend

- 1) des houles (un peu),
- 2) de la marée et du débit "habituel" (qui se contrecarrent, puisque la marée est le seul forçage capable de faire couler un fleuve vers l'amont!!)
- 3) de l'impact des crues exceptionnelles. Pour commencer on va décrire ce qui différencie les estuaires les uns des autres dans les conditions fréquentes, le jeu marée/débit

1) Tide- and river- dominated estuaries : des différences sédimentologiques et spatiales

Un estuaire dominé par la marée est un estuaire dans lequel le débit de la rivière (en anglais les rivières se jettent dans la mer, au contraire des rivières françaises qui se jettent dans les fleuves) est assez faible, et dans les quels le prisme d'eau tidale (l'eau apportée par le flux, c'est à dire la marée montante) est assez rapide et volumineux pour entretenir un chenal de flot et, à son extrémité un delta de flot dans l'estuaire (voir croquis). Comme beaucoup d'eau entre avec le jusant, cette eau transporte beaucoup de matériel marin et le dépose jusque l'intérieur de l'estuaire. Le delta de flot est donc fait de produits marins. Les apports alluviaux sont, en comparaison, faibles et cantonnés à l'amont. A ceci s'ajoute que l'évier est entretenu par des courants assez forts pour qu'il résiste à la dérive littorale (qui pourrait arriver à le fermer) et ne soit pas fermé par ses apports latéraux. L'estuaire stocke donc préférentiellement des produits marins, biogènes et terrigènes, sableux.

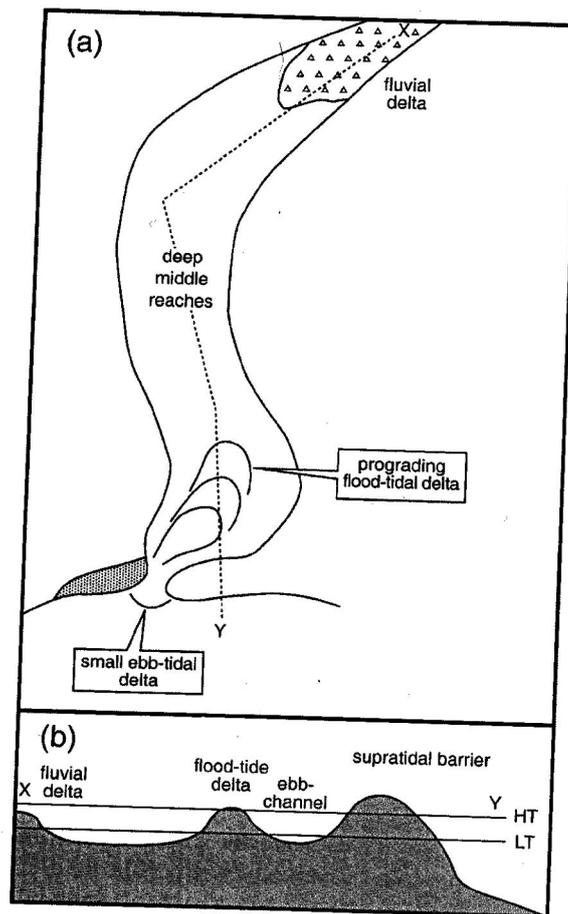


Fig. 2. Main morphological characteristics of a tide-dominated microtidal estuary. Note the tripartite division of facies from sandy lower reaches through deep, muddy middle reaches to sandy upper reaches.

Figure 17 (Cooper 2002) : Morphologie d'un tide-dominated estuary.

De façon tout à fait opposée, un estuaire dominé par la rivière (ce qui signifie fleuve, dans ce contexte en anglais) est marqué par un fort débit et surtout par un fort alluvionnement, avec une fraction vaseuse importante. En général ceci s'explique par un bassin-versant taillé dans des reliefs à fortes pentes et avec des roches relativement tendres, donc érodables. Dans l'estuaire, l'essentiel de la place est occupé par les alluvions donc il y a peu de place pour laisser entrer un prisme d'eau tidale. Les courants de flots véhiculent donc peu d'eau, donc il y a peu de matériel marin apporté dans l'estuaire et pas (ou presque pas) de delta de flot. Comme il y a peu de pénétration tidale, il y a un étier peu large et peu profond et il peut être fermé par la dérive (en période de très basses eaux, ce qui, dans un climat méditerranéen, peut arriver chaque année, ou plusieurs années de suite!!). Les alluvions s'accablent donc dans l'estuaire et forment des bancs. L'estuaire stocke donc préférentiellement des produits terrigènes continentaux et vaseux.

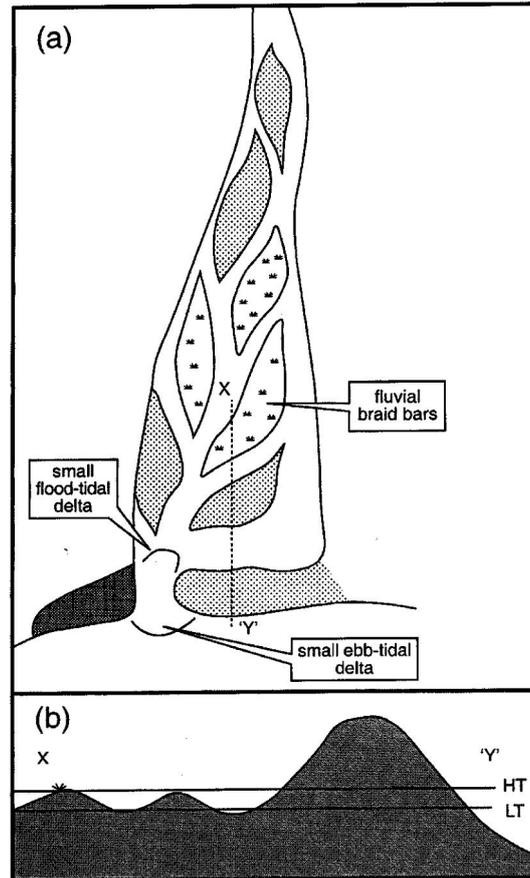


Fig. 4. Typical morphology of a river-dominated estuary. Note the extension of fluvial sediment to the barrier and the absence of a flood-tidal delta.

Figure 18 (Cooper 2002) : Morphologie d'un river-dominated estuary

2) les estuaires et leur comportement en réponse aux crues exceptionnelles.

Un tide-dominated estuary répond aux crues exceptionnelles de la façon suivante.

La crue emporte le matériel du delta de flot et le dépose à l'extérieur de l'étier, (un peu comme si c'était un delta de jusant! mais c'est un delta de crue!). En même temps la crue détruit (partiellement ou totalement) la barrière et en mélange le sédiment avec celui du delta de crue. Cela revient à dire que la crue exporte hors de l'estuaire le matériel qui, en temps normal s'y était accumulé, c'est à dire du matériel marin.

La bathymétrie à la sortie de l'estuaire se trouve ainsi modifiée. Les houles sont ralenties (il y a moins de fond) et, peu à peu, à partir du matériel du delta de crue, construisent une nouvelle barrière "in a position seaward of the pre-flood barrier" (plus au large que l'initiale donc). Celle ci, en une durée de trois à quatre ans, finit par reculer sur elle même et retrouve plus ou moins exactement la position initiale. Ce recul est du au fait que les houles changent au fur et à mesure qu'elle déplacent le matériel du delta de crue et le "remontent" pour former la nouvelle barrière. Le fond marin est modifié (approfondi, puisque du sédiment en est enlevé) les houles sont moins freinées (moins diffractées) et arrivent donc avec un peu plus d'énergie à la plage.

Un river-dominated estuary répond aux crues exceptionnelles de la façon suivante.

La crue exceptionnelle évacue au large le matériel de l'estuaire, qui est un sédiment continental. L'estuaire est alors largement ouvert et le courant de flot peut y pénétrer et y déposer du matériel marin (on est alors dans le cas de figure d'un tide-dominated estuary). Le stock de matériel qui avait été

évacué lors de la crue était essentiellement continental, avec, donc une forte fraction vaseuse. Les houles dispersent ce matériel et ne le redistribuent pas vers la côte : il est trop fin, il est facilement mis en suspension et il est évacué latéralement par les courants, au contraire des sables du cas précédent. Il y a donc peu de matériel en mer qui soit disponible pour reconstruire une barrière... ceci fait que l'étier par lequel passe le flot reste largement ouvert et explique le comportement de tide-dominated estuary



Figure 19 : Cet estuaire est au Portugal, pas en Afrique du Sud, mais fonctionne un peu comme un river-dominated (photo prise après une saison sèche).

Cependant, au cours du temps les alluvions déposées par le courant du fleuve prennent l'essentiel de la place, réduisent l'espace disponible pour laisser entrer le flot et l'on revient à un fonctionnement de river-dominated estuary. Au cours de ce temps la dérive littorale a apporté assez de matériel sableux pour qu'un début de barrière se reconstruise. On arrive donc de nouveau à un fonctionnement de river-dominated. Mais cela a pris quelques 50 à 70 ans et c'est passé par une étape de tide-dominated.

3) Des modes de stabilité et des temps différés (et différents) pour revenir à "l'équilibre".

Cet exemple présente donc deux types d'estuaires, déterminés par la relation (l'importance relative) entre la nature et la quantité de matériel continental / et la nature et la quantité de matériel continental marin qui les remplit. Les tide-dominated sont caractérisés par une large quantité d'espace disponible et du matériel plutôt sableux. Ils résistent mal à des crues parce que le sable est peu cohésif et que l'eau est en grande quantité. Les river-dominated sont remplis de vase, ont peu d'espace disponible pour l'eau : leur matériel est assez cohésif et ils ne sont érodés que si une crue très violente peu provoquer avec une faible quantité d'eau un courant très fort. Il suffit d'un débit de 1400 m<sup>3</sup>/s pour destabiliser un tide-dominated, il faut un débit de 6500m<sup>3</sup>/s pour un river-dominated. Ceci implique que l'événement destabilisant a une fréquence décennale pour les tide-dominated, tandis qu'il est séculaire pour les river-dominated.

Ce qui est intéressant c'est que les temps de cicatrisation, de retour à la situation initiale sont également compris dans ce type de relation : 3 à 5 ans pour les tide-dominated, 50 à 70 ans pour les river-dominated.

Ces estuaires sont donc, en un sens, des milieux « stables » puisque leur temps de reconstitution est compatible avec le temps de retour des événements qui les destabilisent. A discuter...

Bibliographie :

Cooper J.A.G., 2002 : The role of extreme floods in estuary-coastal behaviour : contrasts between river- and tide- dominated micro tidal estuaries. *Sed. Geol.*, 150 : 123-137.

Cooper J.A.G., Pilkey O.H., 2004 : Longshore drift, trapped in an expected universe. *J. of Sed. Res.*, 74 : 599-606.

## Séance 9 : Stabilité : réponse stable à un système instable de processus.

Ce cours demande un travail aux étudiants sur la notion de complexité à partir d'un exemple climatologique au Spitzberg. *L'enjeu de ce cours est 1) de faire lire aux étudiants un article de recherche, 2) de comprendre comment un système fondamentalement instable et variable peut provoquer des réponses marquées par une très faible variabilité et une forte stabilité*

Le climat micro local au sol, au Spitzberg, est extrêmement variable et fort complexe à modéliser. Les réponses en terme de formation végétale, sont très stables et peu variées. Ce cours n'est pas véritablement un cours magistral, mais une discussion entre les étudiants et l'enseignant.

Les étudiants disposent (photocopie) de documents, qui sont reproduits dans ce poly. Lors de la séance précédente, il leur est demandé (comme un travail obligatoire) de lire l'article en question, qui est en bibliothèque et en français (figures 20 à 22).

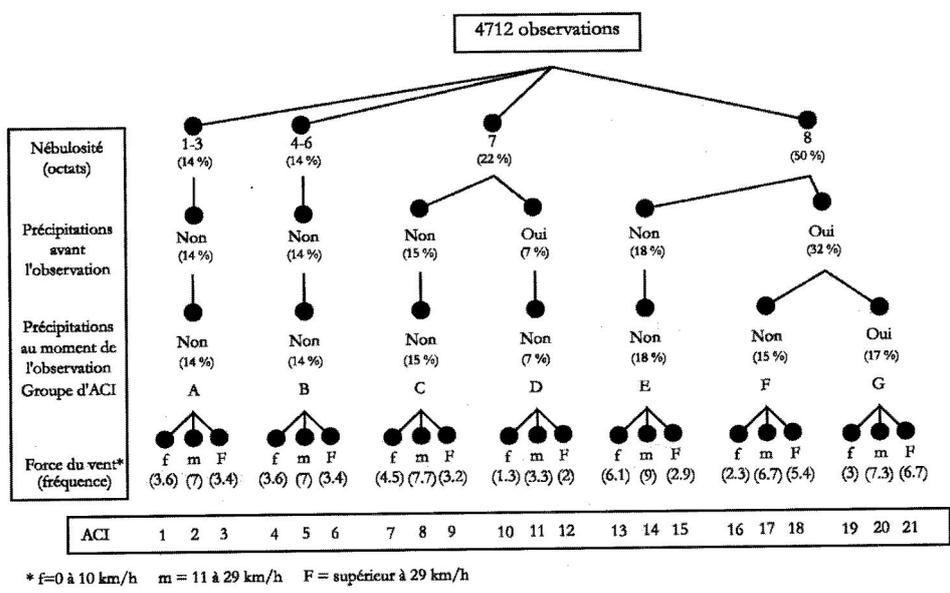


Figure 2 : classification des observations ponctuelles selon des règles déductives

Figure 20.

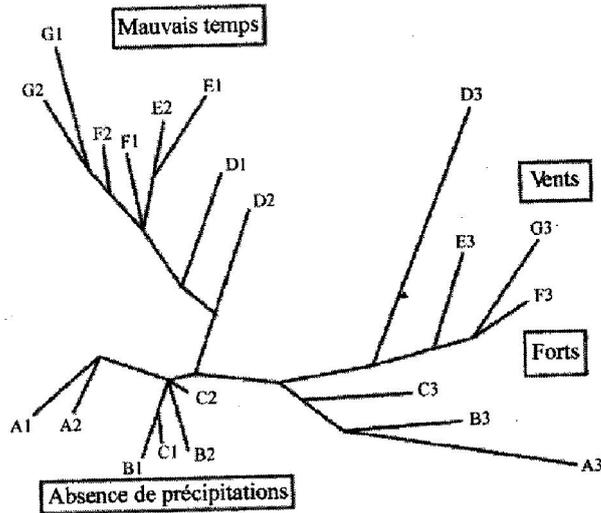


Figure 6 : Liaisons postérieures des ACI à 6 heures d'intervalle

Figure 21

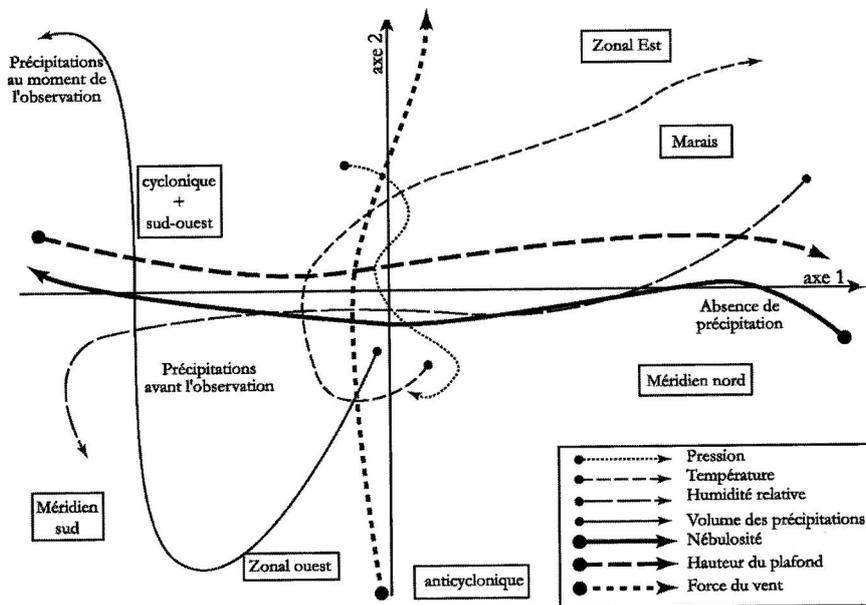


Figure : Graphe factoriel (plan des axes 1 et 2) des caractères du temps qu'il fait

Figure 22

Bibliographie :

Joly D., 2004 : Ambiances climatiques instantanées : application à la microclimatologie du Spitzberg. *Norôis* 191 : 43-57.

**Université Rennes 2**  
**Dpt Géographie et Aménagement**

**Master 1**  
**Géographie, Aménagement, Société, Environnement**  
**(GASE)**

***Cours 2008-09 "Milieux stables, milieux instables"***

*herve.regnauld@uhb.fr*

**Séances 10 : Stabilité par Déterminisme (quant à la forme)?**

L'exemple est pris en morpho littorale et traite des accumulations de matériel à granulométrie moyenne/forte. Il est très fortement inspiré par les travaux de Orford (et al, 2002). ***L'enjeu de ce cours est de réfléchir à la notion de stabilité/instabilité en fonction des transformations qu'une forme subit. Cela introduit la notion d'« accommodation space », qui est fondamentale en aménagement et qui module, pondère, la relation "lagged response/ forcing return".*** Le choix de cet article vient du fait qu'il a été écrit (par Orford *et al* entre 2000 et 2002) à la demande des aménageurs et des politiques (du Royaume Uni) qui voulaient une synthèse de haut niveau scientifique pouvant être utilisée comme document de référence dans toutes les situations concrètes d'aménagement littoral concernant une structure en galet.

Une accumulation de galets (une barrière, pas une plage de poche) a un comportement qui dépend d'un certain nombre de « controls » c'est à dire de paramètres déterminants. Il faut en faire l'inventaire et les hiérarchiser les uns par rapport aux autres (1). Ensuite il faut comprendre quelle est la traduction géomorphologique de leurs relations et donc expliquer la forme en fonction du jeu (interplay) de ces processus (2).

L'étape suivant consiste à modéliser la « sensitivity » de cette forme (en français on dirait vulnérabilité) et donc de comprendre quand elle est en péril de disparition (3). C'est alors que l'on peut tenter d'en modéliser l'évolution sur le long terme (4).

N.B. Le terme anglais "forcing" correspond à un déterminant qui agit longtemps et fortement (niveau marin) tandis que le terme "control" renvoie plutôt à un paramètre changeant sur le temps court et inconstant sur le temps long (l'angle d'incidence des houles).

**1) Les (principaux) facteurs (les « controls ») sont les suivants.**

-la taille des galets.

Ils sont répartis sur le profil en fonction de leur taille et en fonction de l'énergie de houles. Par beau temps, les houles déplacent les galets vers le haut de la plage et ce sont les galets les plus petits qui vont le plus haut. Il y a donc un gradient de taille (décroissant) entre la basse plage et le haut de plage. Par tempête l'énergie des houles est plus forte. Tous les galets petits sont évacués et ne peuvent rester en place que ceux qui sont les plus lourds (ou gros) et que les houles, même fortes n'arrivent pas totalement à évacuer. En général les galets gros sont concentrés en haut de plage, à l'endroit où, après leur déferlement, les houles dispersent leur énergie (la fin du swash, ou jet de rive). Une tempête évacue donc du matériel fin en bas de plage et accumule du grossier en haut de plage. Cela mène à une répartition théorique qui est le résultat de l'action alternée des tempêtes et du beau temps.

-la fourniture en sédiment

Le croquis ci dessous parle de lui même, avec ses trois étapes. Si la fourniture de sédiment est abondante (site source riche, croquis du haut) il y a non seulement des galets sur la barrière mais aussi du sédiment sur l'avant plage (sous -marine). Les houles sont bien freinées avant de déferler. Elles arrivent avec une bonne obliquité et il y a une bonne dérive littorale. La barrière est progradante vers l'aval dérive et, souvent, croit en formant des crochets successifs. La barrière est un site de transit (pas un puits) parce que le sédiment y passe et peut, vers l'aval, en sortir. S'il y a un site puits, il est encore plus à l'aval.

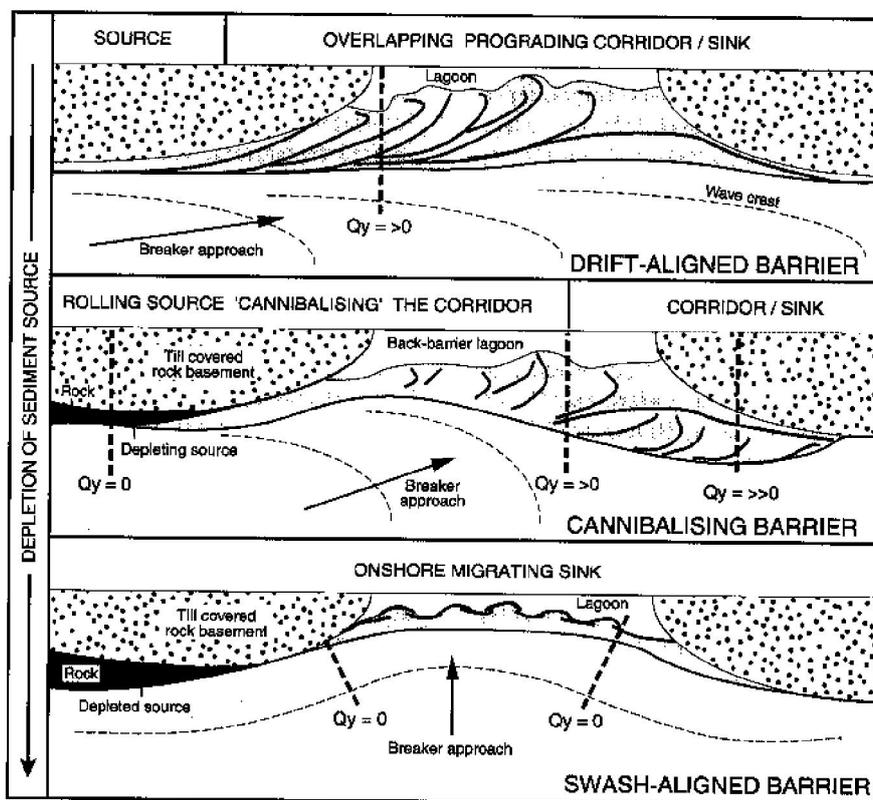


Fig. 2. The change from a drift-aligned barrier to a swash-aligned barrier is observed through the restructuring of the controlling wave-sediment cell as a reduction or cessation in the longshore sediment supply engenders barrier cannibalisation. Sediment supply is from wave erosion of a glacial drift-covered rock basement.  $Q_y$  is the longshore sediment transport rate. Eventually, the sediment source is depleted in that wave action can no longer reach and mobilise new sediment into the longshore corridor. The net transport emphasis of drift alignment is along shore, while swash alignment emphasises net onshore transport.

Figure 23 (Orford et al, 2002) : comportement stable d'une barrière de galets.

Si la source de sédiment s'appauvrit (voir le dessin du milieu), il y a moins de matériel sur l'avant plage, les houles sont moins freinées et arrivent moins obliquement. La dérive est moins forte mais elle continue à exister. Comme il n'y a plus assez de sédiment, cette dérive enlève à la racine de la

barrière plus de matériel qu'elle n'en apporte. La barrière se « cannibalise » elle-même. Elle se fragilise.

Si l'apport en sédiment continue à être déficient, alors la barrière fragilisée peut rompre (on verra ce cas plus tard) ou, plus simplement, reculer sous l'impact des houles. Celles-ci, de moins en moins diffractées par un fond sous-marin dépourvu de sédiment (donc plus profond) arrivent plus perpendiculairement et le stock de galet de la barrière prend peu à peu la forme d'une accumulation face aux houles (*swash aligned*) alors qu'il était primitivement *drift aligned* (le long de la dérive). Dans le cas d'une structure face aux houles, comme il n'y a plus (ou presque plus) de dérive, la barrière devient un site puits : il y a très peu de sédiment qui y arrive encore, mais il n'en sort plus.

-les houles.

Celles qui frappent la barrière peuvent, schématiquement, être classées en deux catégories, selon leur « runup ». Ce terme est presque équivalent à jet de rive. Il désigne à quelle hauteur les houles, une fois déferlées arrivent à monter le long de la pente du profil de plage. Ce runup n'est pas seulement fonction des tempêtes, mais aussi de la longueur d'onde des houles et de la pente de la plage (et de sa rugosité). Il n'y a donc pas de corrélation simple entre runup et énergie (vue auparavant, en tant qu'elle induit un tri granulométrique du matériel). Schématiquement, des houles à long runup peuvent monter jusqu'au sommet de la barrière et distribuer du matériel derrière la crête, sur la face interne. Cela s'appelle « overwashing ». Les dépôts ainsi construits sont, en français appelés « éventails de tempêtes » mais ne sont pas exclusivement dus à l'intensité de la tempête, ils dépendent beaucoup plus d'une éventuelle surcote et de la longueur d'onde des houles. *Je conserve donc, dans mon vocabulaire géomorphologique le terme anglais overwash dont je ne connais pas de traduction française.* A la longue, l'overwash déplace la barrière vers l'intérieur des terres.



Figure 24 : Photo prise en Terre de Feu argentine : barrière de fond de baie.

Les houles à runup moins long peuvent apporter du matériel vers la crête mais ne la franchissent pas. Cela s'appelle overtopping et cela implique un accroissement de la hauteur de la crête.

-le niveau marin

En théorie les barrières fonctionnent assez bien avec la règle de Brunn. Sur le terrain c'est assez souvent vrai. Ce qu'il faut, en plus, prendre en considération est qu'avec un relèvement du niveau

marin, de nouvelles sources de sédiment peuvent apparaître : un plan d'eau plus haut peut atteindre des réserves de matériel qui étaient auparavant hors de sa portée.

-d'autres contrôles existent, en particulier la forme (topographie) du substratum

## 2) Quels comportements stables avec de tels contrôles ?

Orford pose une question très embarrassante pour les aménageurs (et les scientifiques). Comment se fait-il qu'avec des contrôles si bien identifiés et mesurés, des barrières proches les unes des autres, (donc théoriquement soumises aux mêmes types de contrôles) aient des comportements si différents?

"the question as to why there is not a regional consistency in barrier behaviour both in time and in space ?".

Il explique (c'est cette partie de son article que je vous ai distribuée en photocopie et en anglais) que le système barrière est chaotique, auto organisé, résilient. Mais au lieu d'osciller autour d'une configuration déterminée (un attracteur étrange) il oscille entre deux attracteurs qui sont deux "modèles" répondant tous les deux, mais différemment à une même exigence : dissiper l'énergie reçue en conservant la pérennité de la forme (c'est alors une stabilité, obtenue par une distribution continue du matériel sédimentaire). Si des conditions limites (boundary conditions) sont franchies, alors la barrière, en tant que forme, disparaît et le sédiment qui la compose est alors dispersé (réparti en tas non continus, non connexes), donc disponible pour la construction d'autres formes. Nous allons voir cela en détail.

Le mécanisme basique repose sur l'alternance overtopping / overwashing et sa relation avec la fourniture de sédiment (ce que Orford appelle  $Q$ ). Supposons un faible apport de sédiment. Lorsque des houles fortes arrivent elles prennent du matériel sur le profil, à l'endroit où elles arrivent (cela dépend de la marée et d'une éventuelle surcote et c'est souvent là où elles déferlent) et elle le déplacent dans deux directions. Vers le haut (run up) et vers le bas (backwash). Logiquement le centre de la plage s'amaigrit tandis que le haut et le bas engraisent : le profil devient plus concave. Ce comportement est très souvent observé sur des profils de plage après tempête.





Figure 25 , a,b et c: Vue générale du cordon de Pern à Ouessant en 2006 (et creusement du profil à mi hauteur de marée) et deux vues de détail après la tempête de mars 2008. Overtopping avec apport de galets récents au sommet, pardessus les anciens couverts de lichen. Overwash (photo du bas) avec recouvrement de la landward slope par des apports récents.

Si il y avait apport (latéral, par dérive) de sédiment, très vite le creux central serait comblé. Statistiquement, le niveau moyen de la mer par beau temps (d'une part) et le niveau moyen de la zone de déferlement en tempête (d'autre part) sont très proches et, à cause de la marée, sont proches de la zone de mi marée. C'est à mi marée que la mer est le plus souvent là, elle y passe (presque) quatre fois par jour, en VE comme en ME alors que les points extrêmes du profil de plage ne sont atteints que moins souvent. Il est donc normal que la tempête statistique moyenne, comme le beau temps statistique moyen donnent tous deux un niveau de la mer proche de la mi marée. C'est d'ailleurs généralement là que le profil est le plus concave et aussi, qu'il engraisse le plus par beau temps. C'est là qu'il a la plus grande variabilité (voir diagramme des phases) .

Table 1  
 Control domains and morphological phases identified from gravel-dominated barriers along the eastern shore, Nova Scotia (from Orford et al., 1996)

| Domain                               | Status              | Process Controls   | Morphology    |  |
|--------------------------------------|---------------------|--|---------------|--|
| Inception                            | Spatial Stability   | New Longshore Sediment Source<br>terrestrial basement geometry                                   | Drift-Aligned | SPIT                                       |
| Growth                               |                     | Sediment Supply Rate<br>increase SLR: further sediment sources<br>Maximum Sediment Supply        |               | Progradation<br>Multiple Ridges<br>Barrier |
| Consolidation                        |                     | Sediment Supply Reduction<br>fast RSLR: over-rides sediment reductions<br>Sediment Incorporation |               | Single Ridge                               |
| Initial Breakdown:<br>slow migration | Spatial Instability | Temporal Scales of RSLR<br>autogenetic variability controls<br>overtopping vs. overwashing rate  | Swash-Aligned | Ridge Migration<br>Rollover                |
| Fast migration                       |                     | Wave Climate<br>extreme events   |               | Barrier Overstepping                       |
| Final Breakdown:<br>Dissolution      |                     | Cannibalisation<br>local cell development<br>back-barrier transverse feeding of sediment         |               | Transverse Ridges                          |
| Reformation                          | Spatial Stability   | New Longshore Sediment Source<br>terrestrial basement geometry                                   | Drift-Aligned | SPIT<br>Single Ridge                       |

Figure 26 (Orford et al, 2002) : Comportement, comme réponse morphologique au changement d'un "control".

Mais nous avons dit que nous prenions le cas d'une plage en déficit sédimentaire. Le profil devient concave, la crête de plage est alimentée et s'élève (overtopping) et les nouvelles houles arrivant sur une pente plus réflexive peuvent générer un plus fort runup.

Orford dit que le système est auto-régulé parce qu'à partir d'une certaine concavité, la plage s'écroule sur elle même. La crête est moins haute, les houles passent par dessus, (overwash) le matériel est progressivement transporté vers la terre et une la barrière se déplace progressivement vers l'intérieur, avec une hauteur moindre et une pente moindre. Le profil est alors plus dissipatif et les houles ont un runup moins fort.

Si l'apport sédimentaire est fort, le phénomène d'overtopping peut durer longtemps, construire une barrière haute et éviter la concavité du profil. La forme a une stabilité. Si l'apport sédimentaire augmente encore, il arrive un moment où le sommet de la crête est définitivement trop haut pour les houles (il n'y a plus d'overtopping), le matériel apporté en excès est entièrement disponible pour être évacué latéralement par la dérive, ou pour faire prograder la plage vers le large... Il y a forme en équilibre, qui a la capacité de se maintenir comme forme littorale continue même face à des événements forts (ou extrêmes?). L'équilibre est obtenu par le transit régulier du matériel nouveau, dans le sens de la dérive. Il s'exprime donc par un mouvement, latéral et se traduit par des formes, les crochets de croissance qui témoignent de la dispersion du sédiment dans l'espace.

Si l'apport sédimentaire est déficient, l'overwash domine sur l'overtopping. La barrière se cannibalise (en latéral -long shore- comme en cross shore, c'est à dire selon un axe terre-mer) et elle finit par reculer sur elle même (le terme anglais est roll over) et l'avant plage dépourvue de matériel, comme le profil concave font que les houles sont de plus en plus souvent perpendiculaires. Au fur et à mesure que la barrière recule, elle s'enfonce dans la baie qui l'abrite et devient swash aligned. C'est aussi une forme en équilibre. Elle dissipe l'énergie qu'elle reçoit des houles en se déplaçant, sans croître en hauteur ni en longueur, mais en se tassant de plus en plus dans la baie, qui, souvent, est de plus en plus étroite au fur et à mesure que la barrière y remonte. L'équilibre est obtenu en dissipant l'énergie et en concentrant la sédiment dans l'espace.

Les deux configurations (pour caricaturer : la flèche barrant l'extérieur d'une baie, type poulier du Hourdel -rive sud de la Somme- et la flèche de fond de baie - type Biscay Bay à Terre Neuve- ) sont les deux attracteurs étranges entre lesquels le comportement de la barrière évolue. L'espace physique qu'il faut parcourir pour aller de l'un à l'autre est "accommodation space". Cet espace, librement parcouru pour que la forme existe est donc soustrait (interdit à) tout autre usage...!!! Orford écrit :

"In gravel barrier systems, stability may therefore manifest itself via one or two attractors (stationary or roll over type), between which the system may switch in a cusp catastrophe mode".

Il est très clair que, entre les deux attracteurs, la catastrophe est possible. Mieux vaut n'y rien construire!!! Une flèche comme le Sillon du Talbert est exactement l'exemple d'une forme "drift aligned" qui devient sous alimentée en sédiment et qui pourrait devenir "swash aligned" (d'excellents projets d'aménagements, par C.Yoni vont dans ce sens). Il est stupide d'espérer y bâtir quoi que ce soit de durable.

Il peut, en plus, arriver que les conditions limites soient franchies et que la forme sorte des configurations stables...

### 3) sortie d'équilibre et catastrophe

Si un grand déficit en sédiment, de fortes tempêtes répétées, s'accompagnent d'une montée du niveau marin rapide... il est très probable que la barrière sera brisée en plusieurs unités distinctes qui n'arriveront plus à se réunir, faute de sédiment suffisant pour boucher les trous. (c'est ce qu'on craint au Talbert).



Figure 27 : Le Talbert, il y a longtemps (je n'ai pas la date exacte de la carte.)

Il faut alors tenter de comprendre où ces fragments de sédiment iront. Ils vont se former en bancs distincts, éparpillés dans la baie. C'est le "breakdown domain" de Orford.

Si la baie est relativement fermée, on arrivera probablement, à la longue à une forme de mi-baie, ou de fond de baie qui reconstituera la barrière. Si la baie est ouverte le sédiment peut en sortir et être perdu pour ce système.

La résilience serait, dans ce cas, la capacité d'une forme à repousser toujours vers plus d'extrêmes les conditions limites. Ce serait sa capacité à résister à des événements toujours plus extrêmes...C'est un concept scientifique en cours d'élaboration....

### 4) évolution : une modélisation prospective

Dans l'article Orford fait appel à un modèle numérique de comportement. Les croquis ci dessous en sont une interprétation qualitative (personnelle, mais faite en accord avec l'auteur, qui a bien voulu en discuter longuement).

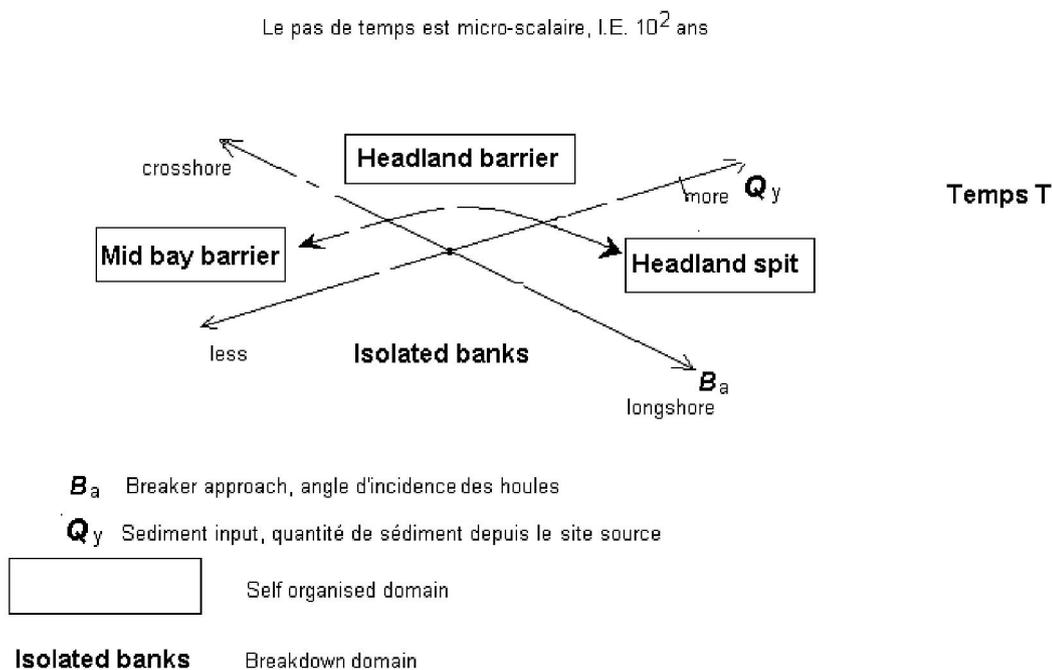


Figure 28 : Interprétation du comportement des barrières selon un diagramme des phases, quantité de matière/ quantité d'énergie

Ce croquis montre que le comportement de la barrière de galets est, schématiquement, dépendant du croisement de deux contrôles, l'un portant sur la quantité de sédiment ( $Q_y$ ) et l'autre sur l'obliquité des houles ( $B_a$ ). Selon les relations que ces deux contrôles ont l'un avec l'autre, différentes morphologies sont observées. Ce qui a été défini comme chaotique (self organisez critically) est la variation entre la flèche à pointe libre barrant la baie et la barrière de mi- (ou de fond) de baie. Entre les deux peut exister une barrière en début de baie... Ce qui est une mise en cause de la forme (breakdown domain) est sa rupture en bancs distincts. Tout ceci fonctionne sur un pas de temps séculaire et est forcé par le rythme des fortes tempêtes.

Le croquis qui suit (figure 29) est une extension dans le temps plus long du mécanisme précédent. Le pas de temps est alors de l'ordre du millénaire et un des forçages principaux devient alors le mouvement relatif du plan d'eau -RSL en anglais- (le niveau marin relatif). Ce pas de temps est exprimé en  $T$  et  $T+n$ . Si une forme (headland spit) reste identique à elle même, il y a stabilité (c'est un cas d'application de la règle de Bruun). Ce cas, classique n'est pas représenté sur le croquis.

Ce qui est représenté c'est le cas où une forme détruite passe du breakdown domain au self organized domain, avec une flèche en trait plein. Il y a lors retour à une forme de stabilité, ce qui, analysé au pas de temps millénaire revient à dire que l'instabilité est séculaire et la stabilité millénaire. Il y a auto organisation critique sur 1000 ans et plus. Orford donne plusieurs exemples de telles situations, dans les quelles le RSL fabrique de la stabilité.

Le croquis montre aussi des cas où l'on passe de domaine auto organisé au domaine breakdown. Au pas de temps millénaire il y a instabilité : le RSL a fabriqué de l'instable, ce dont Orford donne aussi des exemples (ce doit être le cas du Talbert en France). Cependant, sur un pas de temps court ceci

n'exclu pas des comportements auto organisé et stables. Dans le cas du Talbert, ça peut valoir le coup de réfléchir à des aménagements sur 50/ 100ans.

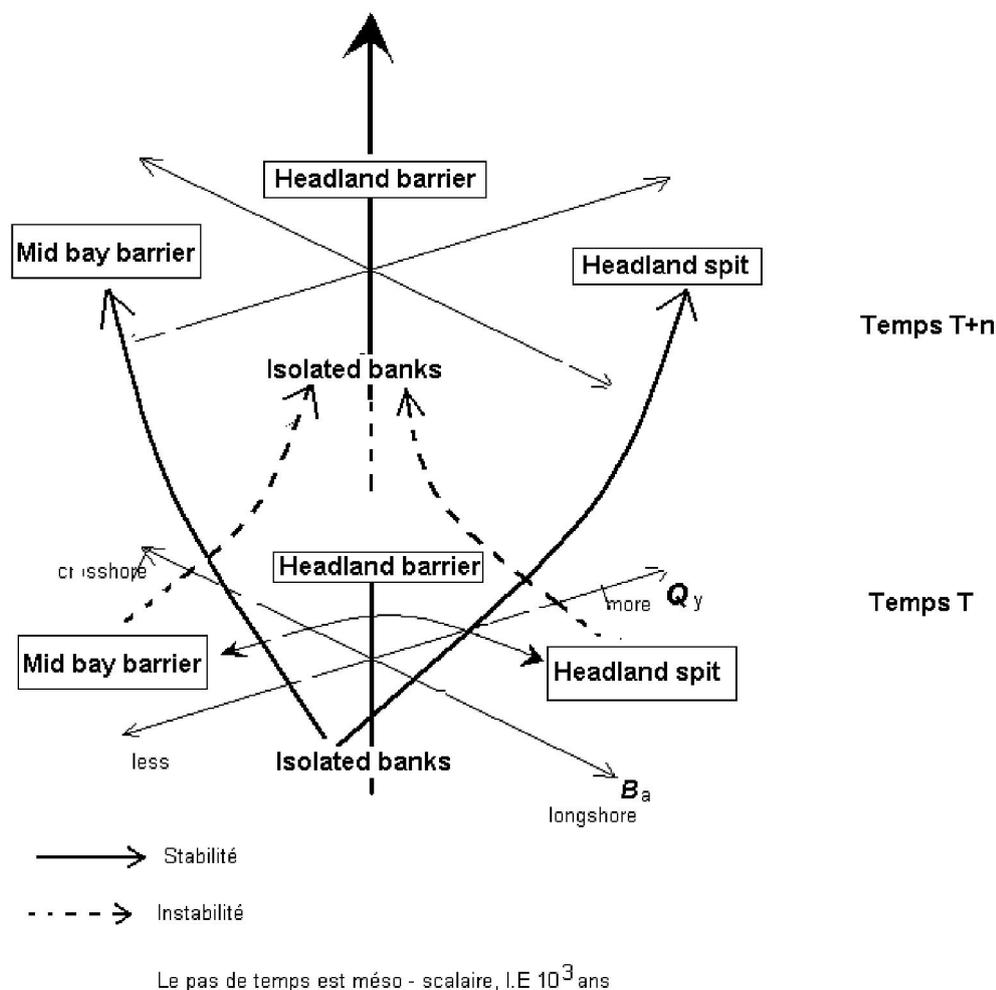


Figure 29 : Interprétation du comportement des barrières selon un diagramme des phases, quantité de matière/ quantité d'énergie, avec évolution sur un pas de temps millénaire (forcing).

### 5) Généralisation du modèle.

Il est possible de construire un modèle qui généralise les analyses faites ci-dessus. C'est ce que J.Musereau (et moi) avons fait et en partie publié. Voici un extrait de ce travail qui doit être considéré comme une ébauche.

Il repose sur la combinaison de facteurs majeurs qui jouent sur la morphodynamique côtière. En effet, les conditions dynamiques ne constituent pas l'unique explication d'une évolution observée. Trois forçages apparaissent comme essentiels. Ils concernent une forme littorale quelconque : son budget sédimentaire **Q**, l'espace disponible pour qu'elle puisse évoluer (ou « Accommodation Space ») **A** et le forçage (ou quantité d'énergie) **E** auquel elle est soumise. L'objectif est décrire l'évolution de la dynamique morphologique en fonction du jeu de ces trois forçages afin de prévoir les possibles comportements. Pour cela, les niveaux respectifs de chacun des trois forçages sont calculés, puis combinés.

Sur une durée donnée, les valeurs de Q, A et E sont exprimées à l'aide d'un indice sans unité traduisant un budget : pour les deux premiers entre l'instant t1 et l'instant t2 (début et fin de période) et pour E, par rapport à une moyenne (conditions standard, norme climatique trentenaire). Cela revient à savoir si il y a suffisamment (ou trop) d'apport de sédiments, d'espace disponible ou d'apport d'énergie par rapport à un niveau global qui serait synonyme d'une sorte de stabilité (relative immobilité) de la forme littorale. En fonction des combinaisons obtenues, différents résultats sont attendus (Fig. 10).

#### Budget sédimentaire (Q)

Q est calculé grâce à un ratio (Eq. 2) entre le volume Vt1 (m<sup>3</sup>) de la forme calculé à l'instant t1 et son volume Vt2 (m<sup>3</sup>) à l'instant t2 auquel on ajoute le bilan des entrées et sorties sur l'ensemble de la période vt' :

$$(2) Q = (Vt2 + vt')/Vt1$$

Si Q est de 1, cela signifie que le budget sédimentaire est équilibré, Vt2 = Vt1 et vt' = 0 (le bilan des gains et des pertes est nul). Une valeur supérieure correspond à des gains nets. A l'inverse, une valeur inférieure à 1 signifie qu'il y a un déficit sédimentaire qui s'est créé. Suivant la durée choisie, ce déficit peut être le résultat de conditions événementielles (sur une date particulière : extractions, intense « downwelling ») ou bien une tendance lourde (sur plusieurs années : blocage en amont, diminution des ressources).

#### Espace disponible (A)

D'une manière générale, la surface disponible S (Eq. 3) peut être définie comme le rapport entre la surface s (m<sup>2</sup>) physiquement disponible et la surface s' (m<sup>2</sup>) dont la forme aurait théoriquement besoin avec :

$$(3) S = s/s'$$

Quand S (m<sup>2</sup>) est supérieur à 1, la forme a la possibilité de migrer ou de s'étendre (« over washing », progradation...). Avec S égale à 1, la forme occuperait exactement tout l'espace disponible. En deçà, de nouveaux apports de sédiments engendrent une croissance verticale (« climbing », « overtopping »). L'évolution (estimation d'un budget) de l'espace disponible A (Eq. 4) dépend aussi du comportement de la forme qui peut connaître un « over washing », c'est-à-dire un déplacement latéral, accompagné ou non de croissance verticale. A l'aide d'une formulation du même type que dans (2), le « budget d'espace » s'obtient par un ratio entre les valeurs de S en t1 et t2 :

$$(4) A = (St2 + st')/St1$$

Ici, st' (en mètres) correspond à la distance sur laquelle la forme a (éventuellement) migré entre t1 et t2. Théoriquement, si A est de 1, la forme a gardé la même position puisque St1 = St2 et que st' = 0. Si A est inférieur à 1, l'espace disponible s'est réduit entre t1 et t2 (les causes sont multiples : la forme s'est élargie, un glissement de terrain lui barre la route...). Pour une valeur de A supérieure à 1, l'espace disponible est plus important qu'au début (réduction ou concentration de la forme, migration vers un territoire plus vaste...).

#### Apport d'énergie (E) (ce point est encore mal formalisé)

Ce forçage, qui reprend la partie validée du modèle local à l'identique (Eq. 5) est calculé par le ratio entre son niveau moyen at' (valeur moyenne de entre t1 et t2) et celui des conditions standard M sur la zone (norme climatique des 30 dernières années, calculée comme dans le modèle local). Au niveau d'apport d'énergie relevé sur le site est ajoutée une valeur variable x éventuellement présente, représentant un événement possible d'intensité extrême dont l'origine n'est pas nécessairement climatique, du type tsunami par exemple.

$$(5) E = (at' + x)/M$$

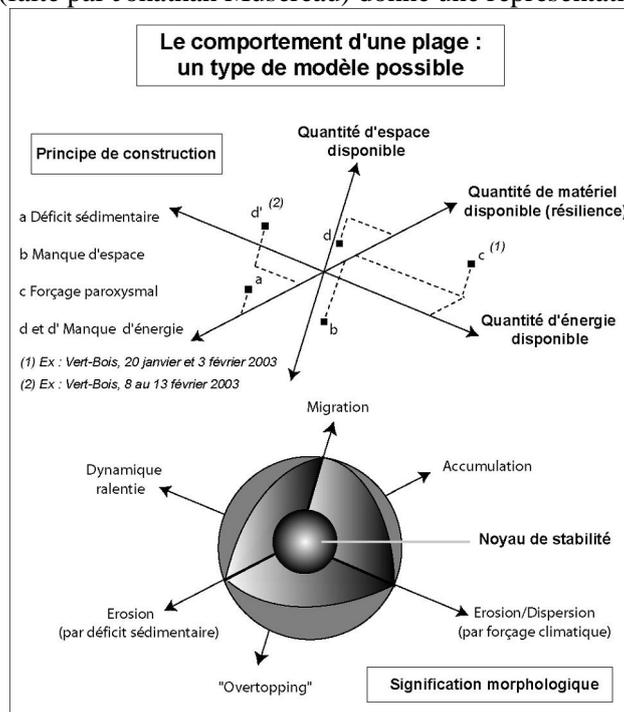
Dans le cas où  $E$  serait égal à un, les conditions seraient idéales pour que la forme reste dans un état relativement stable, c'est-à-dire avec un comportement relativement immobile et avec peu de changements de forme. Il faut, bien sûr que les autres forçages soient également d'un niveau satisfaisant (voir cas a et b, plus bas). L'apport d'énergie est insuffisant si  $E < 1$ , et cela se traduit par exemple par un ralentissement du transport des sédiments. Il est excédentaire si  $E > 1$ , ce qui sous-entend une dynamique plus intense qu'en temps normal et une probable transformation de la forme par reconfiguration, dispersion ou perte (sortie de la cellule sédimentaire) du matériel.

Sur la figure 10, des cas extrêmes ont été choisis pour rendre compte du rôle respectif de chacune des trois sources majeures de changement et les comportements qui en résultent :

- Cas (a), déficit sédimentaire : bien que l'espace disponible soit important et que la quantité d'énergie à laquelle la forme est soumise soit limitée, le déficit est tel qu'il y a perte de matériel, donc érosion.
- Cas (b), manque d'espace : faute de place suffisante mais bénéficiant toujours d'un apport en sédiment, la forme ne peut que croître verticalement.
- Cas (c), événement climatique extrême : le forçage ( $E$ ) est exceptionnel, la forme ne peut lui résister, elle est détruite.

-Cas d et d', manque d'énergie : le rythme d'évolution est considérablement ralenti. Il n'est plus régi que par la source sédimentaire et le potentiel d'occupation. On obtient : en d, une mince accumulation verticale ; en d', une légère migration de la forme dont le volume évolue peu.

La figure 30 ci-dessous (faite par Jonathan Musereau) donne une représentation schématique.



#### Bibliographie :

Orford J.D., Forbes D.L., Jennings S.C. , 2002 : Organisation controls, typologies and time scale of paraglacial gravel-dominated coastal systems. *Geomorphology*, 48 : 51-85.

Southgate H et al, 2003 : Analysis of field data of coastal morphological evolution over yearly and decadal timescales. Part 2 : Non linear techniques. *J. Coast. Res.*, 19, 4 : 776-789.

Trudgill S., Roy A., 2003 : *Contemporary meanings in Physical Geography*. Arnold : 1-292.

## Séance 11 : Système, changement et stratégie : des exemples et de drôles d'oiseaux.

*Ce cours présente d'abord les stratégies de nidification d'un certain nombre d'oiseaux marins, puis propose des modélisations. L'enjeu est d'introduire la notion d'intentionnalité dans le fonctionnement d'un système, et de tenter de comprendre comment cette « intentionnalité » peut mener à des états stables ou instables. Ce cours reprend une partie d'un chapitre que j'ai écrit pour l'ouvrage « le changement », dirigé par M. Tabeaud, qui doit sortir fin 2008 aux Presses de la Sorbonne*

1) Quelques oiseaux et leurs stratégies de nidification, aux Iles Falkland.

L'archipel des Falkland se situe par 51° sud x 60° ouest au large de l'Amérique du Sud dans l'Atlantique. Il occupe 12 000 km<sup>2</sup> et compte 780 îles dont deux principales (East et West Falkland) qui dépassent 5000 km<sup>2</sup> (figure 31) et une douzaine 20 km<sup>2</sup>. Il existe un très grand nombre d'îlots.

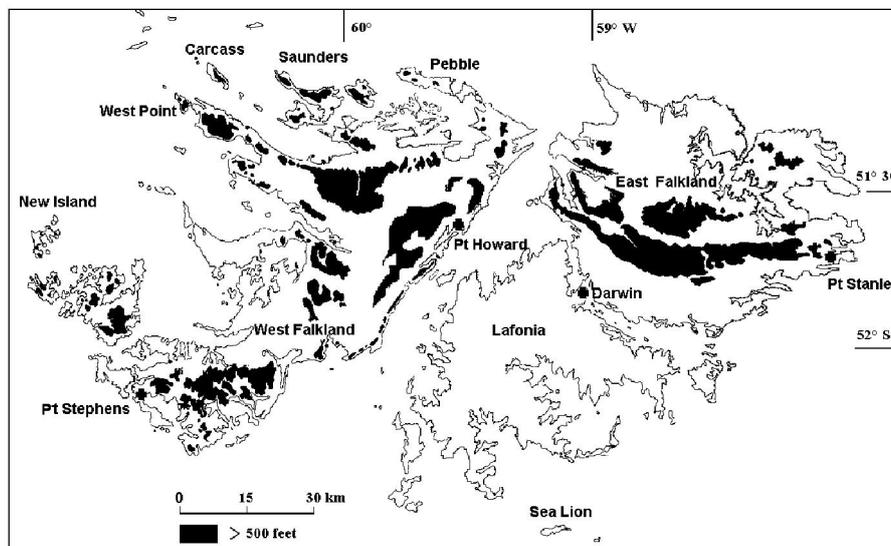


Figure 31 : Archipel des Falklands

L'histoire climatique (Wilson, 2000) et la stabilité tectonique récentes expliquent la répartition des principales formes littorales d'accumulation sédimentaire comme les flèches, tombolos et barrières. Au cours du dernier glaciaire les îles n'ont pas été englacées mais ont connu des conditions périglaciaires extrêmement ventées et sèches qui ont laissé (Wilson et al, 2002) sur les versants différents dépôts remarquables, tels les « stone runs » décrits par Darwin et interprétés aujourd'hui comme des glaciers rocheux fossiles. Du point de vue de la géomorphologie littorale cet intermède glaciaire est fondamental : l'ensemble des versant est recouvert de sédiment éolien très fin et, à la base des crêtes appalachiens, de vastes quantités de matériel grossier (gélifracté) sont disponibles. Lorsque, vers 4 ou 3 Ka BP le niveau marin atteint des niveaux proches de l'actuel, les agents dynamiques marins se trouvent dans un milieu très riche en sédiment et des formes d'accumulation se développent. Vu la découpe forte de la côte, les houles dominantes d'Ouest sont localement réfractées selon des directions qui varient du plein Nord au plein Sud. Les vents secondaires d'Est ou de Nord-Est, associés à l'anticyclone de St Hélène génèrent un fetch local d'Est. Il y a donc plusieurs directions de

dérive littorale et de très nombreux îlots ont été rattachés à la terre par des tombolos, souvent doubles, ou triples. Bon nombre de baies ont été fermées par des barrières.

La variété des milieux littoraux, la richesse des eaux marines proches de la convergence antarctique, la faible (et récente) présence humaine font que cet archipel est occupé par de très nombreux oiseaux marins nicheurs. 2900 habitants (et deux fois plus de touristes annuels) partagent 12 000 km<sup>2</sup> avec un peu plus de 740 000 pingouins, 350 000 albatros, 110 000 cormorans, 100 000 oies, 55 000 canards, 50 000 pétrels, 46 000 Laridés et quelques 40 000 Charadriés. Il y a aussi quelques 5000 rapaces dont (environ) 2000 vautours.

Pour les oiseaux nicheurs, les conditions locales de distance à la mer, de pente (drainage) et d'exposition (par rapport au vent) sont déterminantes dans le choix des sites de nidification. L'anthropisation récente, limitée en surface mais ayant entraîné des effets collatéraux importants vient se superposer à ces déterminismes physiques.

Les besoins des oiseaux marins nicheurs des Falkland sont extrêmement variés.

Ils ont en commun de tous nicher à terre, (ou dans des buissons bas) car il n'y a pas d'arbres (indigènes) et, de plus la température au ras du sol est légèrement plus élevée qu'en « altitude ». On peut mesurer 23° au sol en Janvier 2006 alors que l'air n'est qu'à 12°. Sur l'année la température moyenne est de 9°, avec 2° en juillet et 12° en février. Il tombe 600mm par an. Le trait le plus important du climat est le vent avec plus de 300 jours par an avec des rafales supérieures à 30 kn (55 km/h environ). Ce vent entraîne une relative sécheresse et implique un très fort brassage des plus basses couches de l'atmosphère. Ainsi, entre le niveau de la mer et les sommets qui culminent vers 750 ou 1000 pieds, il n'y a pas d'étagement et on trouve les mêmes végétaux, les mêmes insectes sur la totalité des versants (Jones, 2004). Les différences entre les formations végétales (tourbières, pelouses hautes ou basses, toundra, classées de la plus humide à la plus sèche) sont liées à l'humidité du sol, pas à l'altitude.

Bon nombre d'espèces nichent en groupe. Certaines d'entre elles, comme les *Spheniscus magellanicus* (pingouins localement appelés Jackass) ou les *Garrodia nereis* (pétrels tempête) creusent des terriers et ont besoin d'une épaisseur de terre, ou de tourbe, meuble et sèche. Elles recherchent des versants bien drainés, sans solifluxion et proches de la mer. L'exposition au vent est peu importante (les pingouins ne volant pas), mais l'exposition au soleil (donc au Nord) est essentielle : elle aide à assécher le sol. D'autres espèces construisent des nids avec un mélange d'herbes, de guano, d'algues et de terre. Le nid a la forme d'une petite colonne de 0,2m de haut et 0,3 m de diamètre. Il est toujours situé sur une pelouse parce que leur envergure (2,6m pour les Albatros, *Diomedea melanophris*) exclue totalement qu'ils s'approchent d'une aire d'atterrissage qui comporterait des obstacles. Ils choisissent des pentes herbues (*Poa flabellata* le plus souvent) sur des falaises raides, exposés aux vents les plus forts afin de pouvoir plus facilement s'envoler. Ils réoccupent les mêmes sites et les mêmes nids chaque année.

Des cormorans (*Phalacrocorax magellanicus*) recherchent des corniches rocheuses sous un surplomb, pour que leurs nids soient cachés et inaccessibles aux prédateurs d'envergure. D'autres pingouins (Gentoos ou *Pygoscelis papua*) construisent des nids avec des fragments ligneux et sélectionnent des toundras proches de la mer (*Empetrum rubrum* étant l'espèce dominante) dans les quelles ils trouvent leur matériel de construction. Ils nichent en vastes groupes et comptent sur leur nombre pour écarter un prédateur. Leurs colonies varient entre 200 et 1000 couples et occupent de 1 à 5 ha. Après la nidification, la végétation est détruite et le sol tellement chargée en guano qu'il faut attendre 4 à 5 ans pour que la toundra s'y reconstitue. Ces pingouins changent de site chaque année. Des pingouins très particuliers (et les plus nombreux sur l'archipel puisqu'ils sont environ 450 000, les Eudyptes chrysocome ou Rockhoppers) nichent exclusivement au sommet de falaises rocheuses élevées, qu'ils

gravissent depuis la mer par bonds de 0,5 à 1m de haut. Ils occupent donc exclusivement des sommets de falaises dont le versant est constitué de strates décimétriques et sub horizontales de grès (ou quartzite) qui rend leur mode de déplacement et d'ascension possible. Ils occupent les mêmes sites chaque année.

Certains oiseaux s'associent comme les Albatros et les Rockhoppers. Ces Rockhoppers ont pour nid une dépression creusée dans le sol, de 12 à 12 cm de diamètre et 3 à 4 cm de profondeur. Lorsqu'ils occupent un site, leur activité de creusement rend disponible une grande quantité de terre, que les Albatros recyclent dans leurs propres colonnes avec un moindre effort. Sans concurrence alimentaire entre les deux espèces, il n'y a pas de difficulté de cohabitation. Les laridés (*Larus scoresbii* et *Larus dominicanus*) forment des colonies de plusieurs centaines de couples mais s'installent aussi bien sur du sable que sur des galets, ou de la végétation. Seules les sternes (*Sterna hirundinacea*) exigent des galets.

D'autres espèces nichent en couples isolés. Les oies (*Chloephaga picta*, *rubidiceps* ou *hybrida*) ont besoin d'une toundra ou d'une pelouse haute qui dissimule leurs petits aux prédateurs. Il faut aussi que le nid soit à proximité d'une mare ou d'un lac, ou pour *Chloephaga hybrida*, de la mer. La plupart des canards sont dans le même cas. Pour ces oiseaux le site idéal est la prairie de *Poa flabellata* : il s'agit d'une herbe qui pousse en touffe haute de 1 à 3m et qui vit plus de 300ans. Les souches occupent 0,3 m<sup>2</sup> et sont distantes de 0,6 à 1m. Elles forment une couverture végétale très dense et finissent par prendre la forme d'un piédestal dans le quel on peut creuser un terrier. Leurs longues pousses annuelles forment comme une canopée, qui isole le sol du vent, de la pluie et le dissimule aux prédateurs. Ce type de pelouse haute (Tussok grass) est un milieu très tempéré par rapport aux autres formations végétales. Il est très recherché par l'avifaune mais il n'est accessible que par des oiseaux d'envergure faible (charadriidés, passereaux), ou bons marcheurs (pingouins, oies). Il est impossible à utiliser pour les albatros ou les pétrels géants.

Les rapaces (*Falco*, *Buteo* et *Phalcoboenus*) nichent en général sur des pentes rocheuses, exposées au nord de préférence. Les vautours, curieusement, nichent au sommet des touffes de *Poa flabellata*. Les skuas (*Catharacta*) nichent sur des pelouses basses sur substrat bien drainé, c'est-à-dire sableux.

Les exigences propres aux différentes espèces doivent être croisées avec les ressources disponibles, c'est-à-dire avec la répartition des sites potentiellement occupables. A l'échelle de l'archipel les oiseaux nichent d'abord dans les îles qui n'ont pas été atteintes par des rats et des chats. Ce sont les îles les plus extérieures, les plus éloignées des « settlements » qui abritent les plus importantes colonies d'oiseaux. A l'échelle d'une île, les oiseaux nichent sur des géo systèmes précis. La figure 32, qui décrit l'île SeaLion expose quel strict déterminisme lie les oiseaux et la couverture végétale.

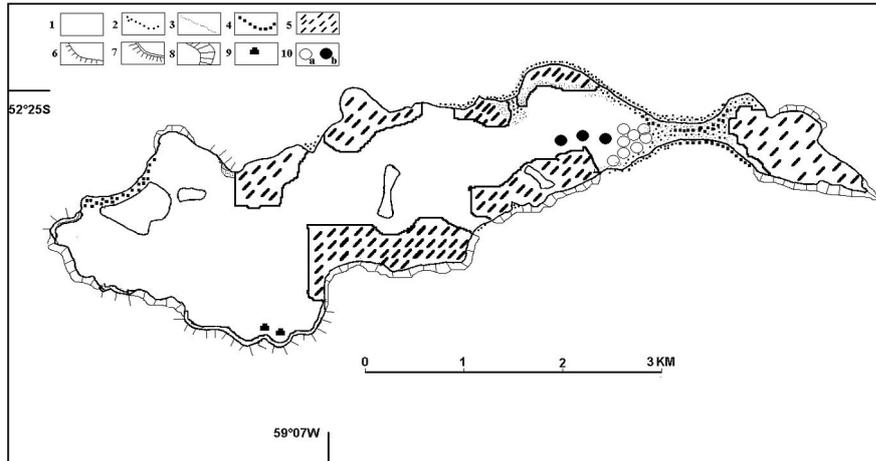


Figure 32 : Ile de Sea Lion. 1 : Toundra et tourbières, occupées principalement par des oies (*Chloephaga picta* et *rubidiceps*). 2 : Plages de sables marins, localisant quelques nids de Laridés (*Larus scoresbii*). 3 : Sables éoliens avec terriers de *Sphéniscus magellanicus*, et nids de Charadriidés (*Charadrius falklandicus*). Localement, présence de pétrel géants (*Macronectes giganteus*). 4 : Plage de galets (et plages de tempêtes) avec nids de sternes (*Sterna hirundinacea*). 5 : Pelouse de *Poa flabellata* avec de nombreuses espèces (*Spheniscus magellanicus*, passereaux, oies). 6 : falaise basse (inf 10m) avec *Phalacrocorax magellanicus*. 7 : Falaise haute, avec au sommet *Eudyptes chrisocome*, *Phalacrocorax albiventer*, et, sur le versant des rapaces tels que *Phalcobuenus australis*. 8 : Platier rocheux avec nids de *Chloephaga hybrida*, *Haematopus leucopodus*. 9: Colonie mêlant *Eudyptes chrysocome* et *Phalacrocorax albiventer* en 2006. 10 : Colonies abandonnées (a) ou occupées (b) de *Pygoscelis papua*.

A l'échelle locale (quelques dizaines de mètres) les oiseaux nichent en fonction du substrat et du vent local. Cette échelle est l'une des plus importante. C'est celle de l'ornithologie de terrain. Où aller pour observer, baguer, tel oiseau ? Quel site préserver, ou enclorre afin d'éviter un dérangement ? Quelle surface est nécessaire pour quelle population ? Un questionnement très géomorphologique est aussi posé à cette échelle : quelle dégradation la colonie nicheuse fait-elle subir à la surface qu'elle occupe, quelle est la vitesse de cicatrisation et quelle surface doit être disponible pour les années prochaines en attendant qu'un site initial puisse être réoccupé ? Du point de vue des oiseaux (si l'on se met, méthodologiquement à leur place), la question se pose autrement : quelle stratégie employer pour dénicher l'emplacement optimal ? Comment permettre à la colonie de croître ?

Il est donc important de comprendre en quoi ces stratégies permettent aux populations d'oiseaux d'utiliser au mieux l'espace littoral pour se développer. Des comptages réalisés depuis les années 90 par les responsables locaux de la protection (Falkland Conservation Monitoring Group, Woods et Woods, 1997; Stange, 1992) font état d'une diminution régulière du nombre des Gentoos (près de 3% en moins par an), alors que les effectifs de Jackass varient considérablement d'une île à l'autre que les Rockhoppers croissent régulièrement. Une partie de ces fluctuations vient des variations de la nourriture disponible, mais ces trois espèces ont à peu près les mêmes exigences alimentaires (10% de leurs proies seulement sont des poissons et mollusques commercialement pêchées) et ne réagissent pas semblablement aux fluctuations du stock alimentaire. Une partie de l'explication est trouvée dans les variations de l'espace disponible pour mener à bien la nidification.

Lorsqu'ils cherchent un nouvel emplacement pour leur colonie, les Gentoos parcourent un espace considérable et s'aventurent jusqu'à 3 km dans les terres. Ils ne s'installent sur un emplacement que s'ils n'ont pas été dérangés durant toutes leurs explorations. Cela implique que la place nécessaire est, en fait largement plus vaste que celle qui est effectivement utilisée : les pérégrinations ont pour but de s'assurer qu'il n'y a pas de dérangements dans un périmètre vaste autour de la colonie. Sur certaines îles, les colonies de Gentoos disposent de l'espace nécessaire pour changer chaque année de site. L'île de Pebble compte quatre habitants au moment où les Gentoos recherchent leur nouvel emplacement. Sur d'autres (Sea Lion en particulier, mais aussi West Falkland) qui sont des lieux plus humanisés les Gentoos souffrent considérablement de dérangements durant leur explorations et s'installent chaque année sur des espaces plus petits que les précédents, à l'intérieur d'un périmètre restreint. Les Rockhoppers occupent les mêmes sites chaque année et n'ont pas de stratégie d'exploration préalable. Ils peuvent plus facilement cohabiter avec des activités humaines voisines. Les Jackass semblent un cas à part puisque certaines colonies déclinent (sur les sites les plus fréquentés de East Falkland) mais que d'autres augmentent considérablement malgré la fréquentation, par exemple sur West Falkland. Il semble que, pour cette espèce, le régime alimentaire varie considérablement d'une colonie à l'autre et que la disponibilité en espace ne joue pas un très grand rôle en comparaison.

Une conclusion provisoire établit donc que pour chaque communauté nicheuse il faut une surface, une épaisseur de matière et des conditions aérologiques/climatiques spécifiques. Ces exigences ne sont pas toutes assurées chaque année en chaque lieu. Comment modéliser la relation changeante entre la disponibilité d'un espace et l'exigence d'une espèce nicheuse?

- 2) Quelques enjeux de modélisation (voir Power Point disque K)
- 3) Quelques photos d'oiseaux. (voir les PPT sur disque K !)



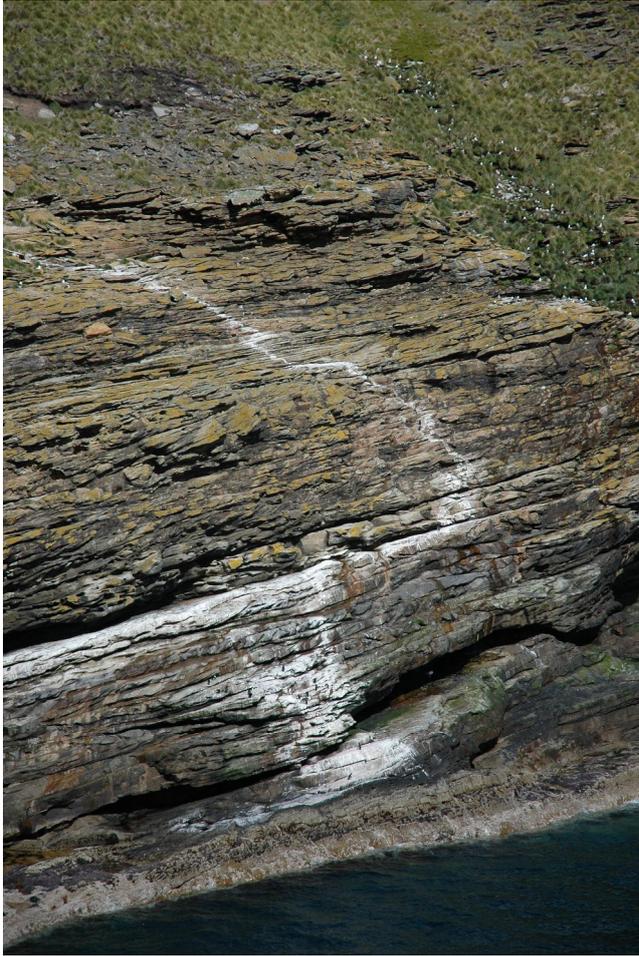
Aptenoides patagonica



*Eudyptes chrysolophus*



*Diomedea melanophris* avec petit, et vue de la colonie.



Eudyptes chrysocome (et le trajet pour atteindre leur colonie)

Bibliographie :

Kildaw D., Irons D., Nysewander D.R., Buck L., 2005 : Formation and growth of new sea-birds colonies : the significance of habitat quality. *Marine ornithology* 33 : 49-58.

Strange I. (1992) : *A field guide to the wildlife of the Falkland Islands and South Georgia*. London: Harper Collins, 188 pp.

Wilson P., Clark R., Birnie J. Moore D.M., (2002): Late Pleistocene and Holocene landscape evolution and environmental change in the Lake Sullivan area, Falklands Islands, South Atlantic. *Quaternary Science Review*, 21, 1821-1840.

Wilson P., (2000) : Rate and nature of podzolisation in aeolian sands in the Falkland Islands. South Atlantic.

Woods, W., Woods A., (1997): *Atlas of Breeding Birds in the Falkland Islands*. Oswestry: Anthony Nelson, 190 pp.

## Séances 11 bis : Un enchaînement d'équilibre, ou de déséquilibres, l' « escalier sismique » .

Cette séance est organisée autour de travaux en cours et *n'est pas entièrement rédigée*. Elle a pour but de décrire un type particulier de système, qualifié de « earth system » ; et destiné à comprendre aussi bien les paysages « tectoniques » que culturels. L'interrogation finale porte sur le sens même des notions d'équilibre ou de déséquilibre.

L'idée principale est de mettre en relation les changements environnementaux constatés avec des forçages tectoniques, des forçages culturels et des événements « fortuits ». Les sites sur les quels ces enjeux sont les plus clairs sont les milieux « actifs » et un ouvrage pionnier (et remarquable) a été écrit en 1984 (sous la direction de J.Dufaure, et mentionné en biblio à la rubrique « Bousquet ») au sujet de la Méditerranée. Plus récemment une démarche similaire (mais différente sur certains points) a été entreprise en Nouvelle-Zélande. Une partie de ce cours provient d'un article écrit par des collègues et moi et publié dans un ouvrage dirigé par S. Etienne et R. Paris aux Presses Universitaires de Clermont Ferrand, en 2008. Des collègues allemands ont aussi travaillé sur ce thème. Les travaux francophones les plus récents sont ceux que vous pouvez trouver dans *Méditerranée*, numéro spécial dirigé par C Morhange.

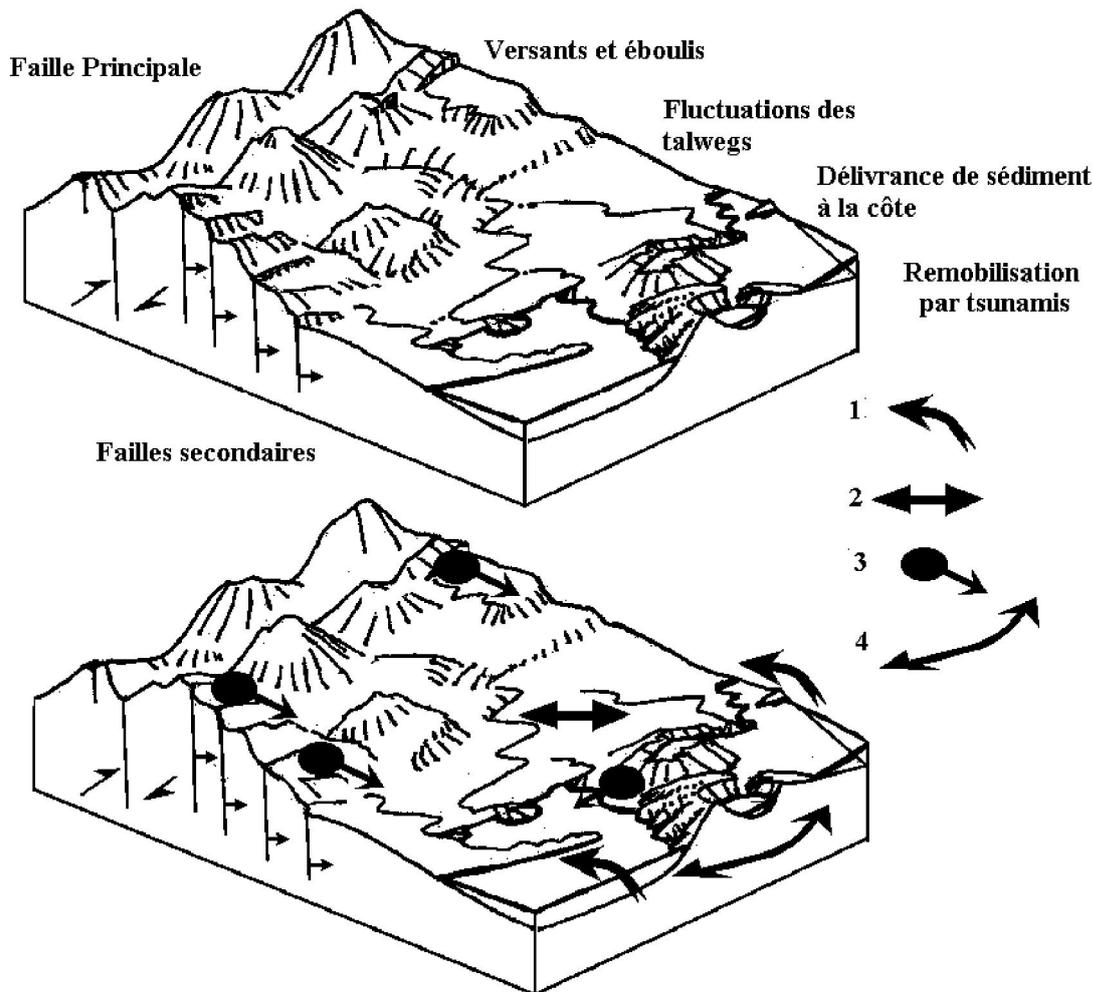
### 1) La notion d'escalier sismique (seismic staircase)

Le texte qui suit est tiré d'un article (Regnauld et al, 2008). En cours le commentaire est détaillé.

*« Ces auteurs (Mac Fagden et Goff) ont alors construit une approche plus élaborée, qu'ils ont dénommée « seismic staircase » et l'on pourrait proposer, très littéralement, le terme français d' « escalier sismique » pour le traduire. L'escalier sismique met en relation des événements étagés sur les versants, construit une logique pour le trajet des flux sédimentaires et contrôle le tout par une série de séismes qui fonctionne comme un déclencheur et entretient, un temps, le système avant de disparaître. C'est un modèle conceptuel qui élargit le concept plus ancien (Bousquet, 1984) de relief sismiquement assisté.*

*L'escalier sismique peut être décrit ainsi. A la base il faut une grande quantité de matériel mal consolidé sur des versants « jeunes ». Une grande partie du matériel émis durant les éruptions holocènes est sédimenté ainsi sur des versants qui ne sont pas directement liés à la mer. Par un ensemble de processus successifs et interdépendants, lors d'événements sismiques répétés, ce matériel est rapidement déplacé jusqu'à la côte et mobilisé pour la construction d'accumulations littorales. L'événement déclencheur est un séisme, survenu sur la faille alpine (vers 1450 ou 1460) avec une magnitude estimée à 8. Il a été suivi de « répliques ? » ou de séismes associés sur la faille de Wellington, sur la Hope Fault, c'est-à-dire sur les failles sub parallèles qui prolongent au nord la faille alpine avant qu'elle ne rejoigne la subduction de la fosse Hikurangi. Les magnitudes estimées sont voisines de 7. Ces séismes provoquent des glissements de terrains, d'ampleur variable. Le matériel glissé est alors rapidement évacué par des rivières et des fleuves dont la charge sédimentaire est, alors, si forte qu'ils construisent leur lit et changent parfois de cours, par débordement. Il en résulte que les sédiments en suspension dans l'eau fluviale sont délivrés à la côte en des sites changeants. A proximité de Christchurch l'estuaire de la Waimakariri a ainsi balayé, du nord*

*au sud, une portion de côte de 12 km de long entre 700 et 450 BP (non calibré) (Mc Fagden et Goff, 2005).*



*Figure 32 : schéma de principe du mécanisme de l'escalier sismique, à partir des travaux de Mc Fagden et Goff. 1 : tsunamis ; 2 : changement de talweg ; 3 : glissement (ou autre) ; 4 : redistribution par la dérive littorale.*

*La logique spatiale du tracé du cours de fleuve et de l'emplacement de son embouchure est une logique gravitaire. Le fleuve prend, en général, la ligne de plus grande pente, et la topographie est, localement, remise en cause à chaque séisme.*

*Cette logique n'est pas celle de l'hydrodynamisme marin. Le sédiment fluvial peut très bien être délivré en mer sur une portion de côte fortement soumise à la dérive littorale et être évacué latéralement. Il peut, inversement, être délivré en un site abrité, propice à la construction d'accumulations dunaires... Il semble que vers les années 1450 - 1460 (et suivantes), de vastes quantités de matériel aient ainsi été envoyées en mer par des embouchures nouvelles, exposées aux houles et déplacées par la dérive puis stockées dans la zone infra-tidale.*

*Pour cette raison (l'enrichissement relatif du péri littoral en matériel fin) les tsunamis qui sont survenus à cette époque (et sans doute celui qui était provoqué par l'effondrement de la*

*caldera de Healey) ont eu des impacts morphologiques originaux. Ils ont pu ramasser beaucoup de matériel en mer et le distribuer à la côte en quantité importante. Ce qui est le plus original dans ce système n'est pas seulement la suite logique de phénomènes qui déplacent le sédiment volcanique, mais c'est surtout la succession de quatre logiques spatiales distinctes. La première logique fixe la disponibilité de la source : le sédiment est rendu disponible par les éruptions et il est d'abord stocké à proximité des volcans. La deuxième logique est celle des écoulements fluviaux, dont les changements de cours résultent en des localisations d'embouchures nomades. La troisième logique est celle de l'hydrodynamisme marin (courants, dérive littorale...) qui détermine les lieux de stockage péri littoraux. La quatrième logique spatiale tient aux caractéristiques de l'onde de tsunami, qui est plus ou moins ample selon les résonances locales qu'elle génère avec la topographie. Au bout du compte le site puit (ultime) de la cellule sédimentaire est localisé selon un emboîtement de processus et de cheminements qui est hautement imprédictible. Le rôle des Maoris, dans cet enchaînement de processus est important car ils ont défriché par le feu de vastes surfaces, le plus souvent près de la côte. Cette pratique joue donc sur la délivrance du sédiment à partir du versant et sur la possibilité, pour le fleuve, de parcourir la plaine côtière. Les travaux en cours cherchent à établir des vitesses de déplacement et des quantités mobilisées à la suite des interventions Maories sur les territoires agricoles littoraux.*

- 2) Un commentaire de photo et une transposition en Méditerranée (accompagné de croquis au tableau, pas encore tous numérisés)



Figure 33 : Côte du Sud de la Crête, commentaire dans le texte et au tableau.

Cette photo est un montage (clichés pris en 2006) de photos du Sud de la Crête, à proximité de St Galina. On peut observer un versant (compliqué) qui descend vers le Sud et la mer. Plus en détail, le versant descend vers des vallées qui convergent et se jettent dans la mer au travers d'une étroite gorge. Entre les vallées et la mer il y a une contre pente qui mène à un plateau, lui même disséqué par des vallées suspendues. Il y a « visiblement » plusieurs géométries de pentes et d'écoulement.

La sortie de la vallée est exactement à St Galina. La photo suivante en présente le matériel et l'aménagement actuel.



Figure 34 : Littoral de St Galina, falaise taillée dans des conglomérats.

De quel matériel s'agit-il, pourquoi est-il là et quelles sont ses qualités mécaniques ?

3) Des points à développer : quelle pertinence y a-t-il à raisonner avec un couple stable/instable ?

Cette partie n'est pas écrite : elle vise simplement à interroger la mise en relation des échelles de durées et des échelles de distance pour définir (ou pas) un espace assez stable pour qu'on puisse l'aménager durablement.

La question de fond est celle de la relation entre développement dit durable et fonctionnement des systèmes géomorphologiques.

#### Bibliographie :

Bousquet B., 1984 : Nature, répartition et histoire du risque sismique dans l'aire méditerranéenne, in *La mobilité des paysages méditerranéens* (ouvrage collectif) R.G.P.S.O., Toulouse : 278-301.

Goff J.R., McFadgen B.G., 2002 : Seismic driving of nationwide changes in geomorphology and prehistoric settlement - a 15<sup>th</sup> Century New Zealand example. *Quat. Sc. Rev.*, 21 : 2229-2236.

Goff, J.R., McFadgen, B.G., 2001 : Catastrophic seismic-related events and their impact on prehistoric human occupation in coastal New Zealand. *Antiquity*, 74, 155-162.

McFadgen B. G., Goff J. R., 2005 : An earth systems approach to understanding the tectonic and cultural landscapes of linked marine embayments : Avon-Heathcote Estuary (Ihutai) and Lake Ellesmere (Waihora), New Zealand. *J. Q. S.*, 20 (3) p. 227-237.

Regnauld H., J.R. Goff, S.L. Nichol, C. Chagué-Goff et Jean-Noël Proust, 2008: Littoraux et volcanisme en Nouvelle-Zélande : du forçage direct au contrôle en relais in Etienne S. et Paris

R.. éditeurs, « Les littoraux des îles volcaniques : une approche environnementale ». Presses Universitaires de Clermont Ferrand, p. 57-72 .

Regnauld H, Nichol S.L, Goff J.R., Fontugne M., 2004 : Maoris, middens and dune front accretion rate on the N E coast of New Zealand : resilience of a sedimentary system after a tsunami. *Géomorphologie*, 1 : 45-54.

## Séance 12 : Conclusion et questions. Evaluation du cours par les étudiants.

En conclusion du cours sur milieux stables et instables, en Master 1, je vous propose de lire et de commenter le texte suivant. Il est - très intentionnellement- en anglais parce que la réflexion professionnelle sur un sujet environnemental ne saurait se résumer à un dialogue franco français. *Eventually*, pour de futurs chercheurs, l'anglais est une langue naturelle de travail. (Cooper and Pilkey, 2004, voir biblio séance 8)

*"On the basis of a review of current practice in coastal science and engineering with regard to quantitative determinations of longshore drift, we conclude that coastal scientists and engineers have been trapped in an expected universe of longshore- transport sand volumes without critical assessment of assumptions made in pioneering studies. As a result, workers in this field have come to accept a range of sand volume and a range of techniques to measure or predict this volumes, stabilized by opinions of the leading experts. The short comings of previous studies and subsequent practice, however, indicate that these transport volumes and techniques may well be wrong. Certainly at present we have no dependable, verifiable, and consistent field measure of net or gross instantaneous or annual longshore transport volume against which predictions can be compared.*

*Both field measurements and mathematical model results, especially as used for applied purposes and expressed in annual terms are suspects for a number of reasons. These include questionable assumptions that lag far behind our current understanding of shore face processes, "fudge factor" coefficient for equations, the lack of storm transport measurements, and a cascade of uncertainties that moderate current practice. Once determined, annual longshore transport sand volumes tend to be long-lived and in all cases are unverifiable by field measurement. More fundamentally, the question is raised whether an earth surface system as complex and variable as longshore transport on beaches can ever be quantitatively modeled or measured successfully. Qualitative mathematical modeling remains a valid approach to understanding the nature of sedimentary processes."*

Ce texte soulève plusieurs questions que le cours a tenté de présenter.

- 1)prédiction qualitative ou quantitative (*models*)
- 2)pratiques d'aménagement et connaissance du phénomène naturel (*expected or un expected universè*)
- 3) mesures in situ et tendances (*gross or net*)
- 4) système complexe et prédictabilité (*successfully*)
- 5)travail et mesures de terrain (*dependable*)

La dernière séance de cours consiste à interroger les étudiants sur ces enjeux qui sont également scientifiques et professionnels.



Figure 30 : Oeuvre de Richard Long : trace de blocs poussés sur une pente (Amérique du Sud) .