

La formation du savoir  
météorologique  
Inventions et transformations

Daniel Parrochia

Université Jean Moulin - Lyon III

# Plan de l'exposé

- 1. Introduction : Pourquoi s'intéresser à la météorologie?
- 2. A la découverte des météores, objets de la Météorologie
  - A. Constitution d'un champ d'objets
  - B. Les nouvelles classes de météores
    - 1. Les photométéores et la science de l'arc-en-ciel
    - 2. La découverte des électrométéores
- 3. La météorologie, science du changement et des circulations
  - A. La notion de « pression atmosphérique »
  - B. Cartes et réseaux
  - C. Les théories de l'atmosphère et de sa circulation
  - D. La météorologie moderne : turbulence et informatique
- 4. Conclusions

# Plan

- **1. Introduction : Pourquoi s'intéresser à la météorologie?**
- 2. A la découverte des météores, objets de la Météorologie
  - A. Constitution d'un champ d'objets
  - B. Les nouvelles classes de météores
    - 1. Les photométéores et la science de l'arc-en-ciel
    - 2. La découverte des électrométéores
- 3. La météorologie, science du changement et des circulations
  - A. La notion de « pression atmosphérique »
  - B. Cartes et réseaux
  - C. Les théories de l'atmosphère et de sa circulation
  - D. La météorologie moderne : turbulence et informatique
- 4. Conclusions

# Trois intérêts de la météorologie

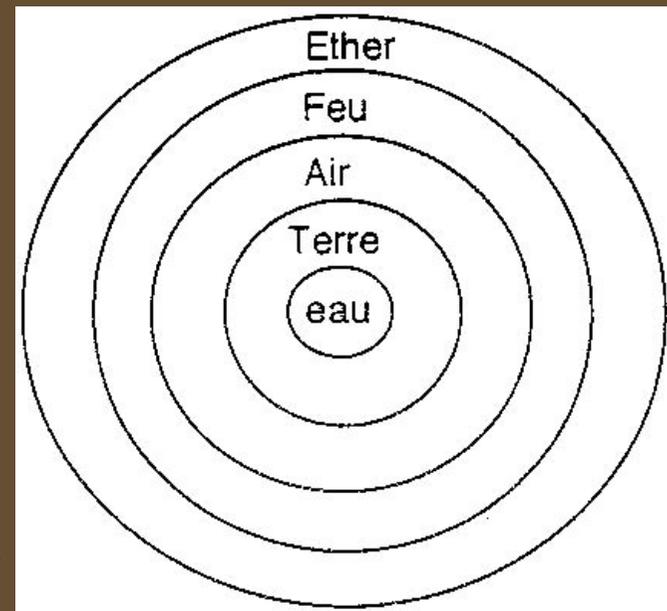
- Météorologie = science du temps qu'il fait, probablement l'une des plus importantes pour la société :
- Sur un plan économique et notamment en **matière de transport, d'agriculture et d'aménagement, d'écologie et de climatologie**, elle permet d'anticiper sur les désastres et de prévoir les évolutions du climat à long terme .
- Sur un plan scientifique, elle a mis au point des **méthodes** pour fixer le temps (insaisissable) dans l'espace (cartes) et traduire graphiquement des évolutions (théorie de la circulation atmosphérique) et des changements apparemment difficiles à prévoir et à maîtriser (turbulence, chaos déterministe).
- Sur un plan philosophique, cette discipline nous oblige à dépasser le clivage analytique des sciences pures et appliquées, et à coordonner différentes approches pour décrire des réalités systémiques (le système terre-atmosphère et ses interactions avec les hommes).

# Plan

- 1. Introduction : Pourquoi s'intéresser à la météorologie?
- **2. A la découverte des météores, objets de la Météorologie**
  - **A. Constitution d'un champ d'objets**
  - B. Les nouvelles classes de météores
    - 1. Les photométéores et la science de l'arc-en-ciel
    - 2. La découverte des électrométéores
- 3. La météorologie, science du changement et des circulations
  - A. La notion de « pression atmosphérique »
  - B. Cartes et réseaux
  - C. Les théories de l'atmosphère et de sa circulation
  - D. La météorologie moderne : turbulence et informatique
- 4. Conclusions

# La délimitation du champ

- Météorologie : science des météores (du grec météôra, élevé dans le ciel).
- Première délimitation de ce champ d'objets : Aristote, *Traité du Ciel*, I,2
- Ether ---> Monde supralunaire
- Autres éléments ----> Monde sublunaire (Météores)
- Domaine du changeant et de l'incertain par opposition au monde des régularités astronomiques



# Une classification initiale erronée

- Les premières météorologies (Aristote, Descartes) classent les météores en trois classes (cf la distinction des Eléments) :
  1. Les phénomènes du type « eau » (nuages, pluie, grésil, grêle, neige...) [hydrométéores]
  2. Les phénomènes du type « feu » (arc-en-ciel, éclairs, feu Saint-Elme, étoiles filantes, voie lactée...)
  3. Les phénomènes du type « terre » ( exhalaison sèche, vent de poussières, vent de sable, etc.) [lithométéores]
- De la classe (2) :
  - vont être bannis les phénomènes purement astronomiques
  - Le reste sera scindé en 2 : photométéores + électrométéores

# Plan

- 1. Introduction : Pourquoi s'intéresser à la météorologie?
- **2. A la découverte des météores, objets de la Météorologie**
  - A. Constitution d'un champ d'objets
  - **B. Les nouvelles classes de météores**
    - **1. Les photométéores et la science de l'arc-en-ciel**
    - 2. La découverte des électrométéores
- 3. La météorologie, science du changement et des circulations
  - A. La notion de « pression atmosphérique »
  - B. Cartes et réseaux
  - C. Les théories de l'atmosphère et de sa circulation
  - D. La météorologie moderne : turbulence et informatique
- 4. Conclusions

# La théorie de l'arc-en-ciel

## Descartes, Météores, Discours VI

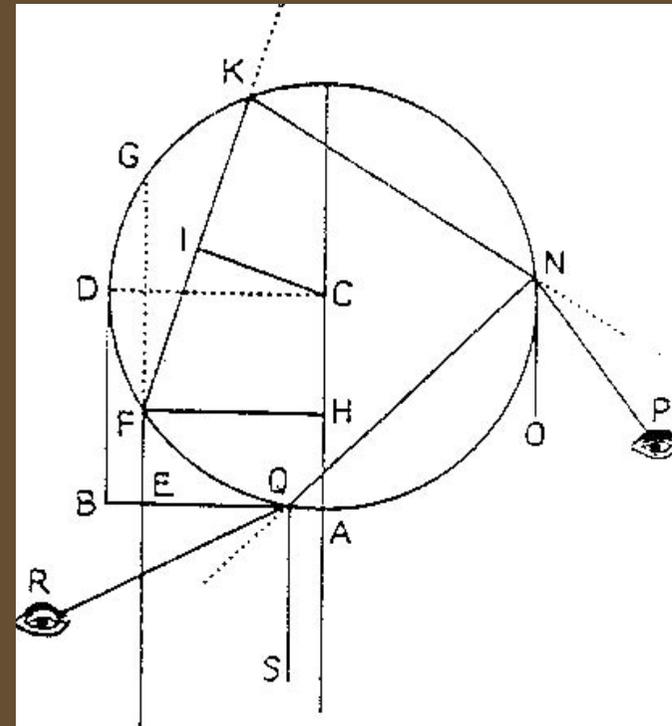
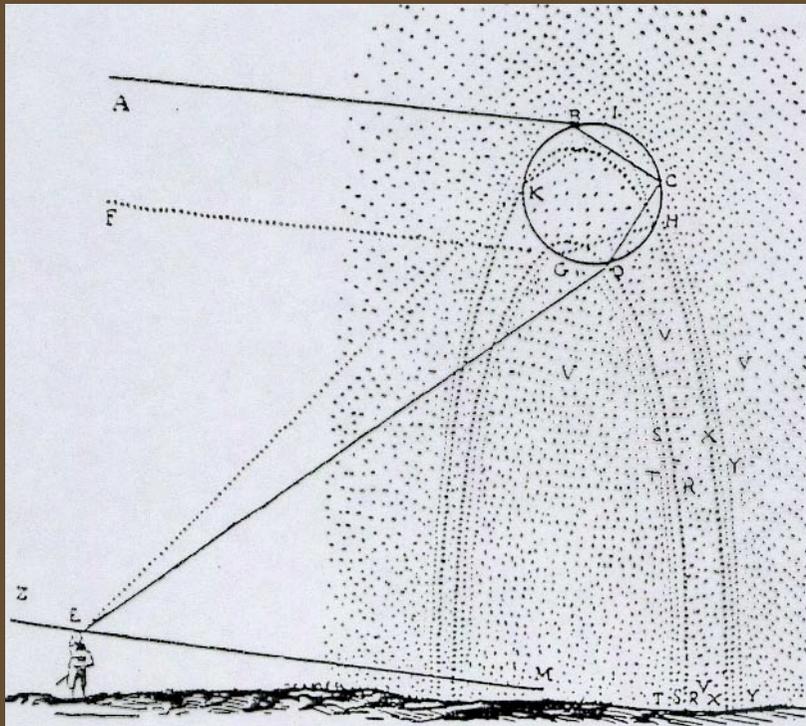
- Au XVII<sup>e</sup> siècle, la théorie de l'arc-en-ciel est une première occasion de se séparer du schéma aristotélicien. Descartes introduit ainsi deux grandes innovations :
- 1° L'arc-en-ciel s'explique par la géométrie. Dans le sillage de Galilée, il montre ainsi que les mathématiques ne sont pas simplement un domaine en soi mais s'appliquent au réel;
- 2° L'explication de l'arc-en-ciel est une illustration de la fameuse « méthode » cartésienne et de ses quatre règles (intuition, division, déduction, énumération).

# L'application de la méthode

Grâce à cette méthode, Descartes montre successivement que:

- 1) L'arc-en-ciel n'est pas lié au ciel mais ne provient que de la manière dont des rayons de lumière agissent sur des gouttes de liquide (l'eau en général) et, de là, tendent vers les yeux. [intuition]
- 2) La seule considération d'*un* rayon, et de quelques gouttes (voire *une* goutte) suffit à décrire le phénomène. Celui-ci est constitué par deux arcs, l'un produit par une réflexion et deux réfractions, et l'autre par deux réflexions et deux réfractions sous des angles de  $42^\circ$  et  $52^\circ$  environ (car c'est là qu'on reçoit le plus de rayons lumineux). [division]

# Le schéma de l'arc-en-ciel



# Qu'est-ce qu'un arc-en-ciel?

- L'arc-en-ciel est un phénomène de décomposition du spectre lumineux en ses différentes couleurs, tout comme le prisme avec lequel Descartes le compare. Pour faire un arc-en-ciel il faut :
- a) de la lumière;
- b) de l'ombre ou une limitation de cette lumière
- c) une réfraction (et une réfraction dont l'effet ne soit pas détruit par une réfraction contraire);
- Fidèle à sa théorie corpusculaire de la lumière, Descartes croit pouvoir déduire de l'ordre des couleurs de l'arc-en-ciel un tournoiement plus ou moins rapide des particules : celles qui tourneraient plus vite produiraient le rouge, un peu moins vite le jaune, etc., jusqu'au bleu et au violet.

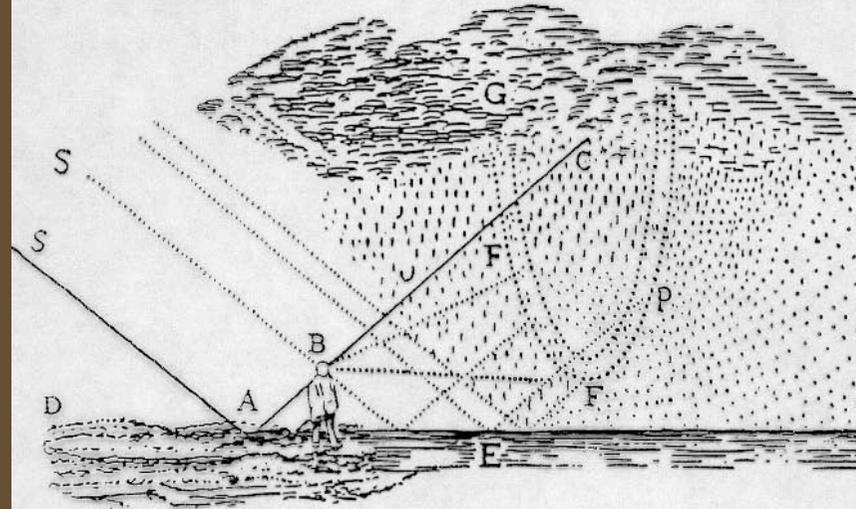
[Dédution]

# Les irrégularités

- Enfin [énumération], il rend compte également des irrégularités parfois remarquées dans ce météore :
- a) Si l'arc n'est pas totalement demi-circulaire, c'est probablement qu'il y a du vent, qui fait osciller les gouttes de pluies et induit des déformations.
- b) S'il arrive qu'on voie un arc inversé, avec les cornes en haut, c'est probablement qu'il est réfléchi, par exemple par la mer ou par un plan d'eau.
- Descartes suggère pour finir que, par temps de grêle mêlé de pluie, la réfraction de grêlons bien ronds et bien transparents étant plus forte que celle de l'eau, aux deux arcs-en-ciel de pluie peut se surajouter un arc-en-ciel visible beaucoup plus grand que les deux autres, tandis que le son frère jumeau, beaucoup plus petit et d'intensité beaucoup plus faible, se trouve dissimulé.

# Les reflets inversés

On a vu aussi quelquefois, à ce qu'on m'a dit, un arc-en-ciel tellement renversé que ses cornes étaient tournées vers en haut comme est ici représenté FF. Ce que je ne saurais juger être arrivé que par la réflexion des rayons du soleil donnant sur l'eau de la mer, ou de quelque lac. Comme si, venant de la partie du ciel SS, ils tombent sur l'eau DAE, et de là, se réfléchissent vers la pluie CF, l'œil verra l'arc FF, dont le centre est au point C, en sorte qu'



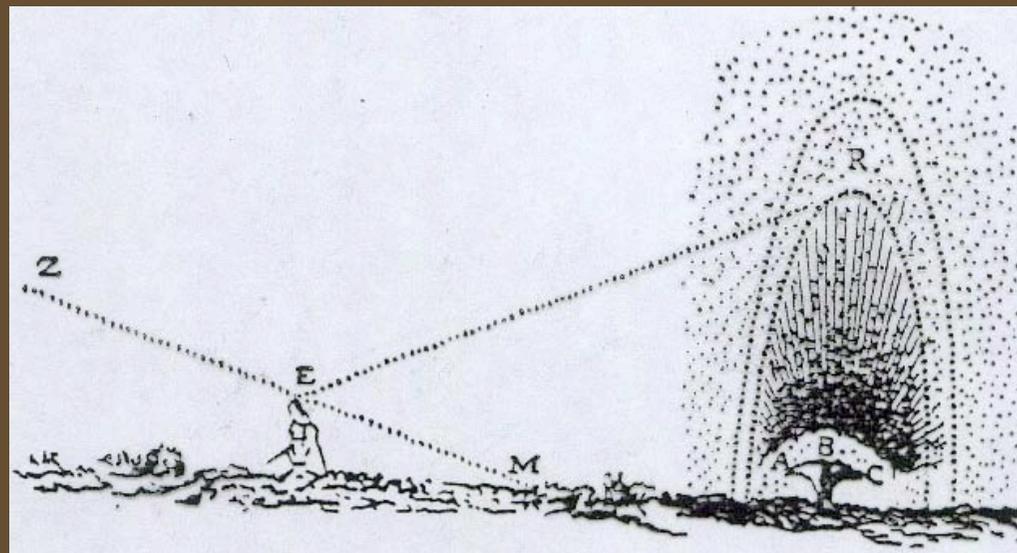
CB étant prolongée jusques à A, et AS passant par le centre du soleil, les angles SAD et BAE soient égaux, et que l'angle CBF soit d'environ 42 degrés. Toutefois il est aussi requis à cet effet, qu'il n'y ait point du tourbillon de vent qui trouble la face de l'eau vers E, et peut-être avec cela qu'il y ait quelque nue, comme G, qui empêche que la lumière du soleil, allant en ligne droite vers la pluie, n'efface celle que cette eau E y envoie : d'où il vient qu'il n'arrive que rarement.

# L'arc-en-ciel artificiel

Cette variation possible des réfractions lui suggère alors de passer de la Nature à l'Artifice.

Il imagine une invention qui permettrait de faire apparaître des «signes dans le ciel», en utilisant diverses fontaines comportant des liquides de réfraction différente (eaux-de-vie, huiles, liqueurs, etc.).

Ces fontaines autoriseraient donc, combinées ensemble, la production de figures dans l'espace – tout un spectacle lumineux propre à impressionner les foules.



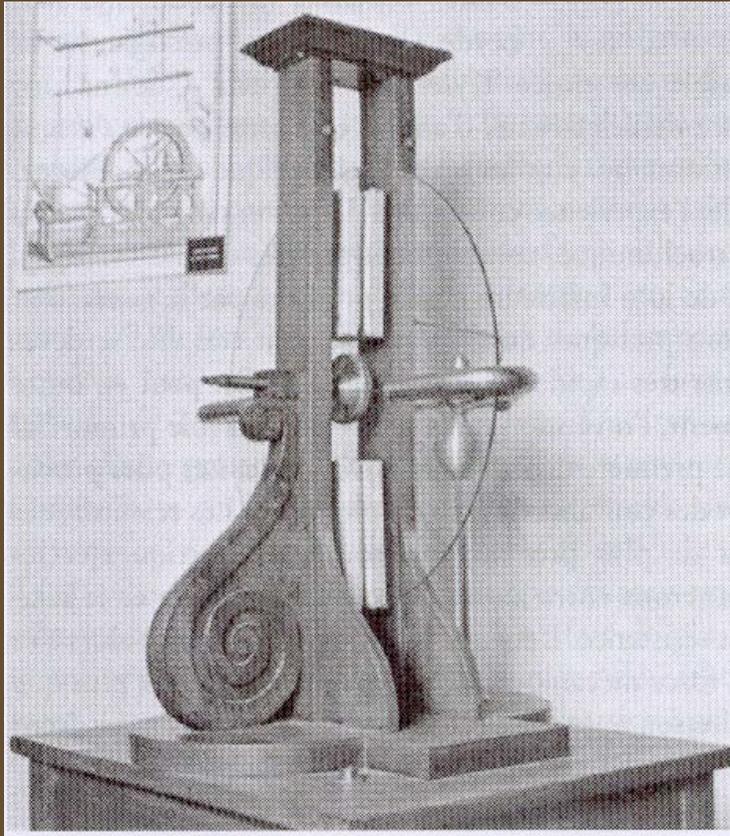
# Plan

- 1. Introduction : Pourquoi s'intéresser à la météorologie?
- **2. A la découverte des météores, objets de la Météorologie**
  - A. Constitution d'un champ d'objets
  - **B. Les nouvelles classes de météores**
    - 1. Les photométéores et la science de l'arc-en-ciel
    - **2. La découverte des électrométéores**
- 3. La météorologie, science du changement et des circulations
  - A. La notion de « pression atmosphérique »
  - B. Cartes et réseaux
  - C. Les théories de l'atmosphère et de sa circulation
  - D. La météorologie moderne : turbulence et informatique
- 4. Conclusions

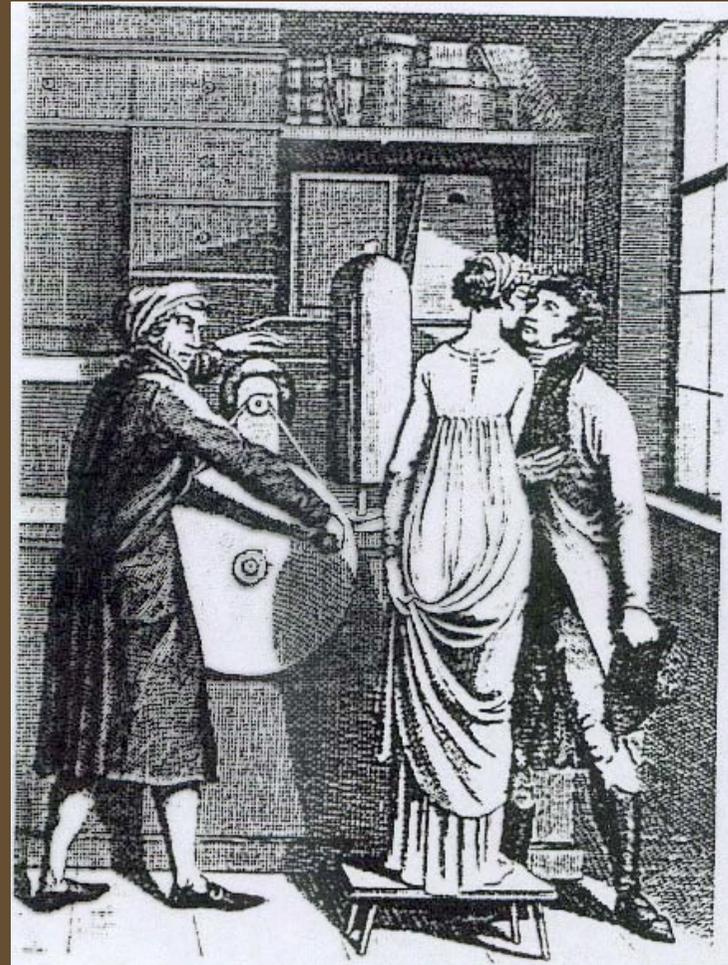
# La découverte de l'électricité

- Au XVII<sup>e</sup> siècle, Descartes croyait encore, comme Aristote, en l'existence d'une exhalaison sèche, responsable de phénomène de type "feu" : l'éclair, la foudre, les feux Saint-Elme, etc.
- Dès la fin du XVII<sup>e</sup> siècle, cependant, les phénomènes électriques commencent à être mis en évidence.
- Le physicien allemand Otto von Guericke, en particulier, invente une machine faite d'un globe de soufre ou de verre traversé par une tige que l'on pouvait faire tourner avec une manivelle et capable de se charger d'une électricité qu'on pouvait ensuite décharger en la touchant. C'est le point de départ d'expériences inoubliables.

# Les premières machines électriques



L'une des premières machines électrostatiques  
La machine de Ramsden (1768)

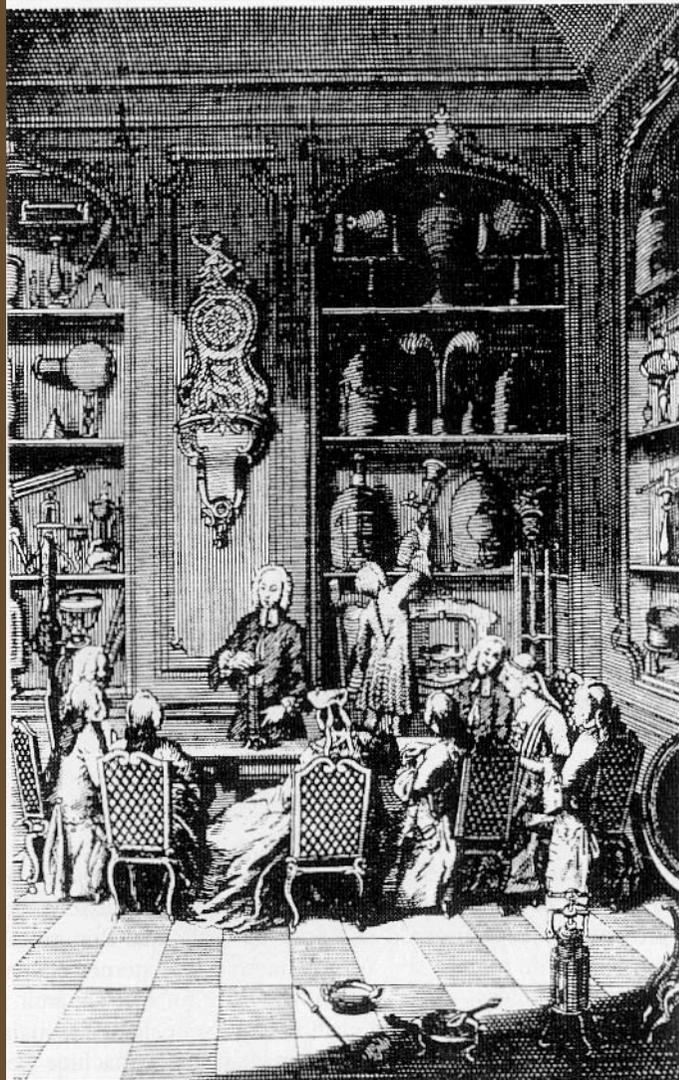


Le baiser électrique

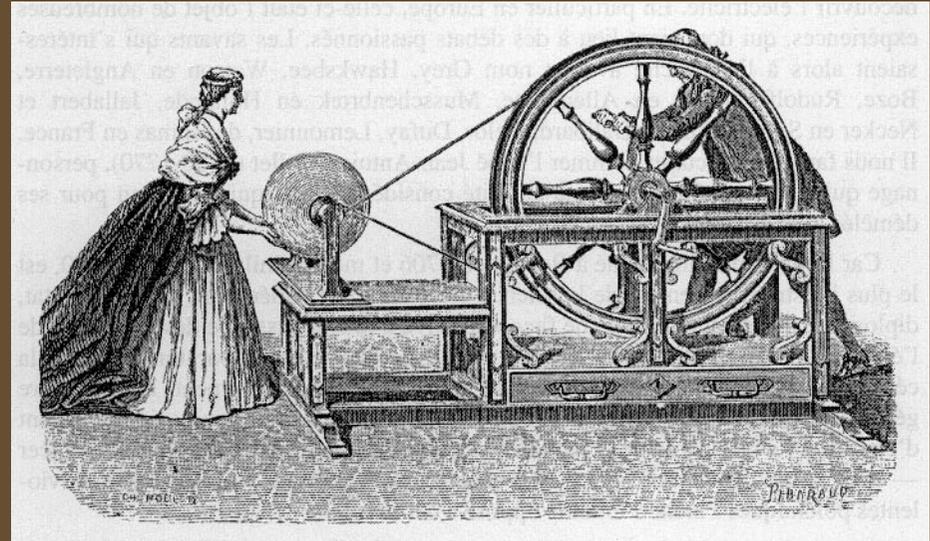
# La bouteille de Leyde

- Au XVIIIe, l'abbé Nollet (1700-1770), professeur de physique, perfectionne l'invention de von Guericke.
- Puis Pieter von Musscherbrœk invente la célèbre «bouteille de Leyde», flacon de verre rempli d'eau ou de grenaille de plomb, dont les surfaces internes et externes étaient revêtues de feuilles de métal nommé «armatures».

# L'abbé Nollet dans ses œuvres



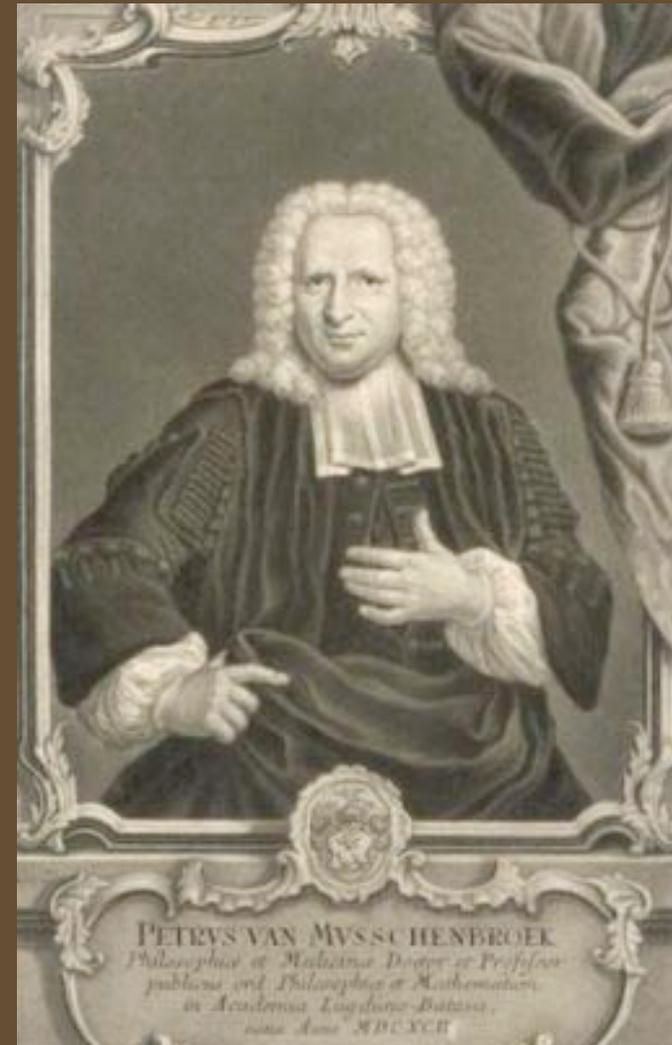
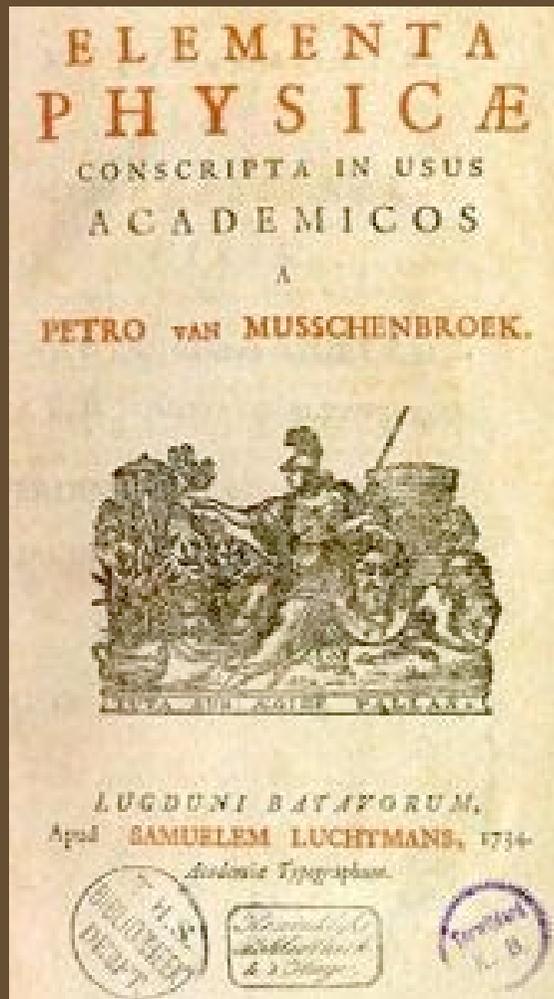
Le cours de physique de l'Abbé Nollet



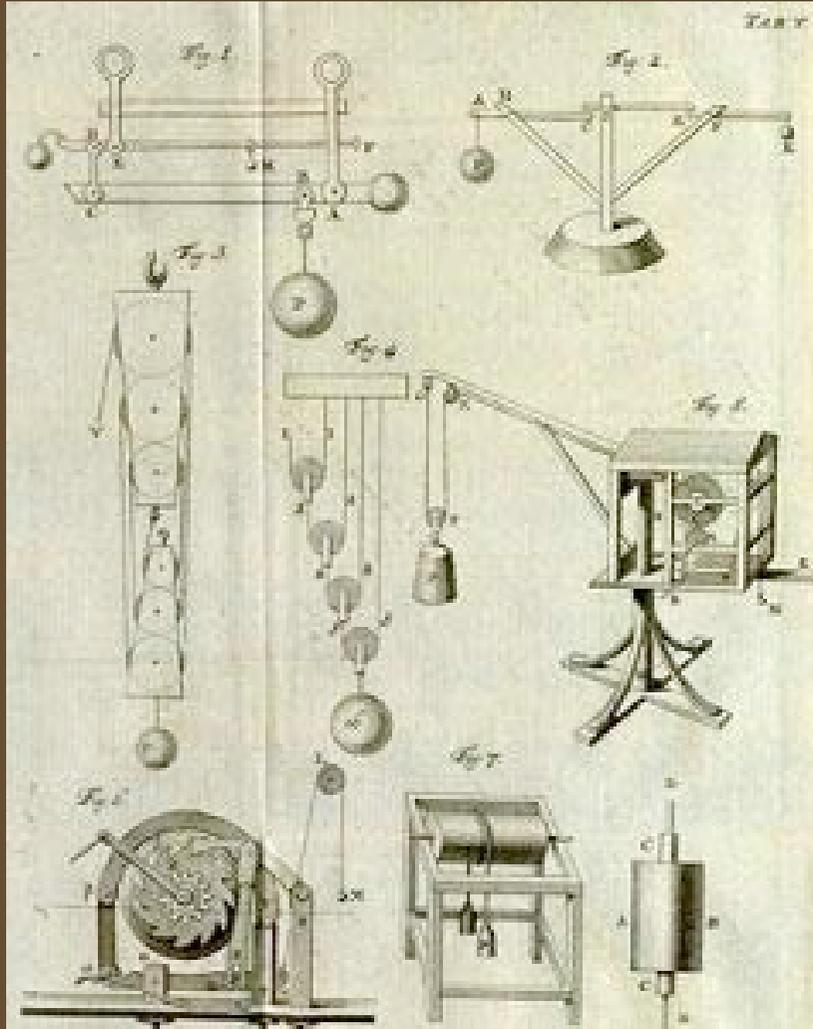
La machine de l'Abbé Jean-Antoine Nollet`  
(1700-1770)

# Un théoricien et expérimentateur

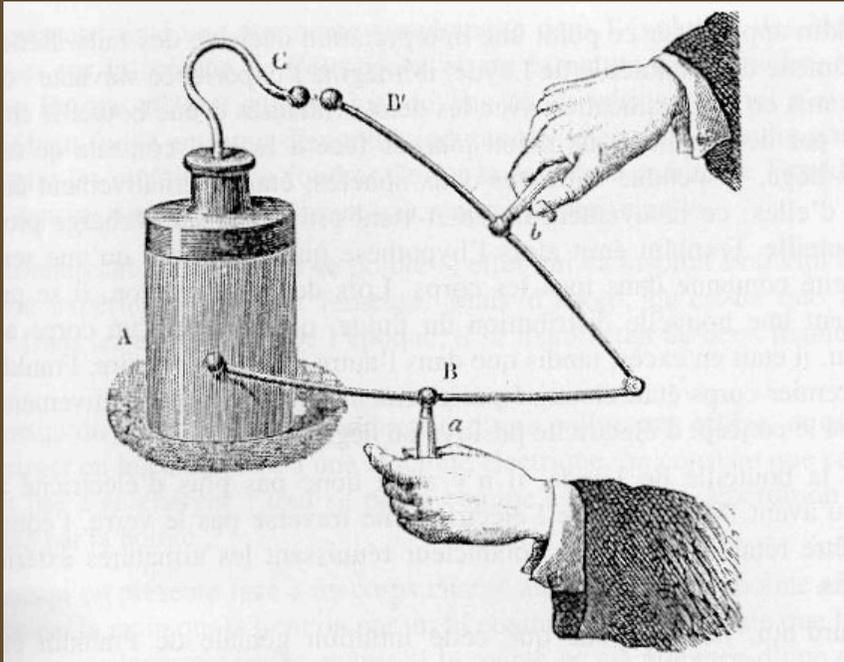
## P. van Musschenbroek



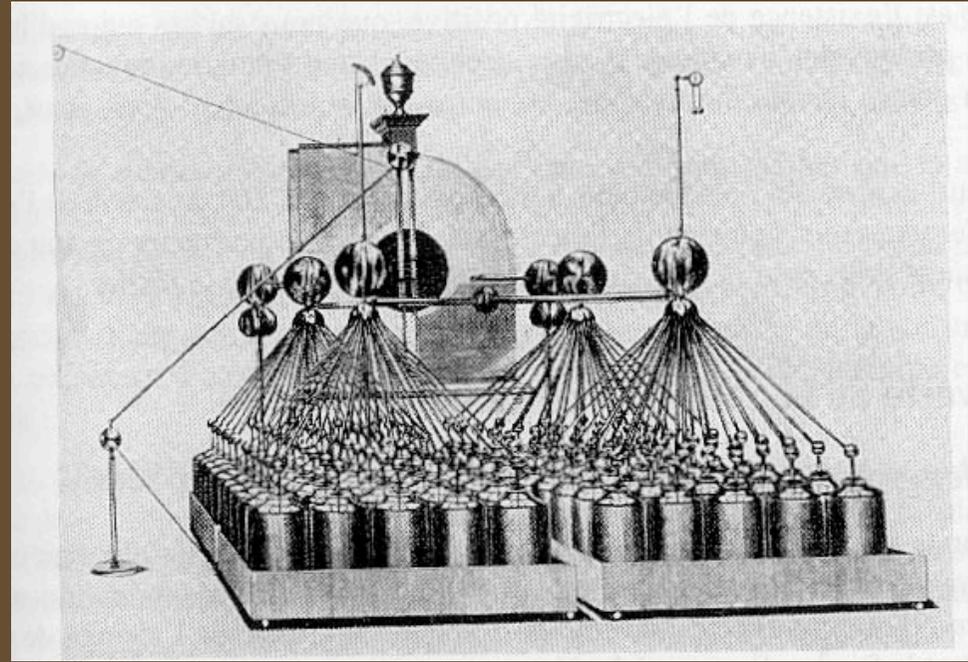
# Instruments scientifiques



# Vers la batterie d'accumulateurs



Bouteille de Leyde



Une « batterie » de  
bouteilles de Leyde

# Le problème de la foudre

- Au XVIIe s., Descartes (*Météores*) reproduit encore la vieille théorie de Sénèque :
- Le tonnerre se manifeste quand des nuages plus lourds et plus élevés tombent sur d'autres placés plus bas.
- Dans ce contexte, l'air contenu entre les deux nuages est comprimé par cette chute soudaine.
- Cet air produit alors un grand dégagement de chaleur, d'où résultent la lumière de l'éclair et le bruit du tonnerre.
- Cette théorie erronée va être remise en question au XVIIIe par Nollet et Franklin.

# Les effets de pointe

- En 1748, l'abbé Nollet, frappé par les ressemblance entre la foudre et les étincelles produites en laboratoire avait dressé une liste de leurs similitudes.
- On connaissait déjà, à l'époque, l'effet de pointe, qui fait que les objets pointus ont de la difficulté à se charger en électricité et de la facilité à décharger les corps chargés (les pointes attirent le fluide électrique). La lueur bleuâtre qui accompagne ces phénomènes rappelle d'ailleurs les feux St Elme.

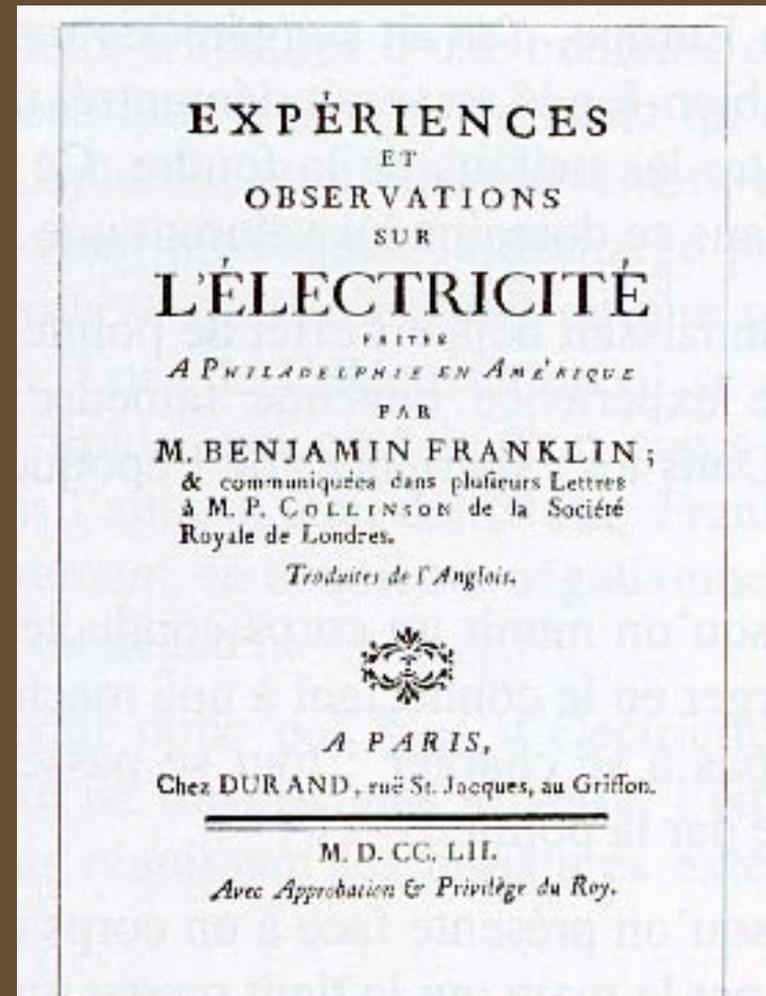
# Une idée de Franklin

- Franklin eut donc l'idée d'utiliser cet «effet de pointe» pour vérifier le caractère électrique des nuages orageux.
- L'expérience qu'il suggéra fut réalisée par plusieurs français (notamment Dalibard et Coiffier, le 10 mai 1752 à Marly), et l'abbé Raullet, curé de Marly, tira des étincelles de la pointe dressée vers les nuages (ailleurs on utilisa aussi des cerfs-volants) jusqu'à la fin de l'orage.

# L'inventeur du paratonnerre



Benjamin Franklin  
(1706-1790)

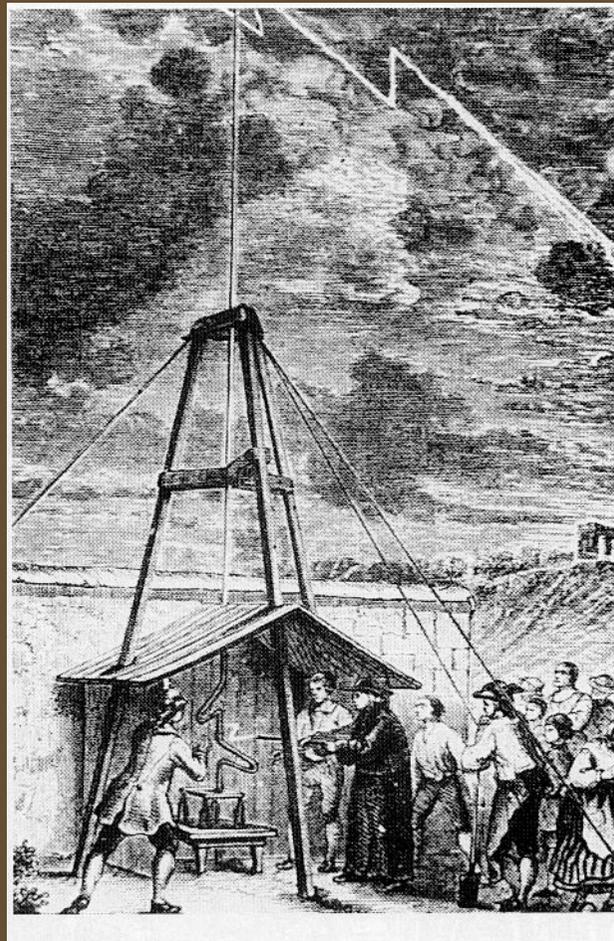


# Une expérience dangereuse

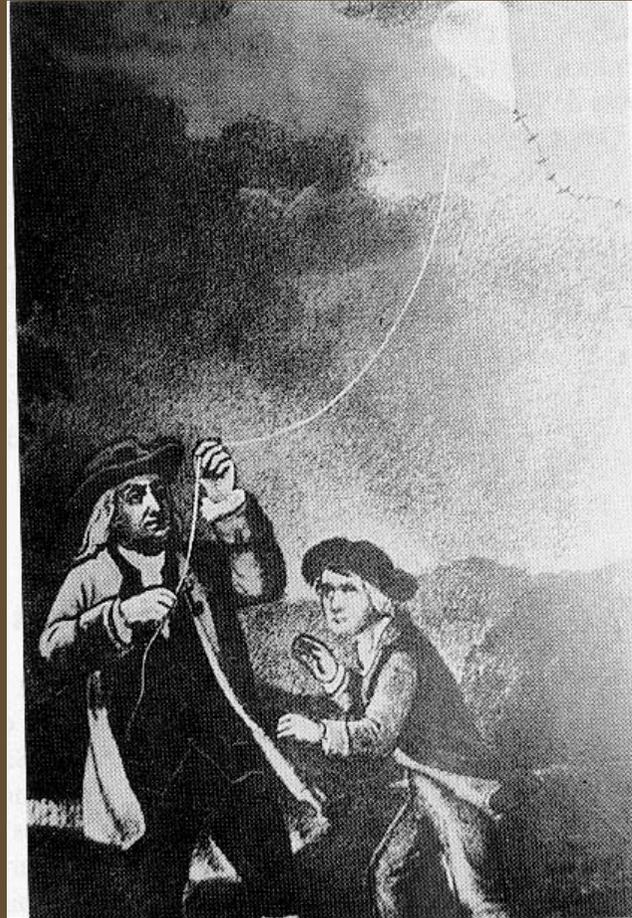
- «Au sommet de quelque tour ou clocher, qu'on place une sorte de guérite, assez grande pour contenir un homme et une plate-forme. Au centre de la plate-forme, qu'on dresse une tige de fer (...) d'une longueur de 20 ou 30 pieds très pointue à son extrémité, reposant sur un tabouret isolant... »

Benjamin Franklin

# L'expérience de Marly (1752)



# L'expérience du cerf-volant



# La mode du paratonnerre

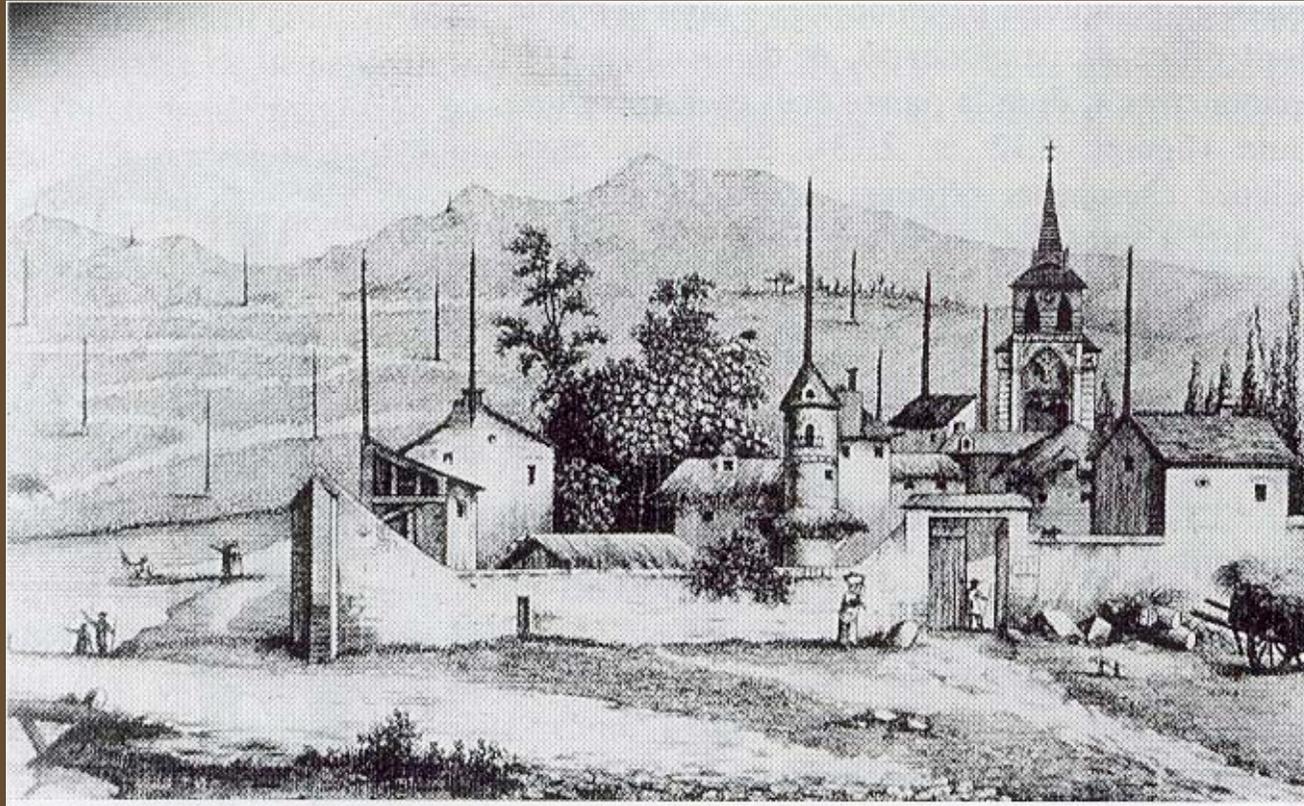


Le chapeau-paratonnerre



Le parapluie-paratonnerre

# Une légère paranoïa?



Paysage avec paratonnerres

# Classification des météores

- A la fin du XVIIIe siècle, le champ d'objets de la météorologie est donc bien délimité.
- 4 grandes classes de météores le constituent :
  - Hydrométéores (pluie, neige, grêle, grésil...)
  - Les lithométéores (brume sèche, chasse-poussière, chasse-sable, tempête ou tourbillon de poussière ou de sable)
  - Les photométéores
    - Effets de diffusion optique par les nuages et l'atmosphère inférieure (ar-en-ciel, halo, couronne, gloire, irisations,...)
    - Effets de diffusion et réfraction de la lumière par l'air lui-même (Scintillation, tremblottement, rayon vert, teintes et rayons crépusculaires,...)
  - Les électrométéores
    - Décharges discontinues (éclairs, tonnerre)
    - Décharges continues (Feu Saint-Elme, aurores polaires)

# Plan

- 1. Introduction : Pourquoi s'intéresser à la météorologie?
- 2. A la découverte des météores, objets de la Météorologie
  - A. Constitution d'un champ d'objets
  - B. Les nouvelles classes de météores
    - 1. Les photométéores et la science de l'arc-en-ciel
    - 2. La découverte des électrométéores
- **3. La météorologie, science du changement et des circulations**
  - A. La notion de « pression atmosphérique »
  - B. Cartes et réseaux
  - C. Les théories de l'atmosphère et de sa circulation
  - D. La météorologie moderne : turbulence et informatique
- 4. Conclusions

# Les conditions de la prévision

- Avant le XIXe siècle et la naissance de la thermodynamique, on ne comprend pas bien le mécanisme des vents et la circulation générale de l'atmosphère. Dès lors, il est difficile d'avoir une météorologie qui puisse faire des prévisions exactes.
- Pour pouvoir faire des prévisions fiables, il faudra :
- 1) La notion de pression atmosphérique (Torricelli - Pascal).
- 2) Des méthodes de cartographie synoptiques et une organisation en réseau (Borda, Lavoisier, Brandes, Le Verrier, Maury).
- 3) Une théorie de la circulation de l'atmosphère (Elle progressera de Halley et Hadley jusqu'à Bjerknès)
- 4) Un progrès de la physique des systèmes dynamiques (théorie du chaos) et des moyens informatiques puissants

# Plan

- 1. Introduction : Pourquoi s'intéresser à la météorologie?
- 2. A la découverte des météores, objets de la Météorologie
  - A. Constitution d'un champ d'objets
  - B. Les nouvelles classes de météores
    - 1. Les photométéores et la science de l'arc-en-ciel
    - 2. La découverte des électrométéores
- **3. La météorologie, science du changement et des circulations**
  - **A. La notion de « pression atmosphérique »**
  - B. Cartes et réseaux
  - C. Les théories de l'atmosphère et de sa circulation
  - D. La météorologie moderne : turbulence et informatique
- 4. Conclusions

# Le problème des fontainiers de Florence

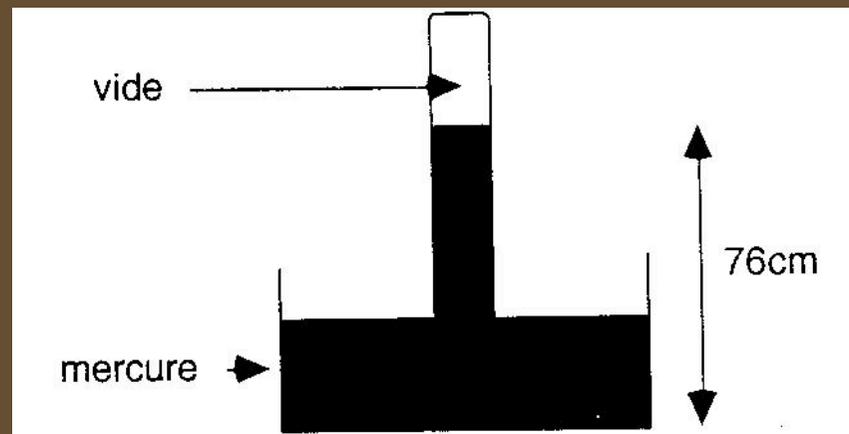
- Italie, années 1640 : Les fontainiers de Florence constatent qu'il n'est plus possible, au-delà d'une certaine hauteur (de l'ordre d'une dizaine de mètres), d'extraire de l'eau d'un puits et de la faire monter dans une fontaine.
- La physique aristotélicienne alors en vigueur repose sur deux postulats :
  - 1) le monde est plein
  - 2) la Nature a horreur du vide
- D'où l'idée que l'eau (ou tout autre corps) doit nécessairement se précipiter dans les corps creux qu'on utilise. Mais les florentins du XVIIe siècle, le grand duc Ferdinand II de Toscane et Galilée lui-même doivent constater qu'au-delà de dix mètres de hauteur, la Nature n'a plus horreur du vide. Galilée confie le problème à l'un de ses disciples, Evangelista Torricelli.

# Explication de Torricelli

- Si l'eau monte dans les tuyaux des fontainiers de Florence, ce n'est pas parce que la Nature a horreur du vide, c'est parce qu'on l'y contraint, autrement dit parce qu'il existe une **force** qui entraîne le liquide dans le tuyau, un peu comme lorsqu'une pompe aspirante y fait un vide partiel (on commence, au XVIIe siècle, à voir apparaître des pompes à vide).
- Cette force, Torricelli l'attribue à la **pression de l'air** exercée sur l'eau.

# L'expérience du vide

- En 1644, Torricelli conçoit une expérience simple, destinée à vérifier cette hypothèse. Il décide d'utiliser du mercure liquide, qui est 14 fois plus dense que l'eau et d'en remplir un tube fermé à l'une de ses extrémités, puis de le retourner dans un bassin.
- Torricelli constate alors que le niveau du liquide descend jusqu'à une hauteur de 76cm soit environ 1/14e des fameux dix mètres d'eau au-delà desquels l'aspiration ne se faisait plus.



# Conclusions de Torricelli

Torricelli en conclut que c'est, dans les deux cas, la pression de l'air qui équilibre la colonne d'eau ou la colonne de mercure et que cela signifie, contrairement à l'hypothèse aristotélicienne :

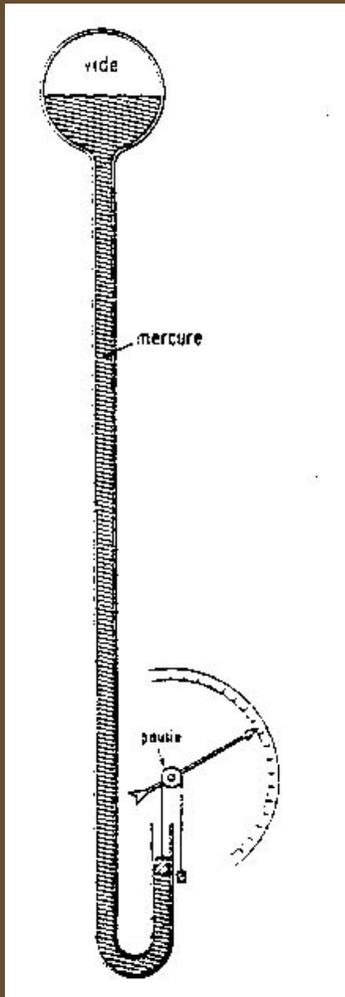
- 1° que l'air a un poids et qu'il peut exercer une pression ;
- 2° que le vide peut exister dans la Nature, puisque, rien ne peut remplir le sommet du tube retourné.

# Conséquences philosophiques

- C'est là le point de départ d'un grand bouleversement dans la connaissance, non seulement dans la physique et dans la météorologie mais aussi dans la philosophie.
- L'existence d'un vide dans la Nature précipite l'effondrement du système aristotélicien d'explication du monde qui avait été déjà fort mis à mal par la révolution galiléenne;
- Elle sonne aussi la fin de la croyance en un monde plein et continu auquel croyait encore les cartésiens mais que Pascal remet en cause.
- Elle permet l'avènement d'une météorologie scientifique prévisionnelle qui va reposer d'abord sur un unique instrument : le baromètre.

Avec le baromètre on accèdera une explication quantitative des vents ou mouvements de l'air résultant d'une différence de pression.

# Le baromètre



- Le premier baromètre a été imaginé et construit par Hooke, assistant du physicien Boyle, en 1665 à Oxford. Le principe est extrêmement simple. Ce baromètre est composé d'un long tube à mercure recourbé comme une canne et dont la colonne pèse sur un petit cylindre flottant à la surface libre inférieure du mercure. Ce petit cylindre est relié à une poulie par un fil tendu par un contrepoids. Et sur cette poulie se trouve fixée une aiguille qui se déplace sur un cadran. Quand la colonne de mercure subit les variations de la pression atmosphérique, la position de l'aiguille est modifiée sur le cadran.

# Plan

- 1. Introduction : Pourquoi s'intéresser à la météorologie?
- 2. A la découverte des météores, objets de la Météorologie
  - A. Constitution d'un champ d'objets
  - B. Les nouvelles classes de météores
    - 1. Les photométéores et la science de l'arc-en-ciel
    - 2. La découverte des électrométéores
- **3. La météorologie, science du changement et des circulations**
  - A. La notion de « pression atmosphérique »
  - **B. Cartes et réseaux**
  - C. Les théories de l'atmosphère et de sa circulation
  - D. La météorologie moderne : turbulence et informatique
- 4. Conclusions

# Vers une météorologie scientifique

- Une météorologie vraiment scientifique va naître dès la fin du XVIIIe siècle. C'est l'époque où Borda et Lavoisier commencent à faire des observations systématiques de pressions aux extrémités de la France et font les constatations suivantes.
  - 1) Les variations barométriques sont successives;
  - 2) Elles ne sont pas périodiques (=> pas d'autonomie propre)
  - 3) Elles sont liées à la force et à la direction des vents;
  - 4) Elles manifestent un changement permanent (=> L'atmosphère est toujours en déséquilibre).
- L'idée d'inscrire ces variations de l'atmosphère sur des cartes est présente dès cette époque.

# De nouvelles cartes

- Humboldt dans ses observations sur le climat du Pérou (Voyages dans l'Amérique équinoxiale) est à l'origine du concept de lignes d'égale température ( isothermes).
- Brandes, professeur à Breslau, étudie le temps de l'Europe de 1783 et, à partir d'une série de relevés, tente d'inscrire les changements successifs. Il invente successivement :
  - Les lignes d'égale pression (isobares)
  - Les lignes d'égales précipitations (isohyètes ou isoplèthes)
- Hildebransson et Teisserenc de Bort, en 1898, en traçant les cartes correspondant aux relevés de Brandes, vont révéler tout l'intérêt de ses observations.

# L'œuvre de Brandes

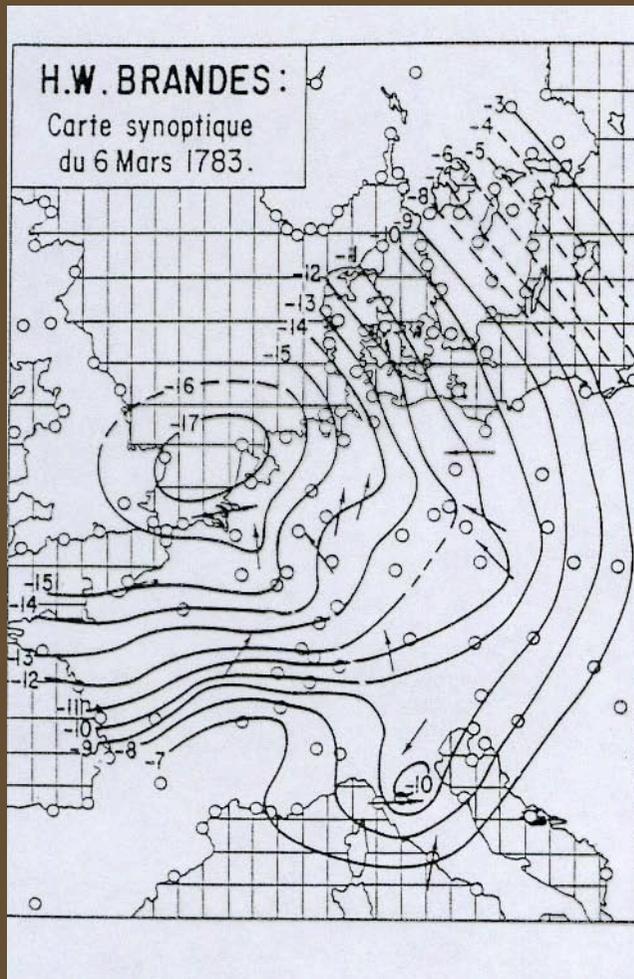


FIG. 2. — *Spécimen de carte synoptique con-*  
*par BRANDES en 1820, reconstituée par HILDEBRAND*  
*D'après HILDEBRANDSSON et TEISSERENC DE*  
*(1907).*

Les courbes représentent la répartition de l'anc  
de la pression atmosphérique au niveau du soi (é  
la valeur moyenne pour chaque station, exprir  
lignes de mercure), différant très peu de la répar  
de la pression réduite au niveau de la mer utilisée au  
d'hui et d'ailleurs introduite par BRANDES lui-  
dans un travail ultérieur. Les flèches indiquent la  
tion du vent, et les petits cercles marquent les em;  
ments des stations utilisées.

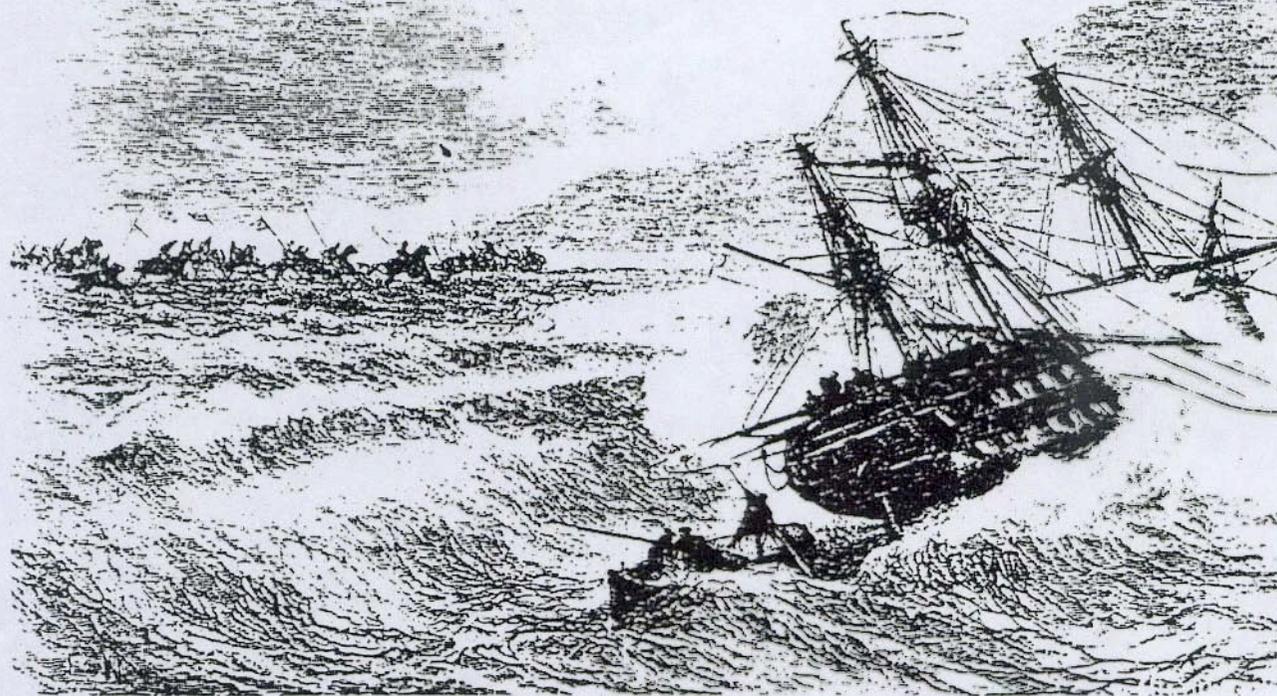
# Le développement des réseaux

- On assiste alors au développement des communications rapides.
- Le télégraphe de Claude Chappe (1763-1805), dont la Convention révolutionnaire (Lakanal et Romme) voit tout de suite l'intérêt est bientôt perfectionné grâce à l'invention du télégraphe électrique (Samuel Morse, 1844), et on assiste à l'établissement de véritables services météorologiques dès le milieu du XIXe.
- C'est l'époque où, en Angleterre comme aux Etats-Unis, on publie les premiers bulletins météorologiques.

# L'impulsion de Le Verrier

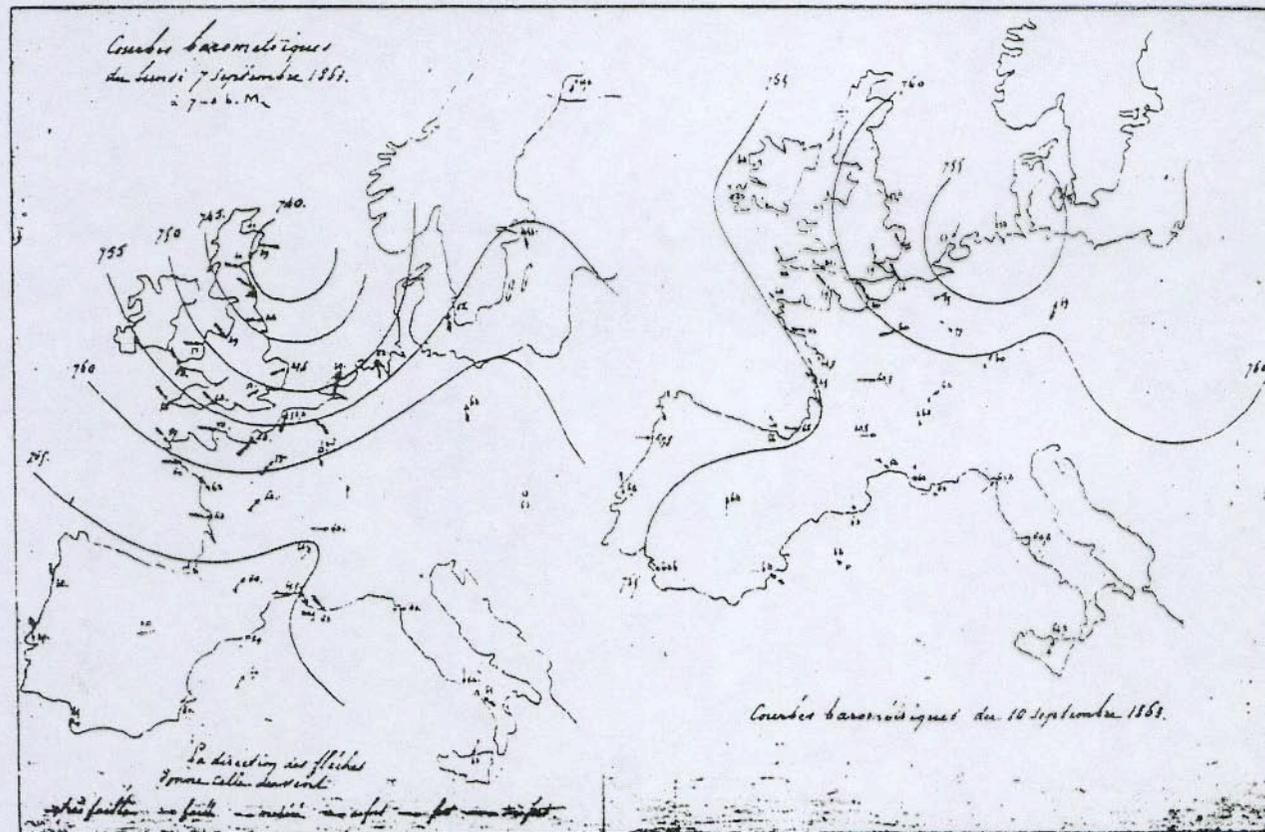
- Un français a particulièrement contribué au développement des réseaux : Le Verrier (1811-1877) qui, en 1853, est appelé à la tête de l'Observatoire de Paris.
- Un événement sert ses objectifs : Le 14 novembre 1854, alors que la France est en guerre contre la Russie en Crimée, une violente tempête anéantit 38 navires et 3 vaisseaux de guerre français, dont le Henri IV, fleuron de la flotte. Le Verrier télégraphie partout pour obtenir des informations météorologiques sur la journée du 14 novembre et, fort de 250 réponses, arrive à reconstituer le parcours de la tempête. Il parvient alors à convaincre les autorités qu'un réseau météorologique mondial aurait permis d'éviter la catastrophe et travaille dès lors, avec leur concours à la constitution d'un tel réseau.

# Le naufrage du Henri IV



Naufrage du *Henri-IV* le 13 novembre 1854.

# La carte du désastre



Courbes barométriques du 7 septembre 1863 et du 10 septembre 1863  
(photo Météo-France).

# Naissance de la météorologie maritime

- Aux Etats-Unis, Matthew Fontaine Maury, ancien officier de marine, aura été le grand initiateur de la météorologie maritime. De 1844 à 1861, Maury collecte une masse de données sur l'Atlantique nord à partir de l'étude des journaux de bord des navires. Il note la direction des vents, la nébulosité, l'état de la mer, les températures etc. et dresse un véritable quadrillage de l'océan par carreau de 5° de latitude et de longitude.
- Ceci amène des bénéfices considérables :
- 1° La carte de Maury permet d'éviter les grains et les tempêtes. On gagne ainsi 50 jours sur le trajet New York-San Francisco par le cap Horn. Sur des trajets très longs comme Sydney-Londres, on gagne environ 100 jours en suivant les conseils de Maury, c'est-à-dire en passant à l'aller par le cap de Bonne Espérance et au retour par le cap Horn.
- 2° Maury fait réaliser au commerce international des économies considérables (on les estime à 50 millions de dollars de l'époque).

# Plan

- 1. Introduction : Pourquoi s'intéresser à la météorologie?
- 2. A la découverte des météores, objets de la Météorologie
  - A. Constitution d'un champ d'objets
  - B. Les nouvelles classes de météores
    - 1. Les photométéores et la science de l'arc-en-ciel
    - 2. La découverte des électrométéores
- **3. La météorologie, science du changement et des circulations**
  - A. La notion de « pression atmosphérique »
  - B. Cartes et réseaux
  - **C. Les théories de l'atmosphère et de sa circulation**
  - D. La météorologie moderne : turbulence et informatique
- 4. Conclusions

# Progrès de la connaissance de l'atmosphère

- Le développement de la météorologie moderne va être dû à la conjonction de trois facteurs complémentaires :
- La technique de l'aérostât (ballon, puis ballon-sonde);
- Le développement d'une physique de l'atmosphère
- La naissance de théorie générale de la circulation atmosphérique d'inspiration thermodynamique.

# Les aérostats (quelques dates)

1783 : Les frères Montgolfier s'élèvent à 2000 m

1803-1804 : Gay-Lussac et Biot montent à 7000 m

1930-1945 : Piccard atteint la stratosphère (22000m)

Epoque contemporaine : ballons en polyéthylène,  
radiosondes, satellites donnent  
accès aux très hautes  
altitudes.

# Développement d'une physique de l'atmosphère

- 1) Au début, l'idée est que, plus on monte, plus la température descend => le zéro absolu se situerait vers 50 km d'altitude.
- 2) Fin du XIXe siècle : suite aux montées en ballon, on sait que, vers 11km, la température cesse de descendre et se stabilise vers  $-55^{\circ}\text{C}$ . On distingue donc alors ce qui est au dessous (la troposphère) et ce qui est au-dessus (la stratosphère).
- 3) A partir de 1923 et suite à des observations sur les étoiles filantes, on remarque que la densité de l'air correspond à une couche chaude au-delà de 55km => On en déduit l'existence de turbulences dans la haute atmosphère
- 4) Enfin, on finit par découvrir l'existence d'un minimum de température vers 80 km environ.

# Les quatre couches

- Les relevés finissent par dégager 4 couches de l'atmosphère :
  - La troposphère jusqu'à 11 km (tropopause)
  - La stratosphère de 11km à 55 km (stratopause)
  - La mésosphère de 55km à 80 km (mésopause)
  - La thermosphère (ou ionosphère) au-delà de 80 km.
- La composition de l'air est à peu près uniforme jusqu'à 80km (homosphère). Au-delà, elle subit une variation verticale (hétérosphère). Après quoi, on atteint la protosphère, où les protons et les électrons sont libres (la dissociation des molécules sous l'action des ultraviolets commence d'ailleurs à partir de 20km).

# La terre comme machine thermodynamique

- Seconde partie du XIXe => Développement de la thermodynamique (Carnot, Clausius, et surtout Boltzmann).
- On comprend alors que la machine météorologique est en réalité une machine thermodynamique avec deux sources :
  - Une source «chaude» : la chaleur du soleil accumulée au niveau des tropiques;
  - Une source «froide» : les régions polaires.
- Entre les deux : cycle de Carnot => De la chaleur est transportée de la source chaude à la source froide (une moitié par les océans, une moitié par l'atmosphère). Seulement 2% de cette énergie est source des vents à la surface de la Terre.
- La question générale devient : comment concevoir la circulation de l'atmosphère et le système général des vents autour de la terre.

# La circulation des vents dans l'histoire

- **1686** : L'astronome anglais Edmond Halley (l'inventeur de la comète du même nom) fournit la première explication plausible des vents. Pour lui, les vents sont des flux d'air, un air assez froid et dense, dirigé des régions froides vers les régions chaudes où l'air est plus léger et s'élève. C'est ainsi qu'il explique les alizés ou vents du commerce (trade winds) dont le souffle régulier facilite les transports maritimes en faisant converger l'air des latitudes tropicales vers l'équateur.



# La circulation (suite)

- **1735** : Le juriste anglais George Hadley complète cette explication. Hadley prend en compte la rotation de la Terre et explique que cette rotation provoque une «déflexion» (un changement de direction) des vents.
- Par ailleurs, pour répondre à la question implicite posée par la théorie d'Halley (où va l'air qui s'élève des régions chaudes?), Hadley propose la première explication globale de la circulation générale de l'atmosphère en supposant que l'air chaud qui s'élève au niveau de l'équateur se dirige en altitude vers les latitudes plus élevée où il retombe à la surface.

# La carte de Hadley

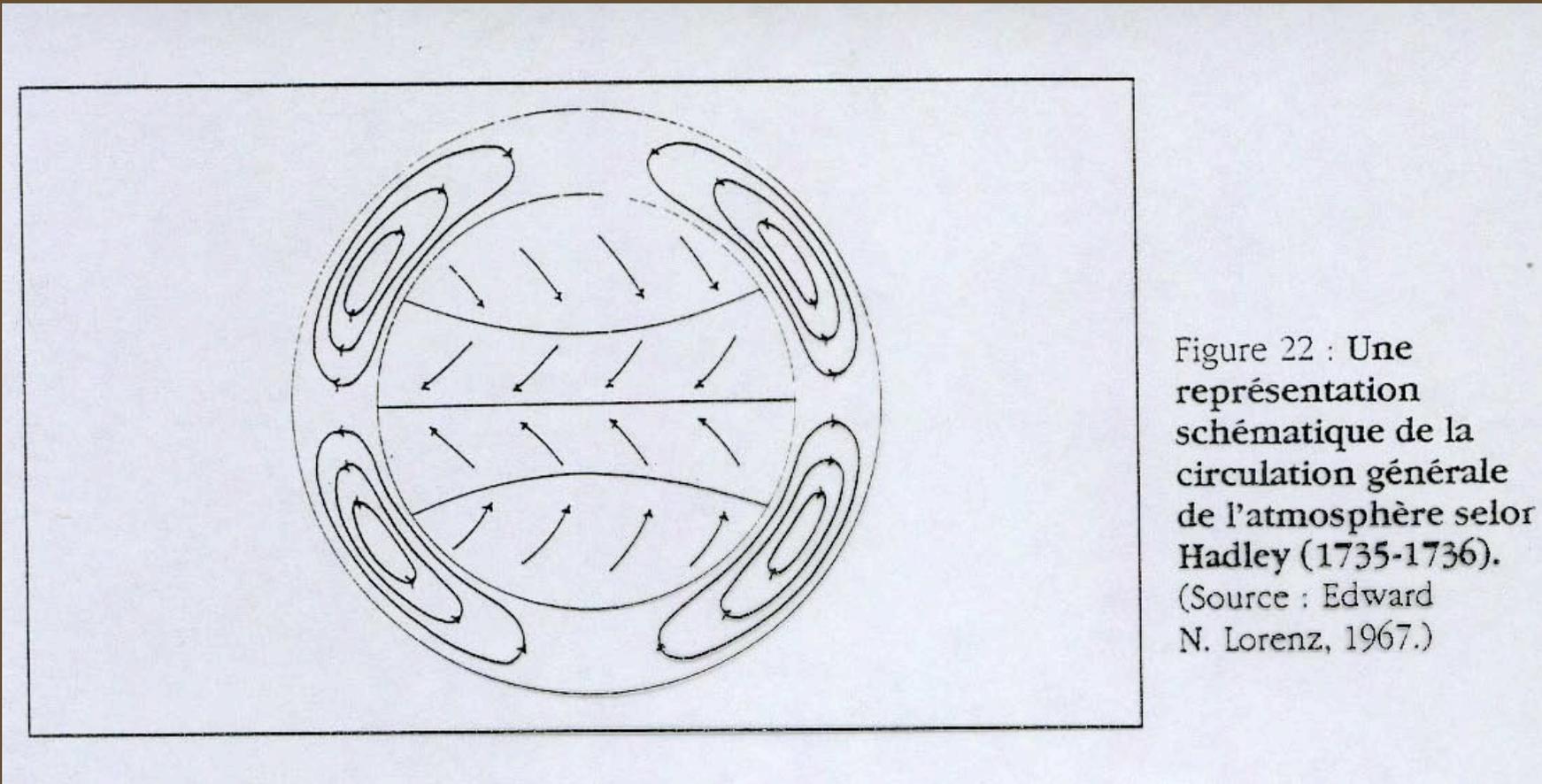


Figure 22 : Une représentation schématique de la circulation générale de l'atmosphère selon Hadley (1735-1736). (Source : Edward N. Lorenz, 1967.)

# La circulation au XIXe siècle

- **Début XIXe** : Les physiciens Charles et Laplace établiront les équations mathématiques qui pilotent les mouvements de l'air.
- **Vers 1835** : Le physicien Gustave Coriolis montrera qu'un mouvement sur un corps fluide en rotation, comme le vent, est source d'une accélération apparente dans une direction perpendiculaire au déplacement (force de Coriolis).

# Un retour à Hadley?

- Par la suite, et tout au long du XIXe siècle, de nombreux schémas de la circulation générale vont être produits :
- – D'abord l'allemand Heinrich Dove (**1837**), décrit les mouvements inverses de rotation que suivent les vents de tempête dans les deux hémisphères.
- – En **1859**, William Ferrel, un instituteur américain, complète le schéma de circulation de Hadley en montrant qu'aux latitudes tempérées, une partie du flux retombant de la haute atmosphère tropicale se dirige vers des latitudes plus élevées. Il aboutit ainsi à un régime de circulation atmosphérique divisé en trois zones :

# Les trois cellules

- La cellule de Hadley, aux latitudes tropicales et équatoriales, avec les alizés et les contre-alizés;
- Une cellule inverse, dite cellule de Ferrel, aux latitudes moyennes;
- Une cellule polaire où l'air froid s'écoule du pôle vers les latitudes moyennes dans les basses couches de l'atmosphère, avec un courant de retour à haute altitude.

# Observations nouvelles

- En 1860, le hollandais Busy-Ballot énonce la loi qui porte son nom et qui dit que, lorsqu'on tourne le dos au vent, la plus basse pression est à gauche et la plus haute à droite.
- **Fin du XIXe siècle** : le norvégien Vilhem Bjerknes et son fils Jacob, ainsi que leurs collaborateurs développent le concept de **masse d'air** et de **front météorologique**, montrant l'importance de ces éléments pour la météorologie des latitudes tempérées.

# L'ère des ballons-sondes et des avions-météo

- **Première moitié du XXe siècle** : du fait des ballons-sondes et des avions, on va pouvoir étudier les masses d'air à des altitudes plus élevées et on mettra en évidence l'influence de ce qu'on appelle des **courants-jets**, (vents puissants d'altitude qui influencent considérablement les perturbations dans les zones tempérées.).
- **Années 1940** : Les américains Charney et Eady donneront une formulation théorique satisfaisante des instabilités de la circulation d'ouest aux latitudes moyennes.

# L'équilibre géostrophique

- A l'échelle de la planète, la mécanique de la circulation atmosphérique peut se traduire grossièrement par un équilibre entre l'accélération de la force de Coriolis et la résultante des forces de pression. C'est ce qu'on appelle **l'équilibre géostrophique**.
- Les « bouffées énergétiques » des cyclones apparaissent dans ce contexte inéluctables : elles participent à cet équilibre et viennent compenser ce qui autrement se présenterait comme un déficit dans le bilan énergétique.

# Plan

- 1. Introduction : Pourquoi s'intéresser à la météorologie?
- 2. A la découverte des météores, objets de la Météorologie
  - A. Constitution d'un champ d'objets
  - B. Les nouvelles classes de météores
    - 1. Les photométéores et la science de l'arc-en-ciel
    - 2. La découverte des électrométéores
- **3. La météorologie, science du changement et des circulations**
  - A. La notion de « pression atmosphérique »
  - B. Cartes et réseaux
  - C. Les théories de l'atmosphère et de sa circulation
  - **D. La météorologie moderne : turbulence et informatique**
- 4. Conclusions

# L'atmosphère, système dynamique évolutif

- L'histoire des théories de la circulation de l'atmosphère et les progrès dans son explication ont pu montrer qu'elle est un **système dynamique évolutif** = processus d'évolution temporelle dans lequel le futur dépend d'une façon déterministe du passé.
- Ce type de système physique a été étudié mathématiquement dès le début du XXe siècle par les mathématiciens français H. Poincaré et J. Hadamard, puis par l'école russe (de Lyapounov à Kolmogoroff) et par l'école américain (Birkhoff, Arnold, Smale), enfin à nouveau par quelques français (R. Thom, D. Ruelle).

# Espace de phases d'un système dynamique évolutif

- Ces mathématiciens ont développé des méthodes d'étude des systèmes dynamiques devenues classiques.
- On étudie aujourd'hui l'évolution d'un système dynamique non dans l'espace réel mais dans ce qu'on appelle un «**espace de phases**» = espace à plusieurs dimensions, formé par les coordonnées des positions et des vitesses des éléments du système.

# Comportement du système

- Pour des systèmes simples (pendule), où l'espace de phases n'a que deux dimensions, on connaît à long terme le comportement du système : celui-ci tend vers un point fixe (pendule qui s'amortit) ou vers un cycle limite (pendule auto-entretenu).
- Pour des systèmes plus compliqué, et des espaces de phases de dimension supérieure à 2, le système peut tendre vers des configurations géométriques quelconques (**attracteurs**) qui peuvent prendre des allures diverses et notamment présenter des instabilités internes.
- En ce cas, pour une petite perturbation des conditions initiales, le système peut suivre à long terme des trajectoires très différentes. C'est «**l'effet papillon**» (Lorenz).

# Les réponses informatiques

- Des solutions permettent de surmonter autant que possible les problèmes posés à la prévisibilité de l'évolution du système atmosphérique. Elles reposent sur des approximations de plus en plus fines des états de l'atmosphère et par l'utilisation de moyens informatiques puissants. Dans l'histoire, il y a eu trois périodes successives et trois types de modèles utilisés :

# 1) Modèle barotopé (Charney)

- a) Mouvements de l'atmosphère étudiés = mouvements horizontaux (verticaux négligés)
- b) Atmosphère = fluide incompressible
- c) Hypothèse : sur une surface de pression constante, la température est constante
- d) Un seul niveau de pression étudié :  $P = 500 \text{ hPa}$ .
- e) Trois paramètres pris en compte :
  - - vitesse des molécules
  - - changement de direction
  - - dilatation ou contraction
- Ce modèle a fonctionné de 1950 à 1962, sur des zones de plus en plus larges de l'hémisphère nord.

## 2) Modèle barocline

- De 1960 à à 1970 environ, on a réussi à construire des modèles décomposant l'atmosphère en plusieurs couches de pression
- D'abord 3 couches (400, 700 et 900 hPa);
- Puis, à partir de 1970, 6 couches dans le modèle Shuman.
- D'où une meilleure représentation de l'atmosphère, la prise en compte de paramètres nouveaux (l'humidité, l'influence des montagnes, etc.) => Prévision à 4 jours.

### 3) Situation actuelle

- Aujourd'hui, grâce à des modèles plus précis, une couverture satellitaire plus importante et des outils informatiques plus puissants, l'atmosphère est décomposée en 4 millions de boîtes et on atteint une prévision à 5 jours. Si on parvient à améliorer les données sur les conditions initiales, on atteindra une possibilité de prévision à 10 jours. Une prévision à 15 jours semble actuellement hors d'atteinte et semble constituer, en tout état de cause, une limite absolue pour la connaissance telle que nous la concevons.

# Plan

- 1. Introduction : Pourquoi s'intéresser à la météorologie?
- 2. A la découverte des météores, objets de la Météorologie
  - A. Constitution d'un champ d'objets
  - B. Les nouvelles classes de météores
    - 1. Les photométéores et la science de l'arc-en-ciel
    - 2. La découverte des électrométéores
- 3. La météorologie, science du changement et des circulations
  - A. La notion de « pression atmosphérique »
  - B. Cartes et réseaux
  - C. Les théories de l'atmosphère et de sa circulation
  - D. La météorologie moderne : turbulence et informatique
- **4. Conclusions**

# Un résumé en 4 points

- :1° Science des météores, la météorologie a réussi à repérer et à classer des objets et des phénomènes aux apparitions et aux formes capricieuses et presque'inconsistantes (vents, nuages, lueurs, condensations, etc.).
- 2° La météorologie, par un certain nombre de méthodes de type graphiques, puis informatiques, a réussi à fixer le changement et les circulations, puis à les simuler et à les reproduire pour mieux les comprendre et les prévenir : le chaotique, le turbulent se trouve lui-même pris en compte.
- 3° La météorologie a permis de tisser tout autour de la terre des réseaux transfrontières : en ce sens elle a servi la paix (autant, sinon plus que la guerre) et elle a contribué à rapprocher les hommes affrontés aux mêmes éléments.
- 4° Enfin, la météorologie déploie une représentation holistique du monde : elle nous aide à comprendre celui-ci comme un ensemble de flux réticulés et entrelacés dont les systèmes de causalités sont complexes.

# Un exemple final : Le phénomène El Niño

- Périodiquement, tous les trois à cinq ans, les pêcheurs péruviens voient leurs zones de pêche au large du Pérou taries

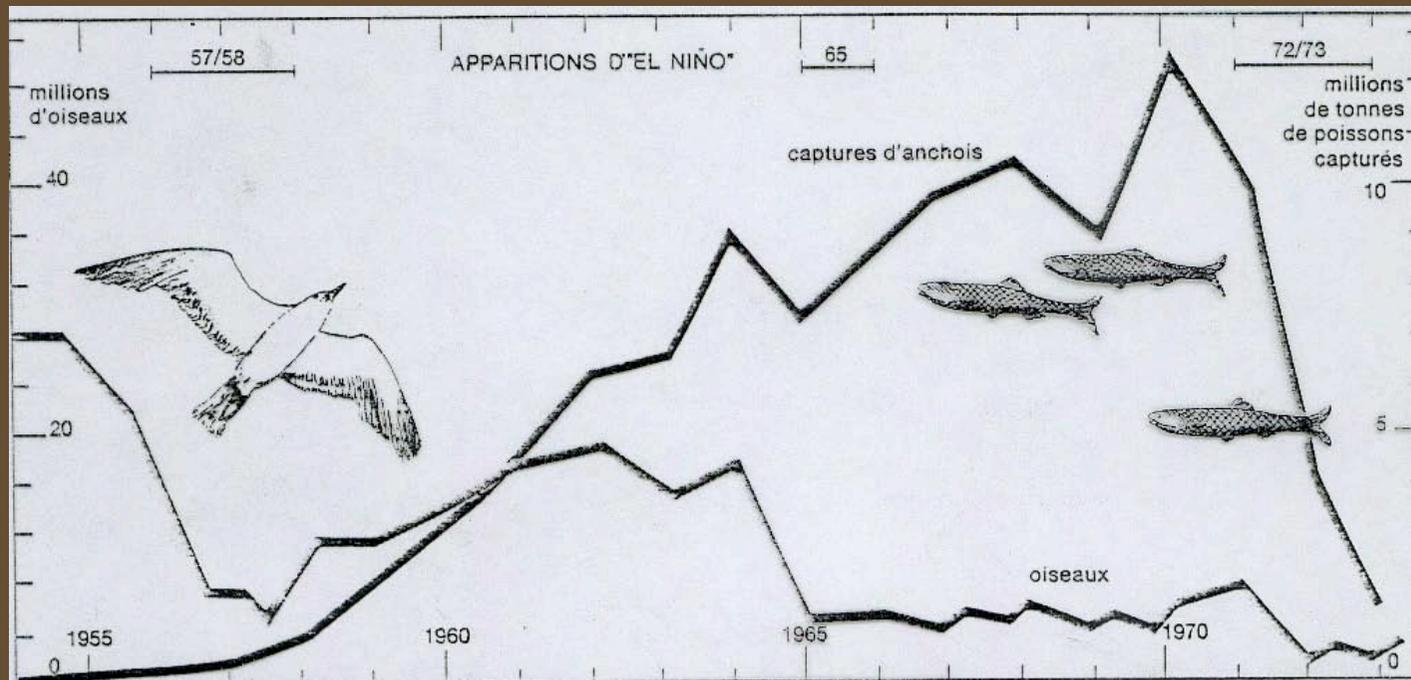
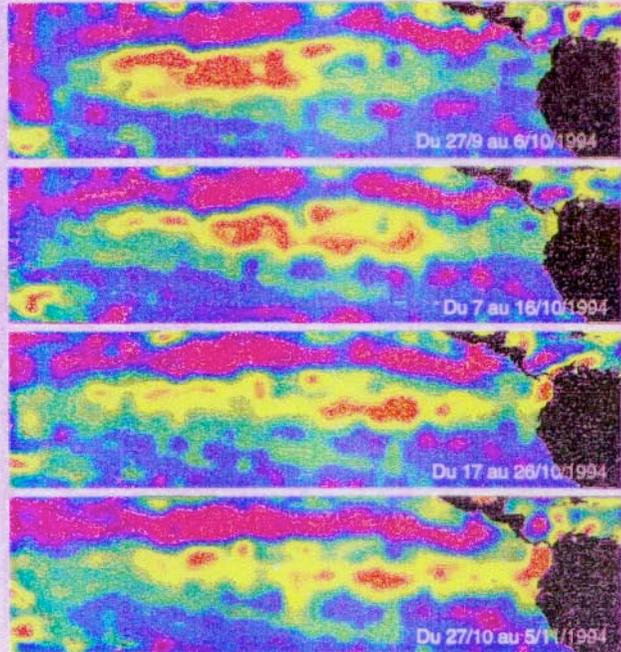


Figure 1. L'évolution de la population des oiseaux à guanacos et des captures d'anchois de 1955 à 1973 illustre l'influence catastrophique sur la vie marine des apparitions d'El Niño de 1957-1958, 1965, 1972-1973. Les captures d'anchois n'ont pas retrouvé depuis 1973 le niveau qu'elles avaient connu à la fin des années 1970.

## Le retour d'El Niño

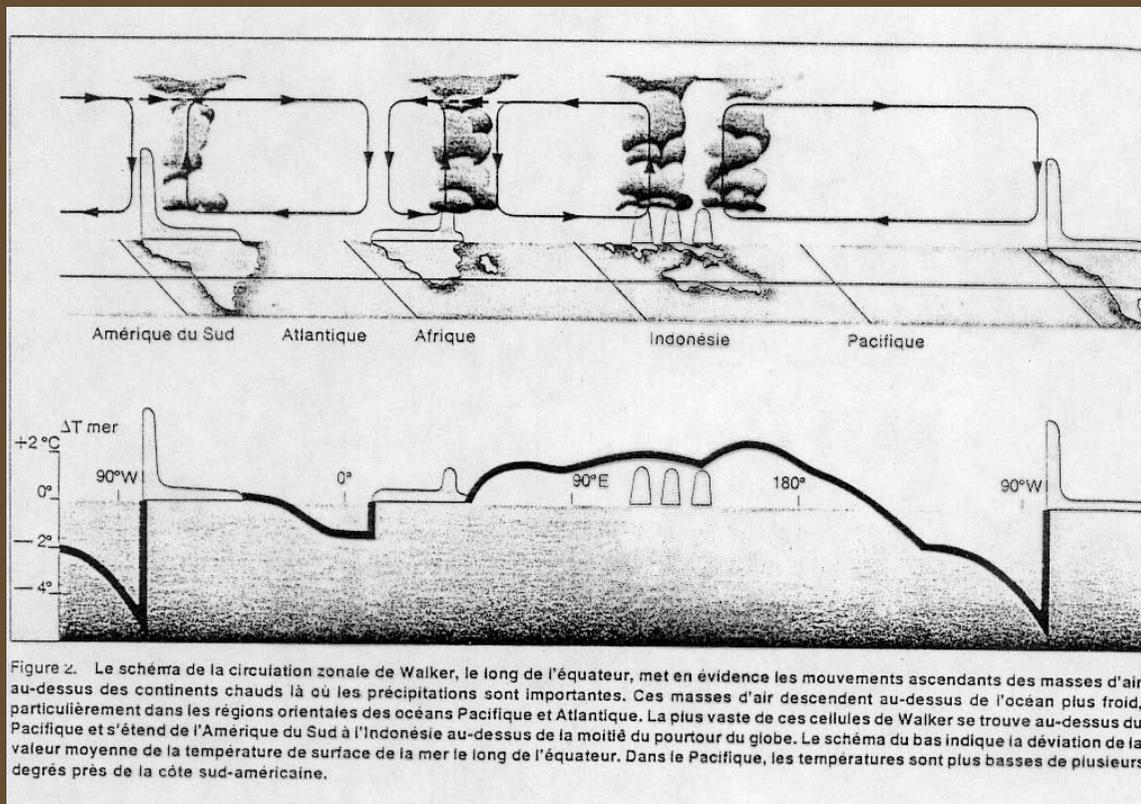


EN 1994, le satellite Topex-Poséidon qui surveille depuis 1990 la topographie de l'océan a fourni la première mesure précise du phénomène El Niño, cette anomalie climatique qui, à l'occasion d'une dissipation des alizés, entraînent un basculement des eaux chaudes de surface depuis l'ouest du Pacifique jusqu'aux côtes du Pérou, à l'est. Entre la fin septembre et la fin novembre, Topex a pu suivre d'un bord à l'autre de l'océan, la propagation (en rouge) d'une élévation de 12 cm de la hauteur d'eau. El Niño est un de ces phénomènes périodiques — il se reproduit tous les trois à cinq ans — dont les climatologues peuvent désormais suivre les évolutions grâce aux satellites. Ces mesures de plus en plus fines, couplées à une analyse des vents, de la température et du niveau de la mer, leur permettront peut-être un jour d'en comprendre les mécanismes intimes et de les relier ainsi au fonctionnement globale de la planète.

# Vue satellite

- Le satellite Topex-Poséidon, construit par le CNES de Toulouse et qui surveille l'océan depuis 1990, a pu établir le phénomène avec précision, suivre les déplacements de la masse d'eau et mesurer une élévation de près de 12 cm de la hauteur de l'eau du côté du Pérou. Cette oscillation induit des perturbations dans les courants du Japon, et elle est également source de différentes catastrophes climatiques (pluies torrentielles sur les régions côtières du nord du Pérou).

# Un fléchissement des alizés?



- On a pu lier le phénomène au déplacement vers l'Est d'une masse d'eau chaude de surface du Pacifique grande comme les Etats-Unis, et qui se produit à l'occasion d'un fléchissement momentané d'une circulation d'air zonale des alizés appelée «circulation Walker».

# Qu'en conclure?

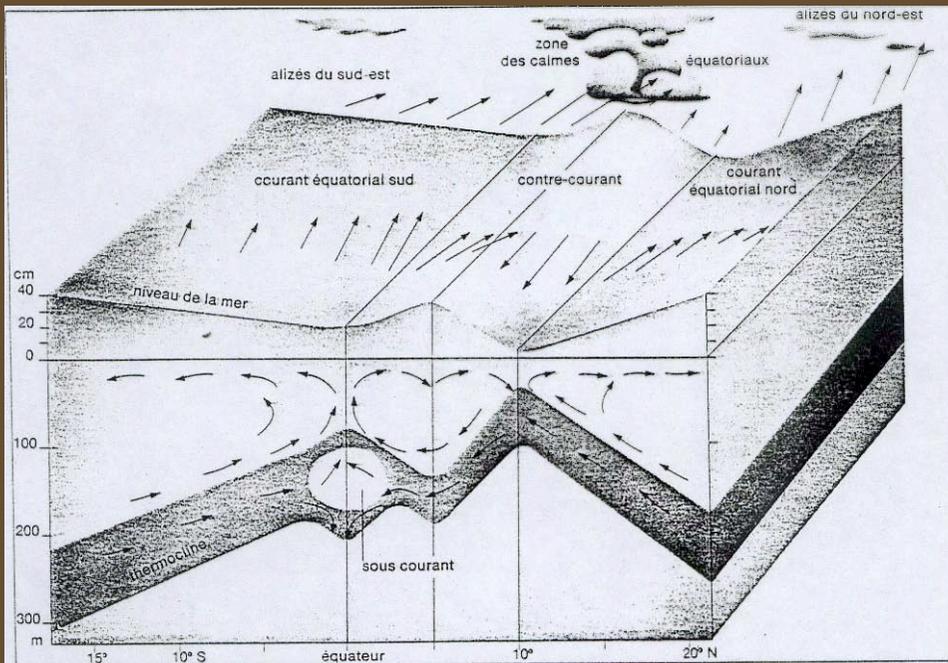


Figure 7. Cette coupe transversale, de Tahiti à Hawaï, illustre les relations existant dans le Pacifique équatorial entre le système des courants de surface et de subsurface, la structure thermique, les topographies de la surface de la mer et de la thermocline. La circulation océanique superficielle est gouvernée par les vents d'alizés qui entraînent les eaux vers l'Ouest tout en les repoussant de part et d'autre de l'équateur : c'est le courant équatorial sud. Il se forme donc, au niveau de l'équateur, une zone de divergence qui ramène à la surface des eaux riches en sels nutritifs, source d'une forte productivité primaire. Au niveau du parallèle 10° N, apparaît la seconde zone de divergence, égale et opposée à la première, due au courant équatorial nord. Les deux courants équatoriaux sont séparés par la zone des calmes équatoriaux où règne un contre-courant qui s'écoule vers l'Est. La circulation de subsurface, au niveau de la thermocline, a une composante méridienne qui ramène les eaux vers l'équateur, vers le sous-courant. On pourra remarquer que la topographie de surface est l'image donnée par un miroir de la topographie de la thermocline.

Ce qui est sûr, c'est que le phénomène El Niño démontre la réticularité fondamentale de la planète et les liens souvent très difficiles à percevoir mais très profonds qui sont tissés entre des réalités d'ordre différent : ici, les vents, les courants marins de surface et de profondeurs et certains phénomènes climatologiques et économiques.

# Pour l'interdisciplinarité

- Tout ceci engage à l'interdisciplinarité et invite à considérer la réalité tout autrement qu'on ne le faisait jusqu'à présent : il faut apprendre à relier ce qu'on avait préalablement découpé et reconstituer un monde systémique, non plus sur le mode du rêve, comme les anciens philosophes, mais sur un mode réel.
- On ne doit pas prêter, par exemple, à El Niño plus qu'il ne fait : selon certaines informations (Recherche n° 274, Mars 1995) ce phénomène aurait un équivalent dans l'Océan Indien, entre les côtes d'Afrique de l'Est et les côtes de l'Inde et de l'Indonésie...

# Bibliographie

- A. Fierro, *Histoire de la Météorologie*, Paris, Médiations, 1991.
- C. Gary, *La foudre, des mythologies antiques à la recherche moderne*, Paris, Masson, 1994.
- R. Kandel, *Le devenir des climats*, Paris, Hachette, 1990.
- D. Parrochia, *Météores, essai sur le ciel et la cité*, Seyssel, Champ Vallon, 1998.
- P. Queney, *Eléments de météorologie*, Paris, Masson, 1974.
- M. Rochas, J.-P. Javelle, *La météorologie*, Paris, Syros, 1993.