

L'ouragan chaotique : une remarquable utilisation de la thermodynamique par la nature

Dr. Michel Pluviose

www.hurricane-physics.com

*Professeur honoraire, chaire de Turbomachines, CNAM
Conservatoire National des Arts et Métiers
292, rue Saint-Martin, F 75141 Paris Cedex 03, France
chaire.turbomachines-moteurs@cnam.fr*

Résumé

Les cyclones tropicaux, qui se forment durant la saison chaude, agissent comme des soupapes libérant la chaleur accumulée sous les tropiques. Ces phénomènes naturels, que l'on appelle aussi ouragans ou typhons, consternent les populations et saccagent l'environnement.

Or, les soupapes de sécurité évacuent, elles aussi, de l'énergie et conduisent parfois à des accidents désastreux de portée souvent mondiale. Par exemple, la cause initiale de l'accident de Three Mile Island (TMI), le pire accident sur le sol des USA, est à rechercher dans le comportement d'une soupape. De récents développements en thermodynamique révèlent que les écoulements dans cet élément avaient pénétré profondément dans le domaine chaotique.

Un même processus physique pouvant produire des phénomènes similaires à des échelles extrêmement différentes, on est conduit à penser que le chaos serait susceptible de se manifester aussi lors de la formation d'un ouragan.

Il existe de nombreuses autres analogies entre les écoulements confinés dans les centrales thermiques et les phénomènes naturels à ciel ouvert analysés par les spécialistes des sciences de la terre et des océans. Les phénomènes, dans les deux cas, sont soumis aux lois de la thermodynamique hors équilibre.

À partir du domaine de l'énergétique, ce texte va tenter de montrer, en particulier, qu'une tempête tropicale, soumise à des contraintes trop importantes, peut effectivement pénétrer dans le chaos avant de devenir un cyclone tropical tant redouté, qui se débarrasse de sa puissance motrice en semant la désolation sur la terre des hommes.

Keywords : chaos, cyclone tropical, désordre, entropie, ordre, structure dissipative, thermodynamique

1. INTRODUCTION

La quantité d'énergie reçue du soleil n'est pas uniformément répartie sur la surface du globe terrestre. Il s'ensuit des déséquilibres qui forcent l'eau et l'air atmosphérique à se mettre en mouvement. Comme le notent les météorologues, l'élévation excessive de la température de surface des mers tropicales est la cause principale des agitations atmosphériques qui se produisent durant la saison chaude [1, 2, 3]. Ce sont les lois de la thermodynamique que la nature exploite pour construire ces phénomènes qui se développent sur les océans [4, 5].

La thermodynamique à l'équilibre basée essentiellement sur les travaux de Sadi Carnot et de Rudolph Clausius, qui en ont établi les fondements, sera d'abord survolée.

La thermodynamique linéaire qui concerne les phénomènes près de l'équilibre est rappelée brièvement ensuite. Les phénomènes de transport transfèrent surtout de la chaleur, de la matière et de la quantité de mouvement. Le transport le plus sollicité dans ce texte est la conduction thermique qui transfère de la chaleur, liée à l'agitation moléculaire, d'un endroit à un autre. On utilise des approximations linéaires dans ce domaine. Ces phénomènes de transport sont dissipatifs : l'entropie augmente [6]. Puisqu'ils concernent les agitations dans le monde moléculaire, les lois qui les gèrent sont celles de la mécanique statistique [7].

Quand la différence de température devient un peu plus grande entre deux endroits, les mouvements de fluide deviennent très complexes. Le processus de transport est alors extrêmement difficile à analyser en détail. L'écoulement laminaire devient assez brusquement turbulent [8]. C'est une manifestation de chaos faible.

En s'écartant de l'équilibre, on pénètre de plus en plus dans la thermodynamique non-linéaire où des structures ordonnées apparaissent après le passage par des zones parfois chaotiques. Les théoriciens du chaos, dont le chef de file fut Henri Poincaré, et plus récemment Ilya Prigogine, ont remué la physique en mettant en cause le déterminisme dans les lois du mouvement. Ces structures auto-organisées souvent visibles qui naissent loin de l'équilibre furent appelées structures dissipatives par Prigogine afin d'associer les deux notions d'ordre et de gaspillage [9]. Les rouleaux convectifs d'Henri Bénard en sont la démonstration la plus célèbre. Cette expérience de Bénard ouvre la voie, en particulier, aux cellules convectives de Hadley qui se développent autour du globe.

Très loin de l'équilibre, après passage par des bifurcations et des zones chaotiques, des structures beaucoup plus dynamiques et stables émergent : ce sont les ouragans. L'ordre dans la structure dissipative ouragan apparaît sous la forme d'un moteur thermique gigantesque qui utilise sa très forte puissance pour enfler démesurément. Cette puissance est issue de la libération de chaleur latente lors de la condensation de la vapeur d'eau en eau liquide [10, 11]. Ce monstre auto-organisé entrave la nécessaire dissipation d'énergie. L'ordre créé par la thermodynamique loin de l'équilibre devient alors néfaste pour le genre humain.

La thermodynamique hors équilibre produit des phénomènes scientifiquement remarquables, mais humainement redoutables dans deux applications apparemment très éloignées mais pourtant proches : les ouragans et les soupapes [12, 13, 14].

L'objet de ce texte est de tenter de rapprocher ces deux aspects d'un problème identique. Depuis l'énergétique, on émet un avis extérieur, sur la transformation d'une faible perturbation sur l'océan en un ouragan dévastateur. Les sciences, en particulier ici la météorologie et l'énergétique sont tellement imbriquées les unes dans les autres que l'énergétique doit à un météorologue : Edward Lorenz d'avoir mis en évidence une des premières manifestations du chaos dans l'atmosphère [15], avec son fameux effet papillon.

2. THERMODYNAMIQUE à l'ÉQUILIBRE : la MACHINE de CARNOT

Un moyen pour convertir le rayonnement solaire en énergie mécanique est d'utiliser un cycle thermodynamique (Figure 1) en recueillant l'énergie solaire par des capteurs à faible concentration pour alimenter la source chaude.

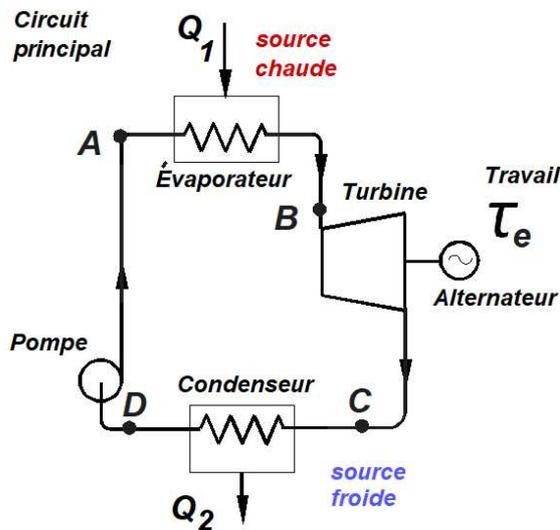


Figure 1 : Centrale thermique solaire

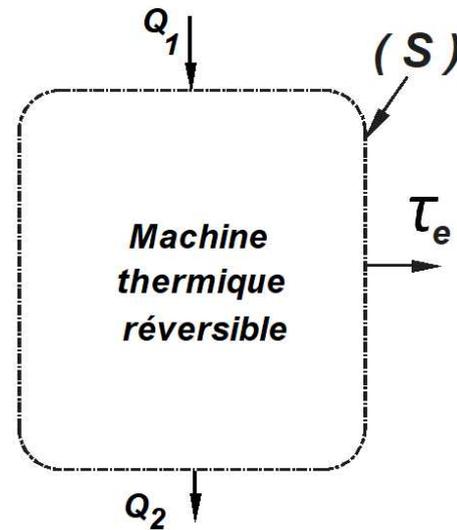


Figure 2 : Machine idéale de Carnot

Le circuit principal étanche est parcouru en circuit fermé par de l'eau (ou un fluide organique). À l'état liquide, le fluide est mis en pression par une pompe. Il change d'état dans l'évaporateur constituant la source chaude et se détend en phase gazeuse dans la turbine avant de se retrouver en phase liquide à la sortie du condenseur, source froide du cycle.

Un circuit primaire (non représenté), comprenant les capteurs solaires, apporte la chaleur nécessaire pour l'évaporation de l'eau du circuit principal. Un autre circuit évacue les calories de la source froide.

2.1. La Machine idéale de Carnot

Nicolas Sadi Carnot cherchait à percer le mystère de la conversion de chaleur en travail afin de mieux comprendre le fonctionnement des machines à vapeur de son époque.

Il eut l'idée géniale de supprimer par la pensée toutes les irréversibilités qui en gênaient la compréhension. Ses réflexions sont donc théoriques, néanmoins ses conclusions très générales sont utiles pour tout type de machine et pour tout fluide. La machine

de Carnot est une vue de l'esprit qui en fait cependant une machine de référence pour toutes les autres machines thermiques.

Avec Carnot, imaginons donc une machine parfaite, issue par exemple d'une centrale thermique solaire (Figure 1). Pour que le rendement de cette machine soit maximum, elle doit évidemment correspondre à la perfection. Il faut, en particulier, qu'il n'y ait aucun frottement mécanique car cela réduirait une partie du travail produit en chaleur. Les opérations doivent aussi être suffisamment lentes pour que les échanges thermiques puissent s'effectuer le plus efficacement possible.

Pour qu'une telle machine soit parfaite, elle ne doit être le siège que de transformations réversibles, lesquelles sont une suite continue d'états d'équilibre. En changeant infiniment peu les facteurs de l'équilibre, on peut les réaliser dans un sens ou dans le sens opposé. Puisque le cycle de la machine de Carnot néglige toute irréversibilité, c'est une machine théorique inaccessible qui constitue donc une abstraction.

Carnot considère alors le volume de contrôle (S) de la figure 2 comme une boîte noire isolant de l'extérieur une *machine quelconque réversible* : par exemple la centrale solaire de la figure 1 rendue réversible par la pensée. Cette machine parfaite contenue dans (S) échange de l'énergie sous forme calorifique et mécanique avec l'extérieur.

- Une quantité de chaleur Q_1 pénètre dans le système (S),
- Du travail τ_e sort du système (S) pour être utilisé à l'extérieur,
- Une quantité de chaleur Q_2 est rejetée du système (S).

2.2. Second principe de thermodynamique

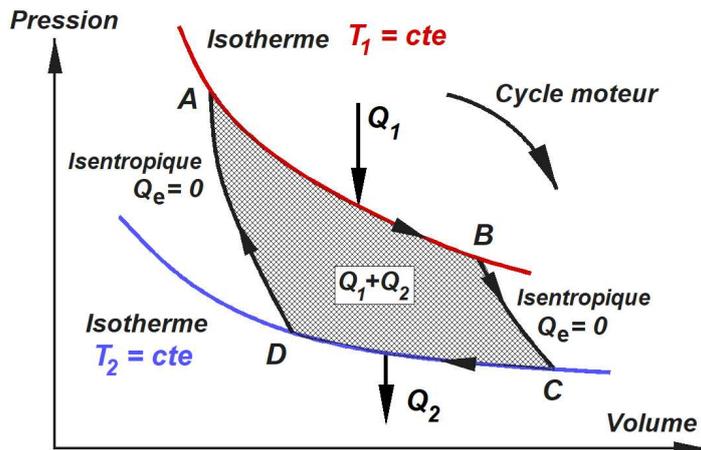


Figure 3 :
Cycle de Carnot
(Diagramme
pression-volume
de Clapeyron)

La centrale solaire produit du travail à partir de deux sources de chaleur à températures différentes. Peu importe ici que la machine soit réelle ou idéale, cette constatation est générale. Les irréversibilités ne font qu'embrouiller le problème.

“Partout où il existe une différence de température, il peut y avoir production de puissance motrice”, écrira Sadi Carnot en 1824. C'est le principe de Carnot.

Carnot ajoute : **“ On peut comparer avec assez de justesse la puissance motrice de la chaleur à celle d'une chute d'eau ... ”**.

L'eau s'écoule du bief amont à un bief aval ; au passage une turbine hydraulique soustrait une partie de l'énergie pour la transformer en énergie mécanique.

Le cycle de Carnot d'une machine réversible (Figure 3) est composé de deux isothermes ($T_1 = cte$ et $T_2 = cte$) et deux isentropiques ($Q_e = 0$).

La quantité de chaleur $Q_1 > 0$ (selon les conventions de la thermodynamique) n'a pas pu être intégralement transformée en travail. Le cycle restitue la quantité de chaleur $Q_2 < 0$ à la source froide ; seule la quantité de chaleur ($Q_1 + Q_2$) représentée par l'aire du cycle sur le diagramme de Clapeyron (Figure 3) a été transformée en travail τ_e fourni à l'extérieur.

2.2. Machine de Carnot inverse - Postulat de Clausius

Sur la figure 4, la chaleur s'écoule de la source chaude vers la source froide en fournissant du travail à l'extérieur dans la machine de Carnot. Si maintenant, on inverse tout en cherchant à soutirer de la chaleur de la source froide pour la transférer à la source chaude, il faudra alors fournir du travail extérieur au fluide évoluant ; c'est le cas des pompes à chaleur et des machines frigorifiques (Figure 5). L'opération n'est plus gratuite.

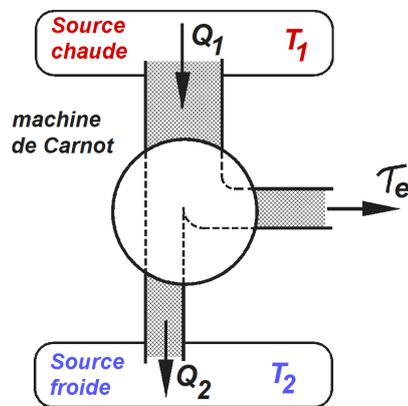


Figure 4 : Machine de Carnot

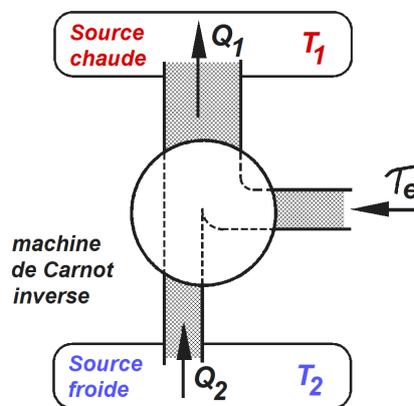


Figure 5 : Machine de Carnot inverse

Le célèbre postulat de Clausius (1865), autre présentation du second principe de la thermodynamique, résume la situation : **“La chaleur ne peut pas passer, d'elle-même, d'un corps froid à un corps chaud”**.

2.4. Le premier principe de thermodynamique

Le premier principe, postérieur au second principe, exprime la conservation de l'énergie. L'énergie se conserve mais elle peut changer de forme.

Puisque le fluide de travail partant d'un état initial déterminé du cycle retrouve ce même état après avoir décrit un circuit fermé au cours duquel il échange de la chaleur et du travail, il n'a accumulé aucune énergie. Pour tout cycle, dont celui de la machine de Carnot (Figures 2-3), le premier principe de thermodynamique s'écrit donc :

$$\tau_e + Q_e = 0$$

avec :

$$\tau_e < 0 \quad Q_e = Q_1 + Q_2 > 0 \quad (1)$$

Le travail fourni par le cycle à l'extérieur est : $|\tau_e| = Q_1 + Q_2$.

Fournissant du travail mécanique à l'extérieur, le cycle de Carnot est un cycle moteur. Il est parcouru dans le sens des aiguilles d'une montre sur le diagramme de Clapeyron (Figure 3).

2.5. Égalité de Carnot-Clausius

Le cycle de Carnot implique la relation : $\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$ (2)

Cette expression dite de Carnot-Clausius a ouvert la voie à l'entropie de Clausius.

2.6. Rendement thermique de la machine de Carnot

La quantité de chaleur Q_2 rendue à la source froide est à un niveau thermique trop bas pour être utilisée, on la considère donc comme perdue pour le cycle. Le travail se transforme en chaleur avec la plus grande facilité, mais il n'existe pas de méthode permettant de transformer toute la chaleur en travail, même dans une machine parfaite que nous ne pourrions jamais réaliser. On écrit par conséquent, que la transformation d'énergie thermique en énergie mécanique est affectée d'un certain rendement.

Le rendement thermique η du cycle de Carnot est le rapport entre le travail moteur fourni à l'extérieur et la quantité de chaleur dépensée Q_1 au cours du cycle. Compte tenu de l'expression de Carnot-Clausius précédente, on peut l'exprimer en fonction des températures absolues (en Kelvin) :

$$\eta = \frac{|\tau_e|}{Q_1} = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = 1 + \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (3)$$

2.7. Entropie - Quantité de chaleur - Température

Clausius adopte le concept d'entropie S en posant : $S = Q/T$

Cette fonction S ainsi définie est une fonction d'état : elle ne dépend que du point considéré, comme le sont la pression, la température, etc.

Les notions distinctes de température et de quantité de chaleur qui composent l'entropie étaient souvent mal interprétées ou confondues au temps de Carnot.

- La **température** caractérise l'agitation moléculaire.
- La **chaleur** est une quantité d'énergie qui fait varier la température d'un corps. Par exemple, la conduction est un phénomène de transfert de chaleur qui se propage pour modifier la température d'un milieu.

Lors d'une **transformation ouverte réversible** d'un système passant d'un état 1 à un état 2, (qui peut être une portion de cycle) on a :

$$\int_1^2 \frac{dQ_e}{T} = S_2 - S_1 \quad (4)$$

Cette expression montre que l'accroissement d'entropie lors d'un processus réversible, est dû entièrement aux apports calorifiques extérieurs.

3. THERMODYNAMIQUE PROCHE DE L'ÉQUILIBRE - CONDUCTION

C'est un domaine qui précède celui concernant les agitations créées par la nature sur l'océan ; c'est un passage obligé qui permettra de les traiter ultérieurement.

La thermodynamique de Carnot vue rapidement précédemment est en quelque sorte statique : elle concerne des situations en équilibre. Si ces situations évoluent, elles passent d'un équilibre à un autre théoriquement à vitesse presque nulle. Les irréversibilités ont donc pu être négligées.

En réalité, dans les machines thermiques, le fluide de travail décrit le cycle beaucoup plus rapidement et les processus sont donc irréversibles. On s'éloigne de l'équilibre.

3.1. Irréversibilités Les transformations réelles, qui se produisent dans la nature sont toujours irréversibles. On peut les répertorier comme suit :

3.1.1. Irréversibilités des échanges calorifiques

Une transformation ne peut être réversible que si elle s'effectue entre deux corps à températures infiniment voisines. Comme il n'existe pas de substance parfaitement conductrice, la transmission d'une quantité de chaleur donnée, d'un corps chaud vers un corps froid, exige un gradient de température fini, ce qui rend le phénomène irréversible puisque le processus inverse est impossible d'après le postulat de Clausius. Ce défaut ne provient que de la température seule: c'est une irréversible thermique.

3.1.2. Irréversibilités dues aux frottements

Les frottements, liés à la viscosité, qui dégradent de l'énergie mécanique en chaleur sont une cause primordiale d'irréversibilités.

3.1.3. Irréversibilités dues aux phénomènes tourbillonnaires

Un tourbillon est un agent actif de la dégradation d'énergie dans la nature. Un tourbillon idéal ou vortex, comme celui étudié par Helmholtz ou par Kelvin, suit la loi des écoulements irrotationnels $RV = constante$. Il est constitué par des particules fluides décrivant des spirales autour d'un axe, animées d'une vitesse qui augmente donc au fur et à mesure qu'on se rapproche de l'axe où cette vitesse devient théoriquement infinie.

Puisque la notion d'infini issue des mathématiques n'existe pas en physique, un autre phénomène vient donc compléter le schéma précédent dans sa partie centrale. Un second tourbillon concentrique, tournant en bloc selon la loi des écoulements rotationnels $V = cte * R$, se forme à l'intérieur du vortex initial. Cet emboîtement de tourbillons concentriques est présent dans la nature et se manifeste dans les cyclones tropicaux de manière encore imparfaitement précisée mais très spectaculaire [16].

En théorie, c'est le tourbillon rotationnel interne qui permet la dégradation de l'énergie. Le tourbillon idéal externe transmet l'énergie sans la dissiper.

En pratique, il existe un abîme entre l'exposé théorique du tourbillon idéal irrotationnel ci-dessus et le tourbillon réel. Le tourbillon idéal théorique ne présente aucun intérêt pour ce qui nous occupe. C'est au contraire, parce qu'il s'écarte du type idéal irrotationnel que le tourbillon réel permet de dégrader de l'énergie.

Shea [17] propose d'adopter, en particulier pour les ouragans, une loi :

$$V\sqrt{R} = cte \quad (5)$$

plutôt que $RV = cte$, ce qui modifie profondément les propriétés théoriques des vortex et introduit des contraintes tangentielles visqueuses dans les écoulements en les rendant rotationnels, donc dissipatifs.

3.2. Production d'entropie

Dans les machines réelles tenant donc compte des irréversibilités, le rendement est plus faible que celui d'une machine de Carnot pour laquelle les évolutions étaient réversibles.

Au cours d'un cycle irréversible, une fraction moindre de Q_1 est convertie en travail et une quantité de chaleur Q_2 plus grande est fournie au réservoir froid. On a alors :

$$\frac{Q_2}{T_2} > \frac{Q_1}{T_1} \quad (6)$$

Lors d'une **transformation ouverte irréversible**, la relation (4) précédente, obtenue dans un cas idéal, devient :

$$\int_1^2 \frac{dQ_e}{T} < S_2 - S_1 \quad \text{ou} \quad \frac{dQ_e}{T} < dS \quad (7)$$

Remplaçons l'inégalité (7) par l'égalité suivante :

$$TdS = dQ_e + d\tau_f \quad (8)$$

L'introduction du terme $d\tau_f$ permet de quantifier l'irréversibilité, il représente le *travail dégradé* en chaleur. Les frottements, la viscosité font que l'énergie mécanique se dissipe toujours en chaleur.

Par voie irréversible, l'apport calorifique extérieur Q_e ne suffit plus pour expliquer l'accroissement d'entropie constatée. Il y a eu création d'entropie au cours de l'évolution. Cet accroissement est dû à la dégradation d'énergie mécanique en chaleur qui s'est produite par les irréversibilités. Tout phénomène irréversible donne lieu à une création d'entropie.

Adaptons l'expression (8) précédente :

$$dS = \frac{dQ_e}{T} + \frac{d\tau_f}{T} = dS_e + dS_i \quad (9)$$

Deux types d'apports participent à la variation d'entropie :

- Les contributions externes qui résultent des échanges d'énergie, et aussi de matière, avec l'extérieur. dS_e est la variation d'entropie correspondante.
- Les irréversibilités internes créent une variation d'entropie dS_i . Les faits qui en sont responsables sont très souvent de nature différente comme il vient d'être vu.

La variation totale d'entropie d'un système est donc constituée de la somme de deux termes, l'un dS_e (positif ou négatif) provenant des échanges avec l'extérieur, l'autre dS_i (toujours positif) provenant des pertes thermodynamiques internes.

3.3. Ordre et désordre

Soit un gaz confiné dans une bouteille ; ouvrons une soupape afin qu'il se répande dans un réservoir plus grand. Lorsque l'uniformisation a eu lieu, le gaz contenu dans le grand réservoir est à l'équilibre. Le processus étant irréversible, l'entropie à l'état final est supérieure à l'entropie initiale lorsque le gaz était confiné dans la bouteille.

Boltzmann nous enseigne que l'entropie est une mesure du désordre qui règne dans le monde moléculaire. L'entropie est ainsi associée au désordre. Le gaz confiné dans la bouteille est dans une situation de plus faible entropie, il y a donc davantage d'ordre dans l'état initial et plus de désordre dans l'état final.

3.4. Structure dissipative - Si on compense les irréversibilités (dS_i) par un apport permanent d'énergie et de matière (dS_e), le système ouvert est maintenu en régime permanent ($dS = 0$). La production d'entropie interne et l'entropie échangée avec l'environnement sont égales. Prigogine appela *structures dissipatives* ces systèmes en accolant deux mots à la signification contradictoire puisque *structure* évoque l'ordre alors que *dissipative* renvoie vers la notion de désordre.

3.5. Conduction dans l'expérience de Bénard

L'expérience d'Henri Bénard permet de mieux comprendre les phénomènes que la nature construit en mer : les cellules de Hadley.

Un liquide stagne entre deux plaques parallèles dans la démonstration de Bénard. Les deux plaques sont à la même température, et le liquide est en équilibre thermodynamique. Rien d'apparent ne se passe, tout semble calme.

Au début de l'expérience, on est dans cet état d'équilibre thermodynamique, lequel correspond au point 0 de la figure 9 suivante.

Éloignons-nous légèrement de l'équilibre en chauffant la paroi inférieure. Un paramètre CP , fonction de la différence de température entre les deux parois permet de contrôler le processus. Les plaques sont maintenues respectivement à la température T_1 et T_2 , avec $T_1 > T_2$. Le système est donc entretenu par un apport extérieur d'énergie (Figure 6).

Après l'application de cette contrainte, le système s'écarte de l'état d'équilibre, il est en déséquilibre permanent (point 1 en figure 9).

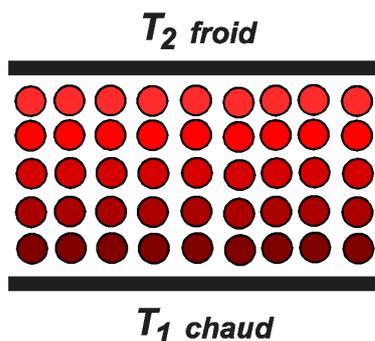


Figure 6 : Conduction thermique

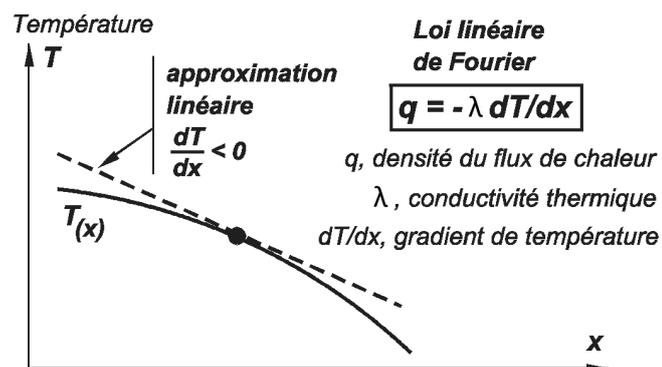


Figure 7 : Direction de la conduction

Pour T_1 proche de T_2 , donc *près de l'équilibre*, le gradient de température est faible. C'est la conduction thermique régie par la loi linéaire de Fourier, qui est un phénomène irréversible. Les phénomènes de transport sont accompagnés d'une augmentation d'entropie. De l'énergie thermique est transférée, par collisions, des molécules les plus rapides aux plus lentes. Cet écoulement stationnaire d'énergie, s'effectue sans transport de matière.

La conduction thermique, phénomène de transport, s'effectue dans la direction des températures décroissantes (Figure 7).

Un apport constant d'énergie externe maintient le processus, tout en le gardant près de l'équilibre. Les phénomènes microscopiques provoqués par les interactions moléculaires n'induisent aucun effet macroscopique perceptible.

4. THERMODYNAMIQUE PLUS LOIN de l'ÉQUILIBRE - CONVECTION

Près de l'équilibre, la chaleur est d'abord transportée par conduction, mais à partir d'un gradient critique, un transport par convection se crée. Dès que l'on sort du domaine proche de l'équilibre, la conduction invisible laisse la place au phénomène de convection, lequel surgit devant nos yeux. Les deux moyens de transport de l'énergie s'affrontent : la conduction et la convection. La conduction n'est plus assez efficace pour transporter l'énergie; la convection l'emporte. Le moyen de transport le plus efficace domine toujours l'autre.

La loi linéaire de Fourier, utilisée précédemment en conduction n'est plus valable. On sort du déterminisme des lois linéaires pour pénétrer dans le monde non-linéaire. Le flux de chaleur orienté de bas en haut rend le système instable et complexe. Le système devient sensible à la gravité qui n'avait pas d'effet sur le système en équilibre lors de la conduction. Les particules chaudes, plus dynamiques, parviennent à se dégager un chemin pour atteindre la paroi supérieure, obligeant les particules plus froides et plus dolentes à descendre.

Quand on augmente suffisamment le gradient de température en poussant le système plus loin de l'équilibre, des instabilités se produisent dans le fluide, des mouvements de longue portée sont observés et un mouvement en masse s'établit. Un transport par convection naît lorsque le système atteint un seuil critique, lieu d'une bifurcation (point 2 en figure 9).

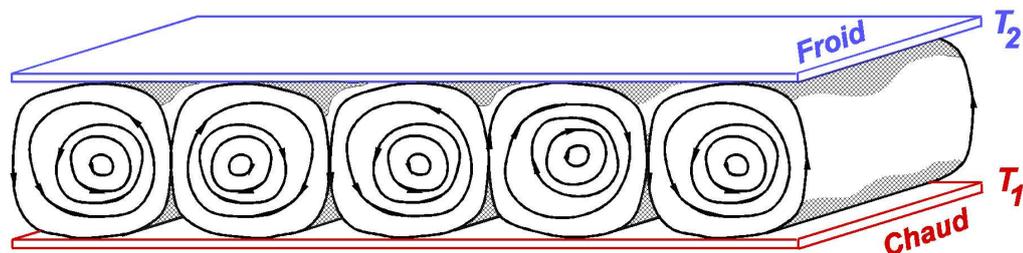


Figure 8 : Cellules de convection de Bénard

Quand le gradient augmente encore, un accroissement de vitesse du fluide fait sauter l'écoulement du régime laminaire au régime turbulent, générant alors une convection turbulente qui accélère considérablement les échanges de propriétés entre couches voisines du fluide et en particulier la diffusion de la chaleur au sein de celui-ci. Il devient extrêmement difficile d'analyser en détail ce procédé de

transport. La turbulence est une manifestation du mouvement chaotique dans les fluides. Après la bifurcation, des zones assez troubles souvent chaotiques, parfois fugaces peuvent apparaître ; elles précèdent l'état convectif auto-organisé stationnaire où les molécules elles-mêmes participent à un mouvement collectif. Le monde microscopique s'organise de lui-même spontanément de manière spectaculaire et devient observable depuis notre monde macroscopique.

Un mouvement d'ensemble est créé, il est répétitif et forme ce qu'on appelle les cellules de Bénard (Figure 8).

Dans cette organisation du fluide, les cellules tournent alternativement dans le sens horaire et dans le sens contraire en raison de l'effet d'entraînement. Chaque cellule tourne dans une direction particulière, qui alterne d'une cellule à l'autre. Le mouvement de convection qui s'établit constitue une organisation spatiale complètement nouvelle du système. C'est un cas typique de restructuration moléculaire. Des milliards de milliards de molécules se déplacent avec cohérence, formant ces cellules macroscopiques de convection.

4.1. Structure dissipative dans l'expérience de Bénard

Les cellules de convection de Bénard sont un exemple spectaculaire d'une structure dissipative, un nom qui reflète la combinaison des deux notions d'ordre et de gaspillage. Ce nom exprime un nouveau fait fondamental : tandis que les dissipations sont généralement liées aux idées de perte d'efficacité et de désordre, elles deviennent une source d'ordre quand on s'écarte beaucoup de l'équilibre. Une structure macroscopique nouvelle se forme et peut se maintenir parce qu'une contrainte extérieure a été appliquée. Cette contrainte est le gradient de température dans l'expérience de Bénard.

Dans les années 1970, les études en thermodynamique non linéaire ont mis en évidence ces phénomènes nouveaux et remarquables. Au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'équilibre, les régimes simples prédits par les lois linéaires deviennent instables avant que des structures spatiales apparaissent. Lorsque le transport de chaleur se fait par conduction, les molécules du fluide situées près de la surface chaude ne reçoivent aucune information sur ce qui se passe près de la surface froide. Elles se contentent de transmettre de proche en proche, par collisions, de l'énergie cinétique aux molécules voisines jusqu'à la surface froide. Lorsque la convection s'établit, les molécules qui se sont refroidies près de la surface froide redescendent vers la surface chaude. Elles y apportent donc une information sur la température de la surface froide. Une communication s'établit et une régulation se met en place. Quand un système devient une structure dissipative, son entropie diminue parce qu'un certain ordre se crée à côté du désordre. L'augmentation des corrélations aussi bien que la diminution de l'entropie caractérisent ainsi l'auto-organisation d'un système.

Dans une cellule convective, il existe des corrélations de courte portée dues à l'interaction entre les molécules voisines. Il y a également une corrélation de longue portée entre une molécule d'un courant ascendant et une molécule située sur un courant descendant. L'augmentation des corrélations ainsi que la baisse du niveau entropique caractérisent l'apparition d'ordre, tout au moins localement. En

théorie de l'information, Claude E. Shannon montre que l'entropie mesure la perte d'information par un système, ce qui donne un nouvel éclairage du second principe de la thermodynamique. Dans les cellules convectives de Bénard, des informations sont transmises par les molécules confirmant ainsi que l'entropie diminue par rapport à la conduction qui n'apportait aucune information au système.

4.2. Paramètre de contrôle dans l'expérience de Bénard

Choisissons un paramètre de contrôle CP identique, pour le moment, au nombre de Rayleigh utilisé par les thermiciens. Il est surtout fonction des différences de températures. À partir du nombre de Rayleigh critique (point 2 en figure 9), où une bifurcation est atteinte, la convection peut apparaître. Après la bifurcation, des zones plutôt instables précèdent l'état de convection auto-organisée stationnaire repérée en 3 sur la figure 9.

Pour les systèmes thermodynamiques hors équilibre, des situations observables et bien organisées peuvent émerger. Une nouvelle structure macroscopique est formée et peut être maintenue parce qu'une contrainte externe, dans ce cas le gradient de température, a été appliquée.

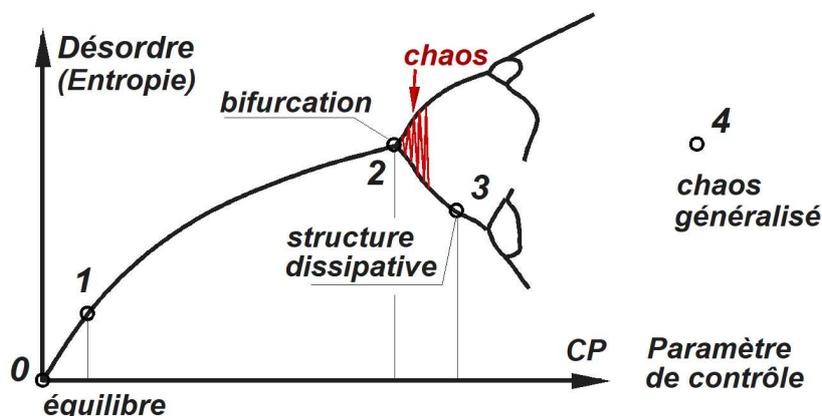


Figure 9 : Diagramme de bifurcation

Alors que les dégradations d'énergie sont généralement associées au désordre, elles deviennent source d'ordre lorsque l'on s'éloigne suffisamment de l'équilibre. Si on augmentait encore plus le paramètre de contrôle par action sur la température T_1 de la paroi chaude, la disposition organisée se détruirait complètement : on sortirait du chaos déterministe (point 3) pour entrer dans le chaos généralisé (point 4 en figure 9).

4.3. Structures dissipatives de Hadley

Les régions équatoriales étant soumises à un intense rayonnement solaire, elles accumulent de la chaleur. Lors de la recherche de l'équilibre thermique de la planète par la nature, ce surcroît de chaleur provoque des mouvements complexes, qui font l'objet de beaucoup d'attention de la part des météorologues.

Les mouvements des masses d'eau et d'air dans l'atmosphère sont d'abord soumis aux phénomènes de transport de matière (diffusion moléculaire), d'énergie (conduction thermique) et de quantité de mouvement (viscosité), de nature statistique qui permettent de relier le monde microscopique à notre monde macroscopique.

Ces mouvements sont régis par les équations de Navier-Stokes et de Reynolds. La complexité des phénomènes rend leur résolution inextricable. D'ailleurs, utilisant la loi de viscosité de Stokes reliant linéairement le champ de contraintes au champ de vitesses, leur domaine de validité est naturellement limité aux phénomènes proches de l'équilibre, dans le domaine linéaire de la thermodynamique. Par les termes non-linéaires qu'elles contiennent, ces relations portent en elles les germes du chaos.

En thermodynamique hors équilibre, la convection thermique est le processus essentiel qui transporte l'énergie thermique. Sans cesse, des courants de convection apparaissent dans l'atmosphère ; ils sont dus essentiellement aux différences de température en fonction de l'altitude.

La circulation générale de l'atmosphère est d'une complexité incroyable. La localisation des phénomènes, leur comportement, leur durée de vie, etc. sont particulièrement difficiles à appréhender. Néanmoins, les progrès en modélisations numériques et statistiques ainsi que les observations spatiales permettent aux météorologues de mieux approcher l'ensemble des phénomènes et d'améliorer les prévisions.

Pour George Hadley, des vents réguliers devaient transporter en altitude de la chaleur depuis l'équateur vers les pôles. L'air devenu froid et lourd dans les régions polaires redescendait et reprenait alors en surface le trajet vers l'équateur pour fermer le cycle et en recommencer un nouveau.

Si la Terre n'était pas en rotation, ce transfert de chaleur serait effectué par une seule cellule de convection. Mais l'effet Coriolis dû à la rotation de la terre dévie toute particule en mouvement. Cependant cet effet dévie trop les vents et ce sont finalement trois cellules qui se forment entre l'équateur et les pôles pour transférer la chaleur.

Seules les cellules de Hadley se situant entre l'équateur et les latitudes 30 sont utiles pour notre propos relatif aux ouragans ; on les décrit ici brièvement.

Près de l'équateur, l'air chaud s'élève dans l'atmosphère, en créant une dépression à la surface de l'océan. Un afflux d'air moins chaud issu des tropiques s'engouffre alors dans la zone à plus faible pression créée en se chargeant en humidité au contact de la surface de l'océan. Il existe ainsi une zone dépressionnaire près de l'équateur et une zone de plus haute pression près dans les zones tropicales.

Le courant d'air permanent venant des latitudes tropicales et se dirigeant vers l'équateur ne se déplace pas selon une méridienne ; il est dévié par l'effet Coriolis qui joue un rôle essentiel dans l'écoulement atmosphérique horizontal. Ces courants d'air déroutés qui occupent les basses couches atmosphériques sont les vents alizés qui s'inclinent vers l'équateur.

Alors que les masses d'air sont déviées vers leur droite dans l'hémisphère Nord, elles s'incurvent vers leur gauche dans l'hémisphère Sud. Ce qui entraîne un bouleversement complet dans la formation des vents et le sens de rotation des cyclones tropicaux lorsqu'on franchit la zone équatoriale.

4.4. La zone de convergence intertropicale (ZCIT)

Les alizés venant du Nord-Est dans l'hémisphère Nord et ceux venant du Sud-Est dans l'hémisphère Sud convergent l'un vers l'autre et forcent l'air chaud et humide à s'élever. Une bande nuageuse de quelques centaines de kilomètres de largeur se forme tout autour du globe ; c'est la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) nettement visible sur les images satellitaires.

Une forte instabilité atmosphérique règne dans cette zone constituée d'un amoncellement impressionnant de nuages, envahissant toute l'épaisseur de l'atmosphère.

Lors de son ascension, l'air chaud et humide se refroidit brusquement et sa condensation entraîne des pluies diluviennes.

À la tropopause, donc vers 15 km d'altitude, les masses d'air ont perdu une grande partie de leur humidité sous forme de précipitations. Elles s'échappent ensuite vers les tropiques poussées par les masses d'air successives.

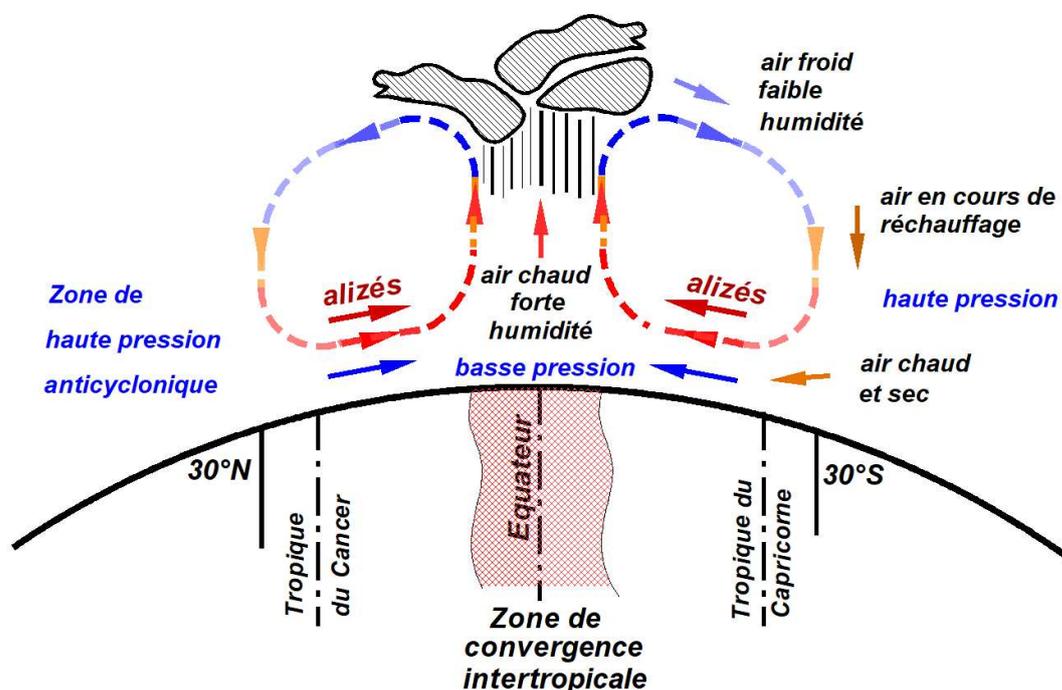


Figure 10 : Cellules de Hadley et vents alizés

En s'éloignant de l'équateur, les masses d'air à faible humidité sont soumises à l'effet Coriolis qui les dévient vers l'Est de leur parcours dans l'hémisphère Nord en formant les contre-alizés. Se déplaçant vers les pôles, l'air se refroidit par échange avec l'environnement, et il commence alors à redescendre vers les latitudes 30 où il retrouve la zone anticyclonique. L'air se réchauffe alors et son humidité relative diminue.

Pour compléter la cellule de Hadley, l'air venant de l'anticyclone se redirige vers l'équateur et l'effet Coriolis transforme à nouveau ces vents en alizés.

L'air ainsi aspiré se charge d'humidité pendant son trajet au-dessus des eaux chaudes tropicales de manière complexe car les phénomènes de transport non-linéaires entraînent des effets croisés très délicats à prendre en compte.

Du fait des directions différentes des alizés et des contre-alizés, l'écoulement de l'air humide est donc vrillé à l'intérieur des cellules de Hadley. Ces cellules sont par ailleurs multiples autour de la Terre.

Même si les cellules de Hadley sont beaucoup plus compliquées à analyser que les cellules de Bénard, il y a une évidente analogie entre ces deux phénomènes.

5. TRÈS LOIN de l'ÉQUILIBRE - la STRUCTURE DISSIPATIVE OURAGAN

Les cellules de Hadley s'enroulent plus ou moins parallèlement aux latitudes en formant des structures toriques le long de la ZCIT. Elles permettent de véhiculer, plus rapidement que par les courants marins, la chaleur des zones bénéficiaires en énergie solaire vers celles qui sont déficitaires. Cependant, les vitesses atteintes sont apparemment trop faibles pour transporter le supplément d'énergie produit par le soleil ardent de la saison chaude.

Un autre mécanisme beaucoup plus dynamique se met alors en place localement pour dissiper le supplément d'énergie : le cyclone tropical ou ouragan. Celui-ci s'ajoute et interfère de manière très complexe avec les cellules de Hadley. Puisque ces deux phénomènes se manifestent dans les mêmes zones géographiques et qu'ils sont complémentaires, il devrait exister un lien qui les unit.

Mais comment expliquer qu'une cellule torique à axe horizontal se transforme en une perturbation générant d'abord une dépression tropicale à développement vertical, laquelle sera susceptible d'évoluer vers une tempête tropicale puis éventuellement vers un ouragan ? On peut penser que les germes d'une dépression tropicale sont à rechercher dans des cellules de Hadley déstructurées et rabougries.

Par ailleurs, de nombreuses théories ont été émises pour expliquer les bandes de nuages disposées en spirale autour du mur de l'œil (Figure 13). On admettra ici, à défaut d'en savoir plus, que des cellules convectives se lovent autour du mur de l'œil qui les entraînent en rotation.

La nature, qui n'est pas tenue de suivre tous nos raisonnements, n'a pas fini de nous surprendre !

À la longue liste des disciplines scientifiques impliquées dans la compréhension des ouragans : mécanique des fluides, dynamique des fluides en rotation, dynamique des écoulements stratifiés, convection, interaction air-océan, etc., on ajoute ici la théorie du chaos car la nature aura poussé un système météorologique trop loin de l'équilibre.

On dispose heureusement de nombreuses informations sur la structure et les mécanismes d'action d'un ouragan. Les nombreux travaux effectués par les spécialistes du climat, dont tous n'ont évidemment pu être rappelés dans la bibliographie, sont aussi une aide précieuse.

Dans les systèmes dynamiques, les effets non-linéaires vont amplifier une petite fluctuation avec le temps. Une petite perturbation aléatoire croît considérablement et rend la prévision hasardeuse ou impossible. En météorologie, cette dépendance aux conditions initiales, signature du chaos, fut mis en évidence par Henri Poincaré (1908) et Edward Lorenz (1962).

5.1. Conditions de formation des ouragans

Les ouragans se forment dans les Tropiques à proximité de la zone de convergence intertropicale (ZCIT) à la saison chaude et les conditions principales rappelées ci-dessous sont nécessaires pour qu'ils surviennent :

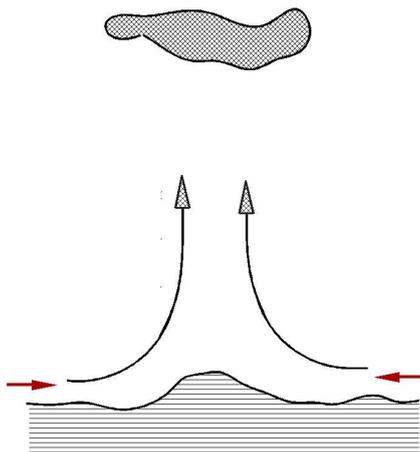
- une zone d'eau chaude supérieure à 26 degrés Celsius sur une profondeur de quelques dizaines de mètres, faisant office de réservoir d'énergie thermique,
- un fort taux d'humidité dans l'air chaud,
- une absence de vent ou des vents homogènes en altitude,

Un ouragan ne se forme pas systématiquement mais pour qu'il puisse se former il est nécessaire que les conditions ci-dessus soient remplies.

5.2. Formation d'un ouragan [18, 19, 20, 21]

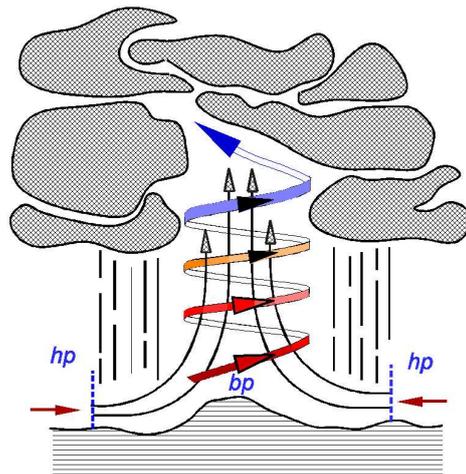
L'ouragan se crée sur les océans d'où il tire l'énergie et la matière pour sa création et son entretien car il lui faut une énorme quantité d'eau pour pouvoir se développer.

Une **dépression tropicale** est une perturbation localisée avec un centre dépressionnaire (Figure 11). La vitesse moyenne des vents moyens soutenus pendant une minute est inférieure à 62 km/h. Il n'est pas possible de connaître l'évolution d'une dépression tropicale. La dépression fait converger les vents ; ceux-ci se réchauffent au contact de la surface de l'océan et tendent donc à s'élever dans l'atmosphère. Cet air ascendant chaud et humide provoque la formation d'une masse de nuages en altitude.



$$V_{\text{vent}} \leq 62 \text{ km/h}$$

Figure 11 : Dépression tropicale



$$63 \text{ km/h} \leq V_{\text{vent}} \leq 116 \text{ km/h}$$

Figure 12 : Tempête tropicale

Une **tempête tropicale** est un phénomène plus violent caractérisé par des vitesses de vents plus importantes. Son diamètre atteint plusieurs centaines de kilomètres. Des masses d'air chaud chargées en humidité provoquent la formation de nuages en altitude, situation propice à des précipitations intenses et au développement d'orages.

En inclinant les trajectoires des masses d'air lors de leur trajet vers les zones en dépression, l'effet Coriolis permet à celles-ci de se transformer en un tourbillon massif. Le vortex créé par cette rotation engendre de grandes vitesses de vents (Figure 12).

Ce qui était tempête tropicale pourrait devenir, en fin d'été sous l'effet du soleil ardent, un ouragan. Le système passe par une bifurcation, puis vraisemblablement par une zone chaotique avant de se stabiliser dans une autre configuration très différente et beaucoup plus ordonnée : l'œil de l'ouragan, son mur et ses structures nuageuses en spirale (Figure 13).

L'échelle de Saffir-Simpson

classe les phénomènes selon les vitesses du vent :

Tempête tropicale : La dépression tropicale s'est formée et s'intensifie. Les vents varient de 63 à 116 km/h.

Ouragan de catégorie 1-2-3-4 : Les vents vont s'amplifiant de 117 km/h à 249 km/h selon la catégorie.

Ouragan de catégorie 5 : Les vents sont à plus de 249 km/h.

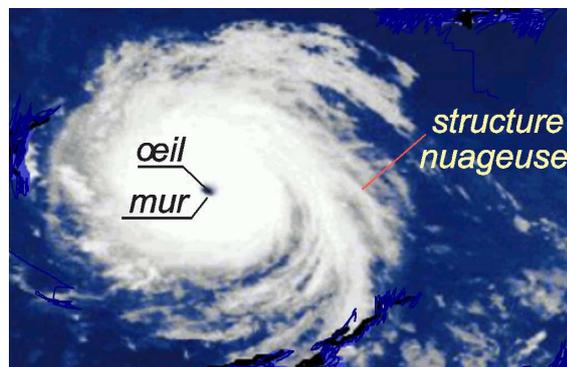


Figure 13 : Vue d'un ouragan depuis l'espace

5.3. Apparition d'ordre : L'œil et le mur de l'ouragan. Lorsque les conditions permettent à la dépression tropicale d'évoluer vers un ouragan, le centre du système apparaît plus nettement sous forme d'un œil presque circulaire, dont le diamètre est de l'ordre de 20 à 40 kms. Cette zone, dans laquelle règne un calme apparent, est dépourvue de nuages ce qui permet de la distinguer depuis l'espace.

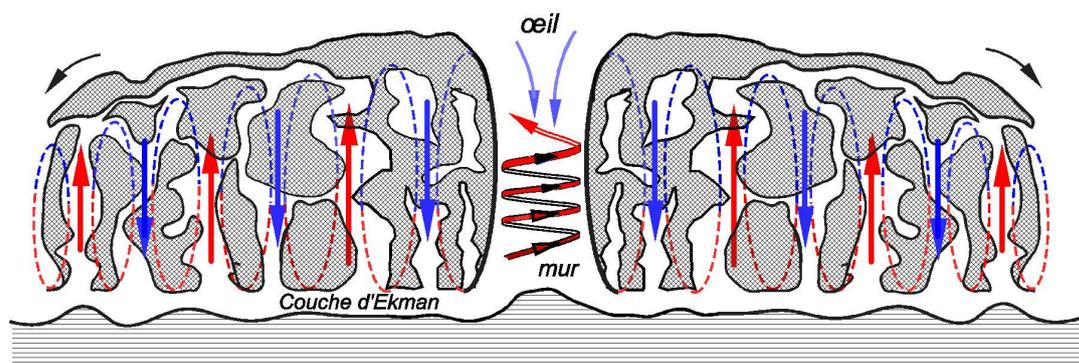


Figure 14 : Cyclone tropical à maturité (ouragan, hurricane, typhon)

Les observations faites depuis des satellites et certaines mesures effectuées par des avions de reconnaissance, mais aussi des considérations théoriques permettent une représentation schématique d'un ouragan (Figures 13-14).

L'œil est une région où la pression est la plus basse.

L'œil est ceinturé par des cumulonimbus dont le sommet atteint 12 à 15 km d'altitude. Ce mur de nuages produit les effets les plus dévastateurs : les vents peuvent y souffler jusqu'à 300 km/h et les pluies y sont diluviennes.

Dès qu'il touche la terre ferme, l'ouragan est coupé de son alimentation : l'eau de l'océan. Cette structure dissipative faiblit car elle n'est plus alimentée en matière et énergie. Son extinction débute alors.

5.4. Diagramme de bifurcation d'un ouragan

Quand le système tempête tropicale est poussé au-delà d'un seuil critique, il sort de son état entièrement dissipatif pour bifurquer vers un état d'auto-organisation hautement structuré au comportement stable : l'ouragan.

Un des aspects de la thermodynamique loin de l'équilibre est sa capacité à engendrer des systèmes auto-organisés (Figure 15). Un tel degré d'ordre émanant de l'activité de milliards de milliards de molécules peut paraître invraisemblable et montre que bien des mystères, cachés par la nature, restent encore heureusement à éclaircir.

Loin de l'équilibre naissent des structures nouvelles. L'émergence de l'ordre après les phénomènes de chaos est la règle plutôt que l'exception. L'ordre et le désordre sont mystérieusement entremêlés dans la structure dissipative ouragan car des systèmes complexes peuvent engendrer simultanément du désordre et des îlots d'ordre à l'intérieur du désordre (Figure 14). Un ordre subtil existe dans le désordre du monde non-linéaire.

Quand un ouragan s'auto-organise, son entropie décroît (Figure 15).

Loin de l'équilibre, après une bifurcation, un phénomène spectaculaire d'auto-organisation spontanée surgit. L'ouragan est une véritable organisation spatiale du système initial tempête tropicale et c'est le cas le plus grandiose d'un réarrangement moléculaire. Des milliards de milliards de molécules se meuvent de manière cohérente, formant cette structure dissipative de taille gigantesque.

5.5. Paramètre de contrôle d'un ouragan

C'est parce qu'une contrainte extérieure, prise en compte par un paramètre de contrôle, a été appliquée qu'une structure macroscopique nouvelle peut apparaître dans ce système loin de l'équilibre. Ici, cette contrainte est essentiellement due au gradient de température, mais elle est aussi modulée par d'autres paramètres tels que la position du phénomène par rapport à l'anticyclone, le cisaillement des vents, etc.

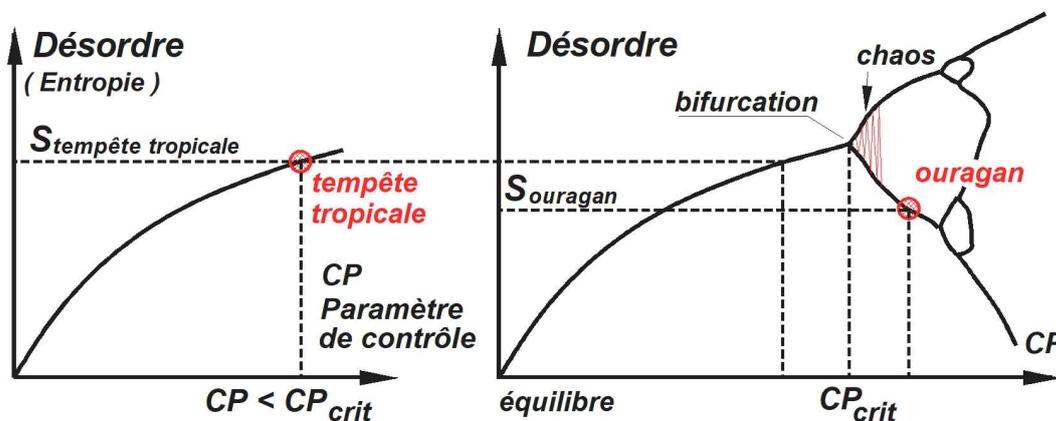


Figure 15 : Création d'ordre lors de la formation d'un ouragan

Le paramètre de contrôle CP est analogue au nombre de Rayleigh des thermiciens basé sur les différences de température, il pourrait aussi être remplacé, en première approximation par le critère de Saffir-Simpson, lui aussi relié par l'intermédiaire des vitesses du vent aux différences de températures. Il semble préférable cependant

d'utiliser le paramètre CP , basé lui aussi sur le gradient de température, mais qui devrait tenir compte en outre d'autres paramètres rappelés ci-dessus qui ont aussi une influence sur l'apparition et le développement d'un ouragan.

5.6. Cycle thermodynamique simplifié d'un ouragan

Une masse de fluide, dans son parcours à l'intérieur d'un ouragan, effectue un trajet complexe dans lequel se détachent cependant nettement ses contacts avec l'océan d'une part et avec la troposphère d'autre part. L'analyse reste particulièrement délicate ; chaque masse de fluide étant sujette à des conditions et des parcours différents. Cependant, comme dans le cas d'une centrale thermodynamique solaire (Figures 1 et 17), le cycle d'un ouragan peut se décomposer sommairement en quatre évolutions (Figure 16).

5.6.1. Évolution isotherme AB : Immédiatement au-dessus de la surface de la mer, l'air circule vers l'œil dans la couche d'Ekman dont l'épaisseur est d'environ 1,5 km. Les échanges air-mer sont intenses dans cette zone et délicats à modéliser du fait d'effets non-linéaires dus aux phénomènes de transport. L'air se charge en humidité. Une masse fluide entraînée dans un ouragan peut être assimilée en première approximation à un mélange de deux gaz : l'air et la vapeur d'eau de mer. L'air soutire de l'humidité par évaporation de la surface de l'océan. L'énergie calorifique Q_1 est ainsi transmise au fluide parcourant le cycle sous forme de chaleur latente de vaporisation. La source d'énergie des ouragans est le transfert d'énergie de l'océan comme l'ont reconnu en premier Riehl and Kleinschmidt [11][21].

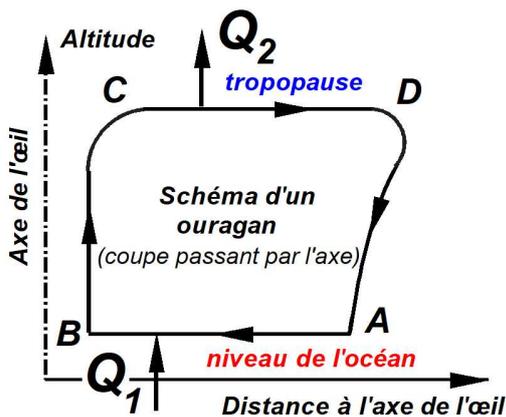


Figure 16 : Coupe d'un ouragan

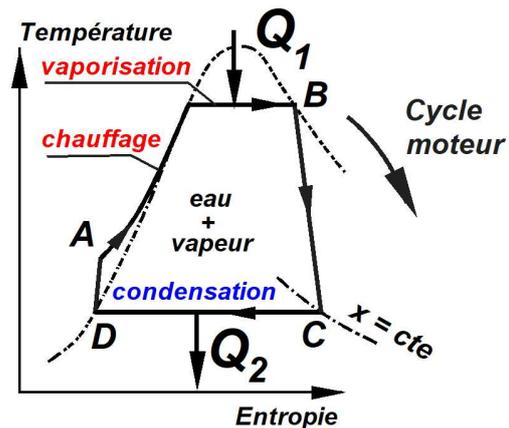


Figure 17 : Diagramme entropique (Centrale solaire de la figure 1)

5.6.2. Évolution BC : Le courant ascendant forme une paroi verticale de nuages tournoyant en spirale autour de l'œil. L'air humide se refroidit au cours de l'ascension, la vapeur d'eau se condense et retourne à l'océan sous forme de pluies torrentielles. La chaleur latente est ainsi libérée et participe au réchauffage de l'air qui continue donc à s'élever en aspirant le mélange des basses couches et en amplifiant donc les échanges air-mer. Au cours de ce processus, de l'énergie calorifique se transforme en énergie cinétique de rotation. Cette phase est analogue à celle BC d'une centrale thermique

classique (Figure 17). Lors de la détente BC dans la turbine d'une turbomachine, de l'énergie calorifique est d'abord transformée en énergie cinétique de rotation avant d'être à nouveau transformée en énergie mécanique par l'intermédiaire d'aubages.

5.6.3. Évolution isotherme CD : À une altitude supérieure à 10 kms, l'air s'éloigne du centre. Au contact avec la tropopause, l'évolution est isotherme. Le cycle cède la quantité de chaleur Q_2 à l'environnement sous forme de radiation vers la stratosphère.

5.6.4. Évolution DA : L'air redescend le long de la partie extérieure de l'ouragan et referme le cycle.

5.7. Analyse du cycle d'un ouragan

Échangeant de l'énergie thermique avec deux sources à température constante, la machine thermique "ouragan" est proche d'une machine thermique classique telle la centrale thermique solaire (figure 1). Il sera suffisant ici de dire que c'est une machine thermique effectuant un cycle moteur, c'est-à-dire produisant du travail à l'extérieur qu'elle réutilise à ses propres fins pour grossir davantage.

La nature a ainsi créé un système thermodynamique semblable en beaucoup de points à une centrale thermique fournissant de l'énergie mécanique, sous forme cinétique, avec un rendement positif car de l'ordre est apparu.

En prenant $T_1=26^\circ\text{C}=299\text{ K}$ pour température de la source chaude océanique et d'autre part $T_2=-65^\circ\text{C}=208\text{ K}$ pour température de la tropopause, le rendement de Carnot de la machine ouragan, c'est-à-dire d'un ouragan utopique dénué de toute irréversibilité, serait de l'ordre de 30%.

Le rendement de l'ouragan tenant compte des irréversibilités de toutes sortes sera évidemment très inférieur à ce rendement théorique d'une machine de Carnot réversible fonctionnant entre ces deux niveaux de températures.

De la même manière qu'une machine thermique classique, comme une centrale solaire, l'ouragan fournit du travail à l'extérieur lorsqu'il dévaste les contrées qu'il rencontre ou quand il utilise sa propre puissance motrice en mer pour enfler et amplifier ses capacités destructrices.

Comme cherchent à le faire toutes les structures dissipatives, dans d'autres branches d'activités, qui veulent atteindre une trop grande prospérité avant de s'écrouler.

5.8. Régime d'autonomie des ouragans

Tout comme dans les cellules de Bénard, l'ouragan est doté par la nature d'une boucle d'asservissement qui gère les informations. Cette régulation maintient l'ordre dans l'ouragan et entraîne une diminution locale d'entropie.

L'ouragan parvient à fournir de l'énergie motrice à partir du moment où il atteint son régime d'autonomie, comme toute autre machine thermique. Il est donc probable qu'on puisse observer un décalage, entre le moment où l'œil apparaît et le moment où le phénomène atteint son classement en ouragan de catégorie 1. C'est le délai requis pour que l'ouragan, en phase d'accélération depuis sa naissance, atteigne le moment où il devient un moteur effectif.

6. CONCLUSION

L'ordre et le désordre sont intimement entrelacés dans notre monde macroscopique. Les thermodynamiciens annoncent, depuis environ deux siècles, que les phénomènes irréversibles de toutes sortes induisent un accroissement du désordre. Les théoriciens du chaos, plus récemment, ont montré que les systèmes dissipatifs soumis à un déséquilibre trop important peuvent s'auto-organiser de manière spectaculaire. De l'ordre apparaît alors localement mais le désordre augmente naturellement ailleurs afin que les lois de la thermodynamique ne soient pas violées.

Les phénomènes irréversibles ne se limitent donc pas uniquement à une augmentation du désordre, bien au contraire ils participent activement à la formation de structures dissipatives auto-organisées. L'irréversibilité mène à la fois au désordre et à l'ordre.

- Lorsqu'une tempête tropicale soumise à de trop fortes contraintes atteint un point de bifurcation, de l'ordre apparaît ensuite sous la forme de l'œil et du mur d'un ouragan. Cet ensemble devient une gigantesque centrale thermique solaire, mobile sur la surface de l'océan.
- Lors de l'ouverture d'une soupape de sûreté, soumise à un déséquilibre important en pression, le fluide est laminé par l'étranglement au niveau du clapet. De l'énergie cinétique est dégradée essentiellement par viscosité : le désordre croît. Ce déséquilibre des pressions engendre d'autre part des structures visibles bien connues des aérodynamiciens: ce sont les jets supersoniques auto-organisés qui introduisent une part d'ordre dans le fluide.

Dans ces organes, dits de sécurité, ordre et désordre se côtoient. Cette situation mène à un conflit entre ces deux notions, cause de phénomènes complexes et spectaculaires, mais souvent dangereux [14, 23].

Le rôle constructif des phénomènes irréversibles loin de l'équilibre conduit à la formation de structures ordonnées qui freinent le retour à l'équilibre final en empêchant la nécessaire dissipation d'énergie de s'accomplir normalement aussi bien dans les ouragans que dans les soupapes.

Depuis 1984, les constructeurs de soupapes peuvent utiliser le principe de pire action qui, en supprimant l'ordre dans une structure dissipative, permet au fluide d'atteindre rapidement le point d'équilibre final. Il devient dès lors possible de dégrader rapidement et massivement l'énergie cinétique contenue dans les fluides. Son instrument, le dégradateur d'énergie cinétique, ou plus brièvement un vistemboir, crée un très grand désordre dans le monde microscopique en permettant ainsi d'échapper au chaos dans notre monde macroscopique.

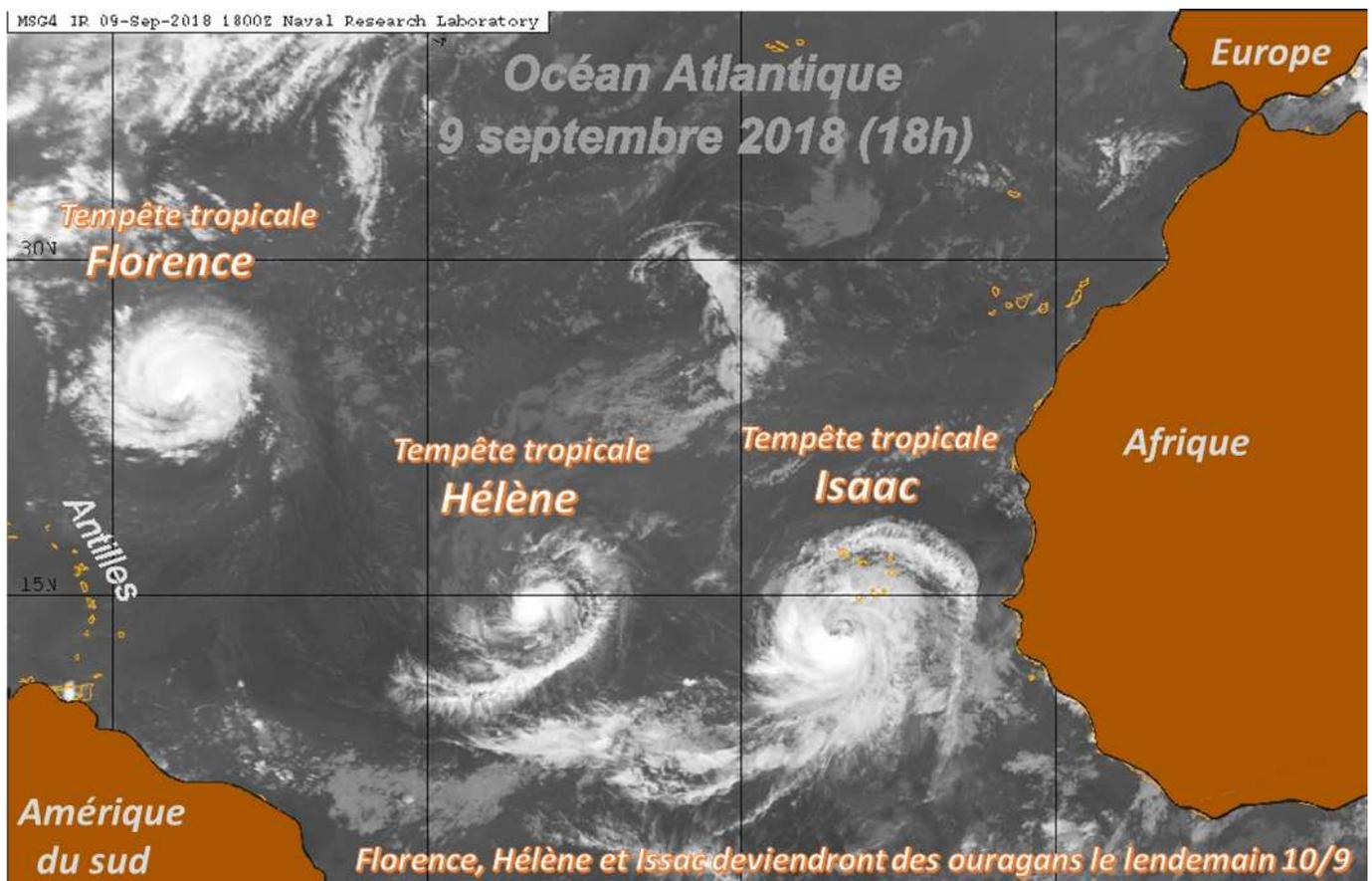
Le retour au calme qu'il est possible d'obtenir dans l'espace confiné d'une soupape peut-il être aussi envisagé dans le cas d'un ouragan, phénomène à ciel ouvert ?

Beaucoup d'autres chapitres restent à écrire sur ces phénomènes grandioses que la nature construit en mer, sous nos yeux.

Références

- [1] Gray W.M., 1968. "Global View of the Origin of Tropical Disturbances and Storms" Monthly Weather Review vol.96, Number 10, 669-700
- [2] Bougeault P., Sadourny R., 2001. "Dynamique de l'atmosphère et de l'océan" Les éditions de l'école polytechnique
- [3] Moreau R., 2013. "L'air et l'eau" edp sciences
- [4] Prigogine, I., Kondepudi D., (1999). "Thermodynamique - Des moteurs thermiques aux structures dissipatives" Odile Jacob.
- [5] Liu C., Liu Y., Luo Z., Lei X., Wang D., Zhou X., 2011. "Studies of the Hurricane Evolution Based on Modern Thermodynamics" Recent Hurricane Research, IntechOpen, DOI: 10.5772/15147 chap.9 171-196
- [6] De Groot, S.R. (1951). "Thermodynamics of irreversible processes" North-Holland Publishing Company.
- [7] Diu B., Guthmann C., Lederer D., Roulet B., (2001). "Physique statistique" Hermann
- [8] Alonso M., Finn E.J., (1992). "Physics" Addison-Wesley
- [9] Nicolis G., Prigogine I. (1989). "Exploring Complexity" Freeman
- [10] Wark K., (1977). "Thermodynamics" McGraw-Hill
- [11] Emanuel K., 2003. "Tropical Cyclone" Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 75-104
- [12] Roux F. and Viltard N., 1997. "Les cyclones tropicaux" La Météorologie 8^e série - n^o18 9-33
- [13] Laforest M., 2013. "Les ouragans : engins de destruction" Bulletin de l'association mathématique du Québec Vol. LIII, n^o2 25-42
- [14] Pluviose M., 2013. "A Positive Lesson from the Accident at Three Mile Island" Nuclear Exchange Sept.2013 and www.system3worlds.com/en/docs
- [15] Peitgen H-O., Jürgens H., Saupe D., 1993. "Chaos and Fractals - New Frontiers of Science" Springer-Verlag
- [16] Lugt H.J., 1983. "Vortex Flow in Nature and Technology" John Wiley and Sons, Inc.
- [17] Shea D.J., 1972. "The Structure and Dynamics of the Hurricane's Inner Cone Region" NOAA N22-65-72(G), Atm. Sci. Paper N^o 182
- [18] Pluviose M., 2018. "Applied Non-Equilibrium Thermodynamics (Hurricanes, Valves, etc.)" www.hurricane-physics.com

- [19] Oruba L., Davidson P.A., Dormy E. 2018. “On the Formation of Eyes in Large-scale Cyclonic Vortices” *Phys. Rev. Fluids*, 3, 013502 (2018)
- [20] Ren D., Lynch M., Leslie L.M, Lemarshall J., 2014. “Sensitivity of Tropical Cyclone Tracks and Intensity to Ocean Surface Temperature: Four Cases in Four Different Basins” *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanographie*, 66:1, 24212, DOI: 10.3402/tellusa.v66.24212 1-22
- [21] Kowch R., Emanuel K., 2015. “Are Special Processes at Work in the Rapid Intensification of Tropical Cyclones?” *Mon. Wea. Rev.*, 143, 878-882.
- [22] Kleinschmidt E.Jr, 1951. “Grundlagen einer Theorie des tropischen Zyklonen” *Arch. Meteorol., Geophys. Bioklimatol., Ser. A4* 53-72
- [23] Périlhon C., Descombes G., Pluviose M., 2014. “Using the Principle of Worst Action to Stabilize Control Valve Flows” *Valve World Conferences*, Dusseldorf, <http://turbo-moteurs.cnam.fr/ouvrages/index.html>



Une journée d’été sur l’océan Atlantique Nord



La Nature se dévoilant devant la Science

Sculpture de Louis-Ernest Barrias (1841-1905)
destinée à l'escalier d'honneur du
Conservatoire National des Arts et Métiers.