N° 76 - MAI 2011

ocences



AUVERGNE

LE NUCLÉAIRE DU FUTUR

LES CADRANS SOLAIRES

THERMODYNAMIQUE, STRUCTURE, STABILITÉ ET FLUCTUATIONS

> ETUDES DU VOLCAN SOUFRIÈRE HILLS

> > LA TENSION SUPERFICIELLE DE L'EAU

LE GRAND SAUT



Revue de l'ADASTA

Association pour le Développement de l'Animation Scientifique et Technique en Auvergne

EDITORIAL



Dans ce numéro de notre revue nous poursuivons l'étude sur le « nucléaire du futur », sujet qui se trouve au cœur de l'actualité. Il s'agit d'un point sur l'évolution des recherches dans ce domaine, en particulier sur la sûreté, sans

préjuger des décisions politiques à venir. Egalement plus que jamais à l'ordre du jour ; les quatre conférences-débat sur l'énergie. La première, qui en présentait les enjeux mondiaux, fut un succès. La deuxième, le 12 mai, a pour objet les réacteurs nucléaires (fission, fusion), la troisième, programmée le 9 juin, fera le point sur l'énergie pour les voitures du futur. Nous vous attendons nombreux.

Un autre sujet d'actualité, d'ordre purement scientifique, est le « Grand Saut ». Michel Fournier, principal acteur de cette prouesse, a présenté son projet et les préparatifs lors d'une conférence à l'Adasta. L'article proposé dans cette revue retrace les éléments importants de cette opération, avec un aperçu des avancées scientifiques réalisées au cours de ces années de préparation.

Après une présentation, dans la revue précédente, des différents types d'heures solaires, nous trouvons dans celle-ci les techniques de mesure par les cadrans solaires. Un complément dans la revue suivante présentera un cas particulier tout à fait exceptionnel : le barrage de Castillon, cadran solaire géant.

Trois articles nous présentent des curiosités scientifiques : des structures géométriques étonnantes obtenues par des instabilités thermodynamiques ou chimiques, les expériences sur la tension superficielle de l'eau et enfin une étude sur le volcan Soufrière Hills.

Concernant la vie de notre association nous n'avons pas eu l'occasion de faire le point avec vous, chers adhérents de l'Adasta, depuis l'Assemblée générale. Comme souvent les satisfactions se mêlent aux préoccupations.

Parmi les points positifs de nos actions :

- participation active et nombreuse aux conférences et sorties qui sont organisées
- très nombreuses animations extérieures pour initier les élèves des lycées à l'astronomie grâce au planétarium mobile que possède l'Adasta. Depuis le début de l'année c'est surtout dans l'Allier que nous oeuvrons et d'autres séances sont à nouveau prévues. Nous n'oublions pas le Puy-de-Dôme. Ces animations qui vont se multiplier font connaître et apprécier l'Adasta et permettent de rééquilibrer nos finances
- présence de l'Adasta aux diverses manifestations scientifiques de l'agglomération où l'image de marque de l'Adasta est excellente
- réussite de la première des 4 conférences-débat sur l'Energie citée plus haut.

Deux points nous préoccupent :

- le nombre d'adhérents stagne voire diminue
- notre partenaire J. B. de La Salle qui a un nouveau directeur, vient de dénoncer l'accord que nous avions conclu pour la livraison de 350 exemplaires de chaque revue; ces exemplaires payés à l'imprimeur allégeaient le coût pour l'Adasta.

Enfin, nous venons de décider une évolution de l'activité Jeunes Pousses : l'Adasta s'organise pour proposer des animations scientifiques dans le cadre de médiathèques, établissements scolaires ou associations.

A vous voir encore plus nombreux aux diverses activités que nous organisons pour vous.

Le Président, Henri Bouffard

PUY-DE-DÔME CONSEIL GENERAL CHAMALIERS VILLE DE Liberté - Égalisé - Fraternité RÉPUBLIQUE FRANÇAISE MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE CONSEILRÉGIONAL AUVERGNE MISTITUT FRANÇAIS DE MÉCANIQUE AVANCÉE PUY-DE-DÔME CONSEIL GENERAL CHAMALIERS CLERMONT FERNAL CAIS DE MÉCANIQUE AVANCÉE PUY-DE-DÔME CONSEIL GENERAL CHAMALIERS CONSEILRÉGIONAL AUVERGNE CONSEILRÉGIONAL AUVERGNE

Comité de rédaction de la Revue Auvergne-Sciences

Rédacteur en chef: Philippe Choisel

Membres: Jocelyne Allée, Georges Anton, Gérard Baillet, Vincent Barra, Henri Bouffard, Jean-Claude Capelani, Jean Chandezon, Luc Dettwiller, Roland Fustier, Paul-Louis Hennequin, André Schneider.

Réalisation et conception : Design'Création - 04 71 02 80 57

Sommaire

Le Nucléaire du Futur
Les cadrans solaires9
Thermodynamique, structure, stabilité et fluctuations14
Etudes texturales en 2D et 3D des produits des explosions vulcaniennes du volcan Soufrière Hills, 199722
La tension superficielle de l'eau28
Jeu
Les conférences du second semestre 201131
Vent solaire et les pannes32
Préparation du grand saut33
Les articles publiés sont de la responsabilité exclusive de leurs auteurs

Couverture : "Panache d'une explosion vulcanienne du volcan Soufrière Hills, Montserrat, 1997" - "Photo de Mr Tim Druitt, professeur (volcanologue) à l'université Blaise Pascal - Laboratoire Magmas et Volcans" Remerciements également à nos auteurs pour les photos communiquées

Le Nucléaire du Futur

LES RÉACTEURS DE QUATRIÈME GÉNÉRATION (2º PARTIE)



Après

une

Avan sont sur fond orangé.

deuxième partie les projets pour l'avenir.



partie

traitant

première

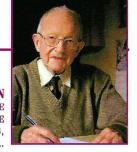
caractéristiques de l'énergie nucléaire, le contexte mondial

et la gestion actuelle des déchets, nous abordons dans cette

Christian Lebrun et les compléments apportés par Mr Louis

Comme précédemment le diaporama initial est de Mr





RAPPEL DU SOMMAIRE Les conditions pour un futur du nucléaire

- ? sûreté
- ? durabilité des ressources
- ? gestion des déchets
- ? économie
- ? non-prolifération

Six systèmes actuellement en cours d'étude

Développer le nucléaire

- Gérer les ressources: filières possibles
- Gérer les déchets actuels et futurs donc avoir les bons moyens de retraitement et choisir le mode de transmutation des A.M. (réacteurs dédiés ou pas, combustibles ou cibles)
- Avoir des réacteurs plus sûrs (contre-réaction, vide, énergie résiduelle)
- Améliorer les rendements et diversifier les utilisations (chaleur, H2, Eau) = accroître la température
- Disponibilité en 2050 à coût raisonnable

Complément d'après Dominique Grenèche, AREVA NC (Revue Générale Nucléaire – année 2008 – N°5 sept oct – pages 45, 47 et 49)

- les fonctions de sûreté - leur définition et leur mise en œuvre ne pourra pas ne pas prendre en compte un examen rigoureux et objectif de l'ensemble des accidents nucléaires depuis l'origine, quel que soit leur degré de gravité.

On définit généralement trois fonctions

1) contrôle de la réaction en chaîne et donc de la puissance produite : éviter la surcriticité intempestive. Concernant ce risque de surcriticité, il faut rappeler que certains des réacteurs envisagés pour la Génération IV - ainsi le VHTR (voir commentaires page 6) nécessitent des taux d'enrichissement supérieurs à la limite actuelle des usines d'enrichissement : soit 5%.

- 2) Assurance de refroidissement du combustible, y compris après l'arrêt de la réaction en chaîne, pour évacuer la puissance résiduelle. De même, assurance de refroidissement des produits de fission (PF).
- 3) Confinement des produits radioactifs et des substances chimiques dangereuses (UF₆ par exemple). Pour atteindre ce dernier objectif, on prévoit trois barrières physiques de confinement :
 - la gaine du combustible
 - le circuit primaire
 - l'enceinte du réacteur

Les nouveaux standards de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) distinguent 5 niveaux dont chacun constitue l'équivalent d'une « ligne de défense » en profondeur. Le projet EPR (European Pressured (water) Reactor), en cours de réalisation, visait déjà une meilleure traduction de ces niveaux de ligne de défense dans des conditions extrêmes, y compris sismiques.

- Définition du « vide positif » ou coefficient de vide positif (réf Jacques Bernard « Les réacteurs nucléaires électrogènes » - Ellipses 2008 p. 20)

Lorsque l'eau légère, par exemple, sert de fluide caloporteur, sa tendance à absorber des neutrons (absorption due à l'hydrogène de l'eau) nécessite, pour obtenir une réactivité positive, l'enrichissement du combustible en matériau fissile (U₂₃₅). Mais si, pour une raison quelconque, la température de l'eau se met à croître, sa densité va diminuer. Pour un volume donné, le nombre de noyaux cibles d'hydrogène dans ce même volume va aussi baisser, de même, en conséquence, que le nombre de neutrons absorbés. Le modérateur restant inchangé, la population neutronique va donc augmenter ainsi que la puissance. Il est préjudiciable à la stabilité de fonctionnement du réacteur.

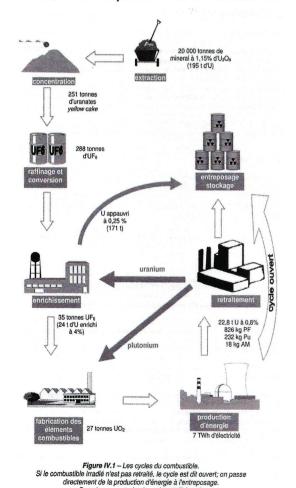
Les filières possibles



-Filière Uranium thermique naturel ou enrichi en U5 (250 ans)
(GG, Eau lourde, REP, REB et GENIII) besoin 1 neutron
besoin 2 neutrons
besoin 2 neutrons

Le cycle complet

- · Réacteur: combustible, modérateur, caloporteur
- · Combustible: oxyde, métal, nitrure, carbure, solide (enveloppe), liquide (sels)
- Retraitement: procédé(hydro ou pyro), efficacité, tenue aux radiations, déchets
- Matériaux: tenue mécanique, à la chaleur, à la corrosion, à la température et à l'irradiation



Dans le cas contraire, le cycle est dit fermé.

Les valeurs indiquées sont relatives au fonctionnement annuel d'un réacleur du pailer 900 MW (renouvellement d'un tiers et facteur de charge de 80%).

PF = produits de fission AM = actinides mineurs (Am, Np, Cm)

Le retraitement

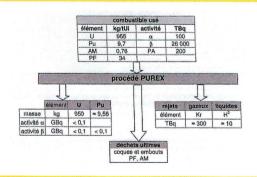
≻Procédés hydrométallurgiques

- · PUREX: marche, U- Pu- AM+PF verres
- · Souhait: GANEX: U- actinides(Pu +AM)- PF verres
- · Questions: dissolution, radiolyse, criticité

>Procédés pyrométallurgiques

- · Sels fondus Cl ou F
- Electrochimie, fluoration, échanges sels- métaux, oxydation- déposition, ...
- · Efficacité, corrosion, gestion gaz et PF, criticité

Le procédé PUREX a été largement décrit dans la première partie de cet article (Auvergne Sciences N°75 – décembre 2010)



Le tableau ci-dessus donne quelques indications du bilan du PUREX pour 1 tonne d'uranium initial (tUi) traité à l'usine de la Hague (source CEA).

Remarque: PA= Produits d'Activation.

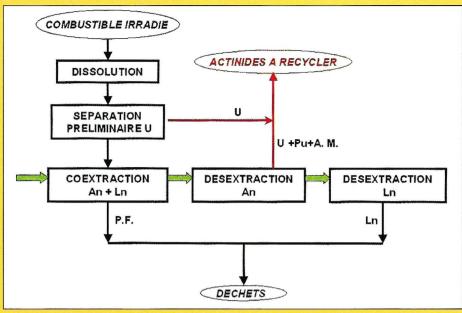
GANEX : le procédé PUREX, modifié pour séparer le plutonium et le neptunium, ne convient pas pour l'americium ; le curium ou le césium.

Le CEA préconise, avant 2012, un procédé de séparation poussée appelé GANEX (Groupe ActiNide EXtraction). Ce procédé est dérivé des recherches menées au Laboratoire Atalante du CEA (ATelier ALpha pour ANalyses, Transuraniens et Etudes de retraitement). La figure ci-contre résume ce concept d'extraction. (Source RGN 2003 N°4 page 96 – Bernard BOULLIS – CEA-VALRHO)

Les procédés hydrométallurgiques tels que PUREX et GANEX bénéficient d'un fort retour d'expérience industrielle qui atteste leurs potentialités (réf RGN 2003 N° 4 Juillet-août p. 112).

Les procédés pyrométallurgiques ont pour objectif d'utiliser des sels et des métaux fondus en liaison avec des processus d'électrolyse. Parmi les avantages attendus des ces derniers procédés, les plus importants seraient :

- La possibilité de retraiter des matériaux réfractaires et des combustibles très chauds, grâce au potentiel de dissolution et à la bonne résistance aux radiations des sels fondus.

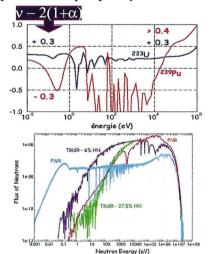


- La compacité liée aux dimensions des équipements utilisés et au nombre limité des étapes de transformation.
- La possibilité de combiner le retraitement et le réacteur sur un même site dans un système intégré.

Mais contrairement aux procédés aqueux, le taux de recyclage de tous les actinides avec un grand taux de récupération (aux alentours de 99,9%) n'a pas encore été démontré pour ces méthodes pyrochimiques ou pyrométallurgiques. Cependant, à l'Institut Transuranien de Karlsruhe, une séparation sélective des actinides en quantité significative par électrodéposition sur cathode solide a été réalisée.

Les réacteurs: un peu de physique

- Réactivité K=1 contrôle au pcm
- Marge: la fraction de neutrons retardés (~300pcm)
- > Contre réaction dK/dt<0
- > Vide négatif
- Etre en situation de réactivité maximum
- Exemples de spectres de neutrons
- Evacuer la chaleur résiduelle



<u>Notation</u> (sous réserve, en l'absence de toute indication) :

- ν : nombre moyen de neutrons émis au cours d'une fusion
- α : probabilité qu'un neutron soit capturé par un noyau de combustible plutôt qu'il provoque une fission
- $\alpha = \sigma_C / \sigma_f$ (rapport des sections efficaces de capture et de fission)

pcm: parties pour cent mille

Effet de vide négatif : « imaginons » un accroissement de puissance appelée. La puissance délivrée par la turbine étant proportionnelle au débit de vapeur, ce débit augmente. D'où augmentation de la puissance prélevée à l'eau du primaire, au niveau de la génération de vapeur : la température de l'eau du circuit primaire diminue donc. Le cœur du réacteur voit donc arriver de l'eau plus froide : ainsi,

contrairement à la situation du « vide positif », augmentation de la densité du fluide caloporteur. D'où « effet de vide négatif » <u>Réactivité</u> : (réf Encyclopedia Britannica 1998 vol. 18 – Energy Conversion – p. 373) la situation d'une réaction en chaîne est déterminée par la probabilité qu'a un neutron libéré dans une fission de provoquer une nouvelle fission.

Si, en moyenne, moins d'un neutron provoque une nouvelle fission (k < 1), le taux de fission décroît dans le temps et tend vers zéro (régime sous-critique) k: réactivité.

Si, en moyenne, un neutron issu d'une fission provoque une nouvelle fission, le régime de fission est stationnaire et le réacteur est « critique », ce qui est souhaité pour un réacteur producteur d'énergie (via le système des turbines) k = 1.

Quand plus d'un neutron, en moyenne, provoque une nouvelle fission, le taux de fission augmente et la situation est supercritique. En réalité, pour pouvoir satisfaire à une demande de puissance croissante, les réacteurs seront conçus pour être légèrement supercritiques en l'absence de dispositifs de contrôle.

La réactivité peut être contrôlée de diverses manières : en enlevant ou en ajoutant du combustible ; en jouant sur la fraction de neutrons qui quittent le système ; en modifiant le niveau d'absorbeurs qui entrent en compétition avec le flux de neutrons (barres de contrôle ou modification de la concentration d'absorbeurs dans un réacteur à liquide combustible).

Le contrôle du réacteur est facilité par la <u>présence de neutrons retardés</u>: ces neutrons sont émis par les produits de fission avec un certain délai après la fission. Cette fraction de neutrons retardés est petite, mais son importance est suffisante pour jouer sur les types de modifications nécessaires à la régulation du réacteur. « La réaction en chaîne "peut les attendre" avant de répondre ». Ce qui aide la stabilité de l'opération.

Comment se prépare le nucléaire du futur

- · Les réseaux: forum génération IV (2001), INPRO (AIEA), ISTC, Chine et Inde
- · Les critères: Sûreté, gestion des déchets, durabilité, économie, non prolifération
- · Les systèmes en cours d'études: SCWR, VHTR, SFR, GFR, LFR, MSR, ADS
- Travaux en cours: données nucléaires, physique des réacteurs, matériaux, combustibles, retraitement

Compléments :

- <u>Surgénération et Régénération</u> (d'après J. Bernard p. 34-35) :

un réacteur nucléaire est dit surgénérateur si la quantité de matière fissile consommée est inférieure à celle qui est produite dans le cœur.

La production de matière fissile (Pu_{239} et U_{233}) peut s'obtenir à partir de matière dite « fertile » (U_{238} et Th_{232}).

Exemples

$$\begin{array}{ccc} ^{238}\text{U} + n \xrightarrow{\gamma} ^{239}\text{U} \xrightarrow{\beta^{-}} ^{239}\text{Np} \xrightarrow{\beta^{-}} ^{239}\text{Pu} \\ \\ ^{232}\text{Th} + n \xrightarrow{\gamma} ^{233}\text{Th} \xrightarrow{\beta^{-}} ^{233}\text{Pa} \xrightarrow{\beta^{-}} ^{233}\text{U} \end{array}$$

La production de matière <u>fissile</u> exige la consommation (et l'irradiation neutronique) de noyaux <u>fertiles</u>.

La surgénération est obtenue si le nombre de

noyaux fissiles (Pu239, U233) perdus par fission est inférieur au nombre de noyaux fissiles formés.

Soit τ_C le facteur de conversion = nombre de noyaux fissiles formés / nombre de noyaux fissiles brisés.

Si $\tau_C = 1$ nous sommes dans le cas de la **régénération**

Si $\tau_c > 1$ nous sommes dans le cas de la surgénération

Les deux situations exigent, au niveau élémentaire, 2 neutrons : 1 pour la transformation fertile / fissile, 1 pour la fission.

- Les Réseaux acteurs du nucléaire du futur (réf. Frank CARRE et Gian-Luigi FIORINI – CEA – RGN 2003 N°4 p.25 et ss). Le Forum International Génération IV (GIF) s'est constitué en 2000 à l'initiative du Departement Of Energy américain (DOE), après un travail initial de Japon Atomic Energy Agency (JAEA), du DOE des Etats-Unis et du CEA pour la France. En 2003 les pays membres du GIF sont au nombre de dix : Etats-Unis, Argentine, Brésil, Canada, France, Japon, République de Corée, Afrique du Sud, Suisse et Royaume-Uni. La Chine a rejoint le GIF en janvier 2008, ainsi que la Commission Européenne de l'Energie Atomique.

EN 2002, six concepts de réacteurs, dont plusieurs ayant recours aux neutrons rapides et au retraitement des combustibles usés, ont été retenus par les membres du GIF, en fonction de leur capacité à satisfaire quatre objectifs majeurs :

1) Aptitude au développement durable ainsi résumé :

- impact favorable sur l'environnement

- augmentation du potentiel énergétique des réserves de combustible nucléaire

- utilisation optimale des sites et entreposage et/ou stockage par minimisation du volume et de la charge thermique

- réduction significative de la durée de vie et de la toxicité des déchets radioactifs.

2) Compétitivité économique avec production décentralisée d'hydrogène, d'eau de mer dessalée ou de chaleur pour le chauffage urbain.

3) Sûreté et fiabilité, exigences essentielles pour les générations futures.

4) Résistance à la prolifération et protection physique (PR et PP).

En 2000, l'Agence Internationale pour l'Energie Atomique avait initié L'International Project on Innovation Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO) regroupant 15 pays membres. Enfin, si la Russie n'est pas membre du Forum International Génération IV, ses projets n'en sont pas moins défendus avec conviction, notamment par des ingénieurs américains. Le document final du GIF privilégie pour les Réacteurs à Sels Fondus (RSF) l'objectif d'incinération des actinides. Le choix est également celui retenu par les Russes dans le cadre du projet ISTC 1606, dédié à la transmutation du plutonium et des actinides mineurs.

- Les six systèmes en cours d'étude («objectif industriel 2030 »)

Le comité de pilotage international du Forum a finalisé en juillet 2002 six systèmes considérés comme les plus prometteurs. Nous les résumons, avant de développer plus loin.

1) VHTR (Very High Temperature Reactor System): réacteur à très haute température (1000 à 1200 °C) refroidi à l'hélium et dédié à la production d'hydrogène ou à la cogénération hydrogène / électricité

2) GFR (Gas-cooled Fast Reactor) : réacteur « rapide » à caloporteur hélium

3) SFR (Sodium-cooled Fast Reactor): réacteur « rapide » à caloporteur sodium

4) SCWR (Super Critical Water-cooled Reactor System): réacteur à eau supercritique

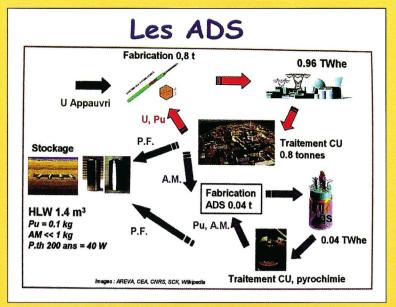
5) LFR (Lead-cooled Fast Reactor): réacteur « rapide » à caloporteur plomb ou alliage eutectique plomb-bismuth

6) MSR (Molten Salt Reactor) : réacteur à sels fondus, déjà évoqué en première partie de l'article « le Nucléaire du Futur »

Note: La France a exprimé un intérêt prioritaire pour les systèmes avancés à caloporteur gaz à très haute température (VHTR) et à neutrons rapides avec recyclage intégral des actinides (GFR). Elle accompagnera aussi les développements pour le SFR. Pour le SCWR, la France centre son effort sur les études des systèmes qui sont essentielles pour la faisabilité, la sûreté et les performances du réacteur. Elle participera aussi au réacteur à sels fondus (mise en commun avec le Forum sur la faisabilité plus que sur le développement réel).

On remarquera aussi la tendance déjà présente dans l'EPR : utilisation des mêmes types de combustibles que les réacteurs de générations précédentes, mais avec un rendement amélioré du fait de la conception neutronique et de l'utilisation de ces combustibles mais à haut taux de combustion (HTC) : « mieux brûler le combustible » afin de réduire la production des déchets

issus de ces combustibles.



Complément sur les ADS (Réf Jean-Louis CARBONNIER, Marc DELPECH, Christian LOAEC – CEA – RGN 2008 N°3 mai-juin p. 43)

Recyclage en « double strate » : Réacteurs de 4ème génération et système dédiés (ADS = Accelerator Drivers Systems). Le scénario proposé consiste à recycler uniquement le plutonium en réacteurs « rapides », les actinides mineurs (AM) étant traités dans des « systèmes dédiés » constitués de « cœurs sous-critiques » (k ~ 0,97) justement fortement chargés en ces AM, le complément de neutrons étant apporté par une « cible de spallation » et un faisceau de protons de forte énergie produits par un accélérateur : c'est donc un « système piloté par accélérateur » (ADS). On a bien un recyclage en double strate : plutonium en RNR (Réacteurs à Neutrons Rapides) et AM en ADS.

Les problèmes fondamentaux concernent la réalisation de la « cible de spallation » (par exemple une cible liquide eutectique plomb-bismuth) et le couplage en interface « cœur-accélérateur ».

(Les compléments relatifs aux images suivantes s'inspirent de l'article de Frank CARRE et Gian-Luigi FIORINI)

Pour ce qui concerne le risque de criticité ils vont nécessiter enrichissements bien au-delà de la limite aujourd'hui atteinte dans les d'enrichissement : jusqu'à 15-16 %, en restant de toute façon inférieure à 20 %. Si de tels combustibles sont un jour réalisés à l'échelle industrielle, il faudra nécessairement renforcer les dispositions prises dans les usines d'enrichissement en matière de sûreté-: au-delà de la technologie d'enrichissement par ultra-centrifugation qui dominera certainement le marché mondial, on peut imaginer celle de l'enrichissement par laser.

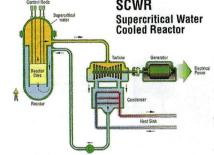
Cette dernière technologie est l'objet de « Recherche-Développement aux U.S.A., au Japon et en France. Sa mise en œuvre oblige à reprendre totalement les études de sûreté : risques liés à l'emploi de batteries de laser de très forte puissance, interactions uranium / eau-air dans les modules de séparation ».

(RGN 2008 N°5 sept-oct p.49)

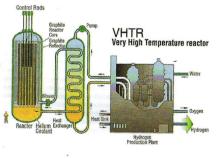
Le VHTR répond à un besoin fort de l'administration américaine concernant la production d'hydrogène à partir de moyens non fossiles. Seul le nucléaire peut apporter une

Les systèmes intermédiaires

Eau super critique: eau, rendement, corrosion, stabilité, régénérateur (?)



 VHTR: H2, sûr, combustibles existent, prototypes marchent matériaux, hélium HT, retraitement, turbines, RSA,USA



solution propre, soit par l'électrolyse à haute température, soit par cassure de la molécule d'eau. La température requise, de l'ordre de 900°C pour un rendement acceptable, exige donc un réacteur portant l'hélium à 1000°C environ.

Les défis technologiques majeurs concernent les matériaux du cœur, et surtout ceux des échangeurs intermédiaires.

(RGN 2003 N°4 p.72)

Réacteur à neutrons rapides, le SFR utilise un cycle de combustible fermé avec recyclage de l'ensemble des actinides et régénération du plutonium. Deux options sont envisagées :

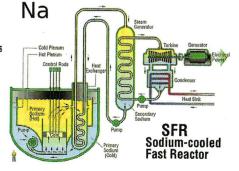
- la première est associée à un combustible métallique (UPuZr) retraité par pyrométallurgie. Puissance unitaire 150 à 500 MWe
- la seconde option utilise un combustible MOX retraité par voie aqueuse et correspond à une puissance unitaire de 500 à 1200 MWe. Il est envisagé de supprimer la boucle intermédiaire en remplaçant le sodium par un gaz ($\rm N_2$ He ou $\rm CO_2$ supercritique), ce qui éliminerait les risques de réaction sodium-eau.

La France bénéficie d'une expérience importante grâce à PHENIX et Super-PHENIX.

Réacteurs à Neutrons Rapides U/Pu

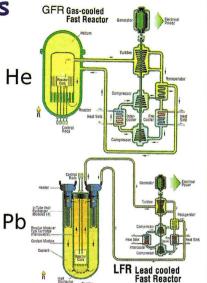
- RNR: besoin 2 neutrons
 pas de noyaux légers en
 cœur, 2 charges pour
 retraiter en combustibles
 solides, Pu avec ou sans
 A.M.
- Sodium: a marché mais sûreté(vide), chimie du sodium, inspection, rendement, coût
- Echangeurs extérieurs, puissance limitée

doit être innovant



Réacteurs rapides U/Pu

- Rapides Gaz He:
 régénérateur HT
 perte caloporteur,
 combustible, matériaux,
 volume
- Rapides plomb: a marché en URSS corrosion, matériaux, dimensionnement, inspection



Complément sur le GFR (Réf fig et texte : RGN 2003 N°4 p.31 – 44))

Le GFR est un réacteur à neutrons rapides, surgénérateur, de puissance 600 MWé, refroidi à l'hélium en cycle direct avec un rendement élevé (48 %). La température du fluide caloporteur est limitée à 850 °G.

Le combustible est dérivé de celui de la filière HTR (particules incluses dans une matrice en forme de boulet). Le réacteur GFR est caractérisé par son aptitude au développement énergétique durable grâce au recours combiné aux neutrons rapides et au recyclage du combustible sur le site même du réacteur (on brûle à la fois l'uranium 238 et les actinides mineurs).

Sûreté et fiabilité sont évaluées favorablement.

Complément sur le LFR (réf RGN 2003 N°4 p 32 fig 42)

Le LFR est un réacteur à neutrons rapides refroidi par une circulation naturelle de plomb fondu et un alliage eutectique de plomb et de bismuth.

Le combustible est métallique ou à base de nitrure. Il contient de l'uranium 238 fertile et des transuraniens. Le cycle du combustible est fermé, avec recyclage de l'ensemble des actinides.

Plusieurs puissances unitaires sont envisagées :

- batterie nucléaire de 50 à 100 MWé, à long cycle de fonctionnement pour les pays « nucléaires émergents »
- 300-400 MWé pour certains systèmes modulaires
- jusqu 'à 1200 MWé

Evolution très favorable par rapport au développement durable, ainsi qu'en terme de fiabilité et sûreté.

<u>Complément réacteurs</u>
<u>à sels fondus</u> – MSR
(Jacques Bernard loc. cit. p.
52 et RGN 2003 N°4 p 33 fig
4f).

Le MSR est un système à neutrons épithermiques utilisant un sel fondu du type fluorure, à la fois comme combustible (liquide) et caloporteur, et procédant au traitement en ligne du sel fondu.

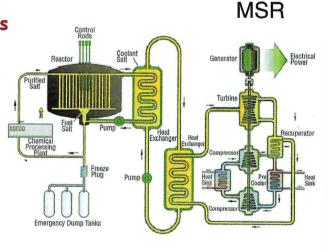
Deux versions : une version brûleur d'actinides ; et une version visant la régénération du combustible fossile, avec un sel d'uranium et de thorium. Le spectre neutronique épithermique est obtenu par le passage du sel dans les canaux d'un bloc de graphite

Réacteurs à sels fondus

Sels fondus fluorures: excellents caloporteurs HT sans pression solvant des actinides corrosion, contrôle et traitement du sel multiples applications

Thorium: abondant, peu d'A.M., pas de contrainte de spectre mais régénération difficile

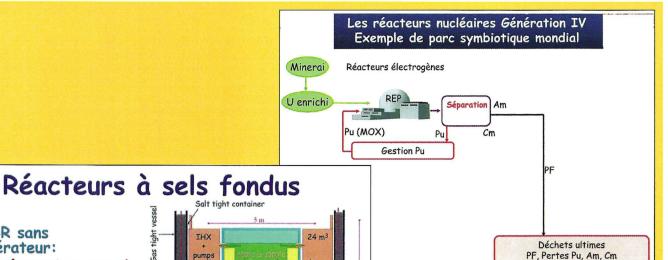
Cycle nouveau, retraitement



canaux d'un bloc de graphite. Le MSR comprend par ailleurs un circuit intermédiaire en sels fluorures et un circuit tertiaire en eau ou hélium pour la production d'électricité.

La température maximale du fluide (sels fluorés) est de 700°C. Le cycle de combustible fermé est prévu pour le recyclage du combustible usé et en particulier des actinides mineurs (Am241 et 243, Np237, Cm244 et 245).

Versions très favorables : développement énergétique durable, sûreté, fiabilité. Faible inventaire fissile. Taux élevé d'utilisation du combustible usé.



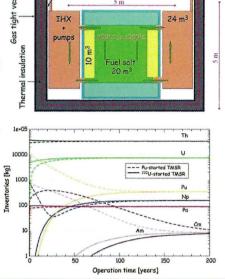
TMSR sans modérateur:

Sûreté passive: pas de réserve de fissile, très bons coefficients

Traitement en ligne simplifié

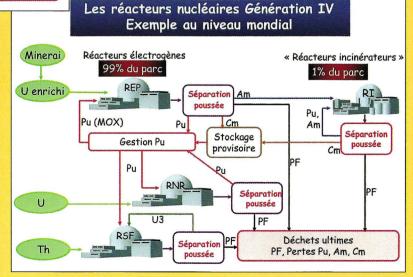
Possibilité de démarrer avec du Pu et A.M. des REP: à la fois incinérateur et régénérateur

MSRE a marché aux USA



Les réacteurs nucléaires Génération IV Exemple de parc symbiotique mondial Minerai Réacteurs électrogènes « Réacteurs incinérateurs » 99% du parc 1% du parc REP U enrichi Séparation Pu, Pu (MOX) Am Séparation Stockage Gestion Pu provisoire Pu RNR Séparatio PF Déchets ultimes PF, Pertes Pu, Am, Cm

TMSR = Thorium Molten Salt Reactor MSRE = Molten Salt Reactor Experiment



Résumé

> Energie

- · question mondiale et primordiale
- Explorer et exploiter sans a priori et avec réalisme toutes les voies
- >Le nucléaire: très gros potentiel pour le futur si
- · Sûr
- · Durable
- · Acceptable et à coût raisonnable

Complément au résumé (Réf Marc STOLTE – RGN 2008 N°1 janv-fév p.23)

Prise en compte de la protection de l'environnement dans la conception et l'exploitation des Instalations Nucléaires de Base (INB). Exigences et avis de l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN).

Installation à l'origine des rejets radioactifs	Dose annuelle due aux rejets (microsievert/an)
Centrale nucléaire (Golfech)	2,6
COGEMA (La Hague)	9
FBFC	1,1
SOCATRI	4,10
EURODIFF	0,73
COGEMA (Pierrelatte)	2,97
COMHUREX (Pierrelatte)	7,69
GB II (estimation)	0,05
CEA (Saclay)	5
CEA (Grenoble)	0,002
CEA (Cadarache)	1,87

Dose annuelle due aux déchets radioactifs en 2007 1 sievert = 1 joule / kg pour un facteur d'efficacité relative = 1

Références bibliographiques générales : les compléments apportés par Louis Avan s'inspirent largement du N° spécial de la Revue Générale Nucléaire de l'année 2003 – N°4 – juillet / août, 140 pages. Consacré aux « réacteurs et cycle du combustible de la quatrième génération », nous devons sa communication à la SFEN-EDF de Clermont, particulièrement Mr Jean Michamblé ingénieur.

Certains détails ou figures sont dus à Jacques Bernard (« les réacteurs nucléaires électrogènes » – Ellipses 2008 – 280 pages) et à la collection RGN de l'année 2008.

Nous exprimons nos remerciements chaleureux à tous les auteurs cités, à toutes les publications concernées, que les lecteurs d'Auvergne Sciences consulteront avec profit. Mais n'oublions jamais qu'une politique énergétique responsable, respectueuse des règles de sécurité et de la protection de l'environnement à long terme ne doit jamais privilégier une seule forme particulière du « bouquet énergétique ».

Un article détaillé sur les unités de mesure des radiations et leur impact biologique viendra compléter et clore cette étude sur « le nucléaire du futur ». Cet article fera le bilan des conséquences de l'accident gravissime de Fukushima (Japon).

LES CADRANS SOLAIRES



GÉRARD BAILLET Ancien Ingénieur en opto-électronique Membre de la S.A.F. et de la commission des cadrans solaires Prix Henry Rey de la S.A.F (Société Astronomique de France) 2006

Aujourd'hui objet de décoration, les cadrans solaires ont connu une longue histoire dans les civilisations et rempli divers rôles: scientifique, de prestige, utilitaire, religieux...

Les musées détiennent des cadrans antiques dont certains sont la marque d'un haut niveau de compétences en astronomie et géométrie (voir le cadran de Carthage au musée du Louvre). On en trouve aussi qui montrent des signes de faiblesse, ne disait-on pas à Rome qu'il était plus facile de trouver deux hommes politiques d'accord que deux cadrans solaires marquant la même heure.

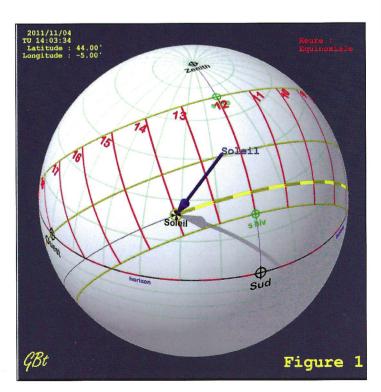
En Europe, entre la fin du XIVème siècle et du XIXème siècle, développement important des cadrans solaires est étroitement lié à celui des horloges mécaniques qui nécessitent une mise à l'heure quasi quotidienne. L'invention et la mise en œuvre du télégraphe, du téléphone et de la radio qui distribuaient une heure précise à volonté a poussé les cadrans solaires au rang d'objets de décoration ou pire de vieilleries à détruire.

Il existe néanmoins dans de nombreux pays des associations très actives qui s'intéressent à tous les aspects des cadrans solaires : technique, historique, littéraire et social au travers d'une étude des devises. Ses membres perpétuent cette science en inventant des nouveaux types de cadrans.

LE PRINCIPE DES CADRANS SOLAIRES

Dans le numéro précédent de la revue (n°75 décembre 2010 page 12) j'ai traité des diverses définitions du temps solaire, j'utiliserai ici l'heure équinoxiale qui est la plus courante.

On peut voir sur la figure 1 la représentation des lignes d'heures équinoxiales sur la sphère céleste locale.



Autres définitions de l'heure équinoxiale ou solaire :

Définition astronomique

L'heure solaire est l'angle horaire du soleil, avec comme unité d'angle l'heure (=15°), sens de rotation positif le même que le mouvement apparent du soleil, zéro heure à midi.

Définition géométrique

L'heure solaire est mesurée par l'angle dièdre entre deux plans:

Plan 1 : plan vertical au lieu du cadran et orienté nord sud

Plan 2 : défini par une droite parallèle à l'axe de rotation de la terre et passant par le lieu (elle est contenue dans le plan 1) et le centre du soleil.

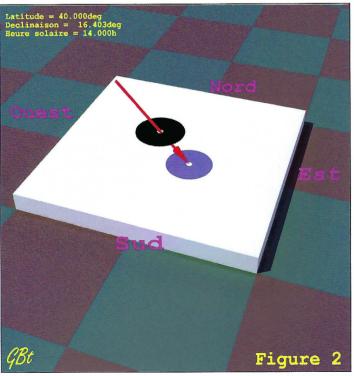
Sens de rotation positif : le même que le mouvement apparent du soleil, avec 1 heure = 15° et en général 12 heures à midi (soleil dans le plan 1).

Vous trouverez à la fin de l'article un lien vers un glossaire des termes astronomiques.

Éléments du cadran

Le cadran est représenté sur la figure 2 ci dessous.

Il est constitué d'une table (le parallélépipède blanc), d'un écran (le disque noir percé).



Le trajet utile de la lumière est matérialisé par la flèche rouge.

Les quatre faces de la table sont orientées suivant les points cardinaux repérés sur la figure.

Dans la suite nous nous intéresserons à la position de la tache de lumière au milieu de l'ombre de l'écran.

La sphère céleste

Afin de faciliter la compréhension on ajoute au dispositif la sphère céleste locale. Le centre de la sphère est positionné au centre de l'écran, de cette manière on peut réduire la dimension de la sphère.



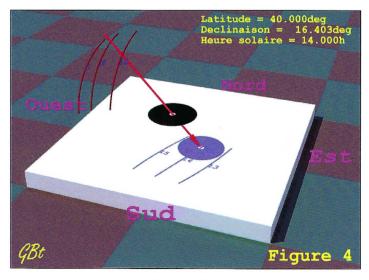
Pour la clarté du croquis la sphère n'est pas représentée et on ne garde que les lignes d'heures.

La partie des lignes d'heures plus large matérialise la zone où le soleil circule, les extrémités de cette zone sont les solstices d'été et d'hiver.

Le point où toutes les lignes se coupent est le pôle nord céleste.

Un point du cadran

Sur cette figure on a conservé uniquement 3 parties utiles des lignes d'heure.



La source de lumière de l'image est positionnée de manière identique à un soleil à 14h.

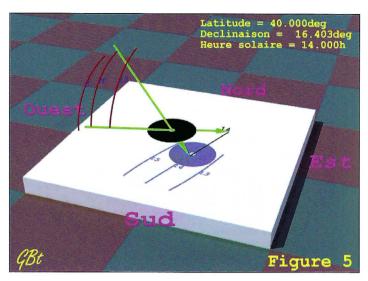
Les points importants à observer sur la figure sont les suivants :

1. L'ombre de la ligne d'heure 14 passe par le milieu de la tache de lumière au centre de l'ombre de l'écran.

2. Le trajet de la lumière représenté par la flèche rouge coupe aussi la ligne d'heure 14.

La flèche pointe sur un point de la ligne d'heure 14, il reste à trouver comment tracer la ligne qui rassemble les points au centre de la tache de lumière lorsqu'il est 14 h solaire.

Principes pour tracer une ligne d'heure à partir de la sphère céleste.

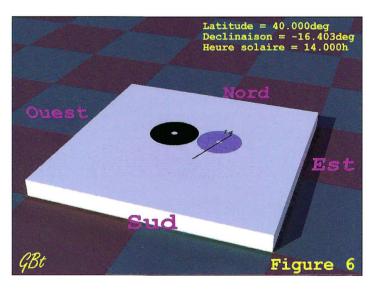


Le principe du tracé utilise la propriété géométrique suivante :

La projection gnomonique d'un grand cercle sur un plan est une droite.

Il suffit d'en connaître deux points pour pouvoir tracer cette droite.

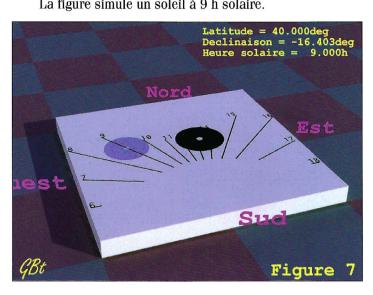
Pour tracer la partie utile de la ligne d'heure, celle où la tache de lumière circule, pour la même heure solaire, dans l'année : il faut marquer les projections du rayon lumineux , pour les deux solstices (les flèches vertes simulent les rayons lumineux aux solstices) , et tracer une droite entre ces deux points, il reste à marquer l'heure correspondante sur la ligne.



La tache de lumière est toujours sur la ligne d'heure pour une autre déclinaison du soleil (un autre moment dans l'année).

L'ensemble des lignes d'heures

Figure 7 : une vue des lignes d'heures dessinées avec le même procédé que celui défini pour la ligne d'heure 14. La figure simule un soleil à 9 h solaire.



Ouelques remarques intermédiaires

La programmation des figures n'a pas utilisé les calculs classiques (formules avec lignes trigonométriques etc..) mais uniquement des fonctions de dessin en 3D qui, à la syntaxe près, ressemble au texte pour décrire le procédé. Le logiciel utilisé est Pov-Ray.



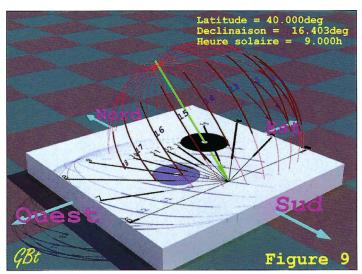
Elle représente un cadran solaire incliné et orienté différemment du précédent. Il est 7h solaire. La figure est réalisée à partir du même programme de dessin.

Il existe une autre approche généralement utilisée pour le tracé des cadrans à la règle et au compas.

Éléments pour le tracé à la règle et au compas

Le pôle nord Figure 9

Sur le cadran nous avons prolongé les lignes d'heures, elles se coupent en un point.

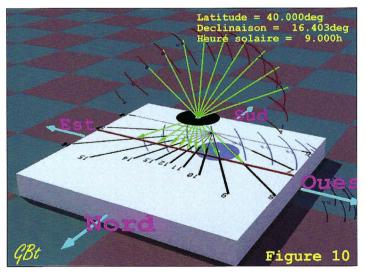


Sur la sphère céleste les parties utiles des lignes d'heures sont prolongées et elles se coupent toutes au pôle nord céleste (par définition).

La flèche verte rend évidente l'association entre le pôle nord céleste, le centre de l'écran et le point d'intersection des lignes d'heures. Cette propriété est utilisée pour le tracé à la règle et au compas.

L'équateur

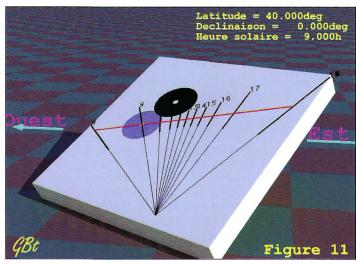
A partir de l'équateur de la sphère céleste et pour chaque heure, on projette l'image du soleil au travers de l'écran sur la table (nous sommes à l'équinoxe).



Ces projections sont matérialisées par les flèches vertes. Toutes les flèches sont contenues dans le plan de l'équateur et elles sont réparties tous les 15°. La suite des points projetés sur la table est alignée sur une droite. Cette droite est une ligne appelée journalière parce que le soleil la parcourt durant la journée et dans notre cas il s'agit du jour de l'équinoxe (en négligeant la variation de déclinaison du soleil en quelques heures).

Le tracé

Le tracé, à la règle et au compas, des lignes d'heures du cadran utilise les deux éléments précédents et il faut connaître la latitude du lieu. Diverses méthodes existent, mais je pense que le plaisir de tracer son cadran passe par la découverte d'un procédé personnel, aussi à vous de jouer.



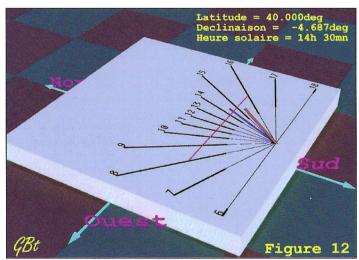
Aspect du cadran pour une orientation quelconque

Les styles

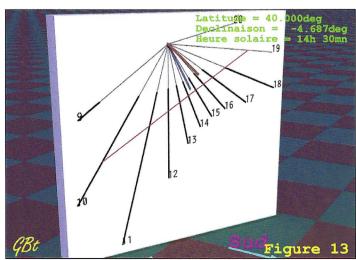
Le style dans un cadran solaire est le dispositif qui matérialise la direction du soleil. Dans les explications précédentes il s'agissait d'un écran.

Le style est une tige polaire

Dans ce cas la tige est dirigée vers le pôle nord céleste et son extrémité joue le même rôle, dans les calculs, que le centre de l'écran. Cette disposition présente l'avantage d'avoir une ombre qui pivote autour du pied du style qui est en même temps le point d'intersection de toutes les lignes d'heures, l'ombre se présente alors comme une aiguille tournant sur des graduations horaires.

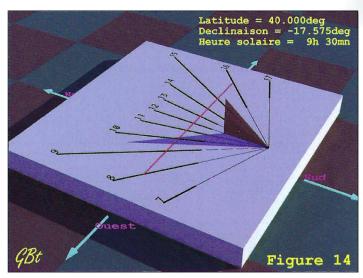


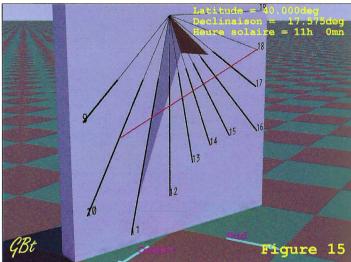
Cadran horizontal



Cadran vertical tourné de 30 vers l'ouest

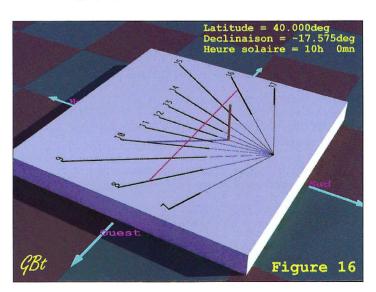
Le style est un triangle





L'avantage de ce style est une meilleure rigidité, et du point de vue de la construction une plus grande facilité pour obtenir de manière précise l'angle entre la table et l'arête du style.

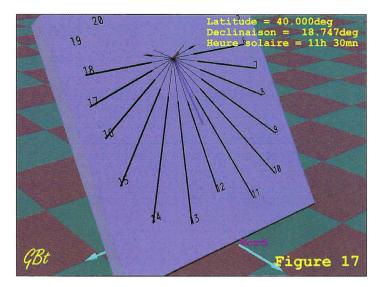
Une tige perpendiculaire à la table



Ce type de style n'est pratiquement pas utilisé. Il faut lire l'heure à l'extrémité de l'ombre.

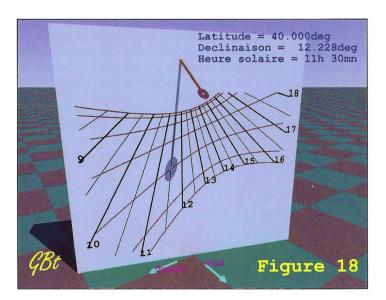
Cependant on le trouve dans des ouvrages « approximatifs » et dans ce cas il est placé à l'intersection des

lignes d'heures pour un cadran horizontal sous nos latitudes, ce qui est faux, et ne permet pas l'heure, sauf à placer ce cadran au pôle (nord ou sud), lieu peu fréquenté où de toute façon il serait vite recouvert de neige!



En inclinant le cadran de manière à avoir le plan de la table parallèle au plan de l'équateur, on obtient un cadran fonctionnel avec les lignes d'heure équidistantes de 15 degrés. Ce cadran doit être gradué sur les deux faces : une face automne hiver, une face printemps été. Le cadran se confond alors avec un cadran à style polaire.

Les lignes journalières



Il s'agit d'un cadran solaire vertical tourné de 20° vers l'ouest.

Le cadran est gradué en heures et demi-heures. Son style est mixte, il est composé d'une tige polaire suivie d'un écran percé.

Les lignes rouges sont des lignes journalières. Certains jours, la tache de lumière au milieu de l'ombre de l'écran suit une de ces lignes, elles sont des branches d'hyperboles, l'équinoxe étant un cas particulier qui donne une droite.

Ces lignes sont choisies de manière à correspondre à des jours particuliers où l'ascension droite du soleil est un multiple entier de 2h (ou 30°). Dans notre calendrier grégorien ces jours tombent aux environs du 20 de chaque mois. Il s'agit aussi des limites des signes du zodiaque chers à nos devins astrologues. Ce type de double graduation donne donc l'heure solaire ainsi qu'un calendrier grégorien perpétuel.

Sur la figure 18 il est 11h 30 solaire et la date en 2011 serait le 22 avril ou le 21 août.

Nota : autour de ces dates la déclinaison du soleil (angle du soleil par rapport au plan de l'équateur) varie de 20' de degrés par jour.

Certains cadrans portent des lignes journalières particulières comme des dates anniversaires de naissance ou d'événements importants.

La partie droite et haute des graduations est tronquée, elle correspond au soleil à l'horizon, il est inutile de tracer les graduations lorsque le soleil est couché. Les lignes d'heures tronquées donnent alors l'heure du coucher du soleil suivant la date donnée par les lignes journalières. On remarque, par exemple, qu'aux équinoxes le soleil se couche à 18h solaire.

CONCLUSION

Cet article est un « survol » du cadran solaire classique, il en existe de nombreux autres types. Le tracé d'un cadran de ce type à la règle et au compas ne présente pas de difficulté et n'a pas été développé dans cet article, de plus aujourd'hui, l'utilisation de logiciels facilite grandement la tâche.

« LA GNONOMIQUE » de Denis Savoie est un ouvrage complet qui donne un très bon aperçu des divers types de cadrans sans être totalement exhaustif.

> Vous trouverez ci dessous deux liens internet pour télécharger les logiciels et explications nécessaires.

> Celui de M Blateyron http://www.shadowspro.com/fr/index.html

Celui de M Dallet http://isheyevo.ens-lyon.fr/village_este/cycles/cycle-3/cadrans_solaires/solarium

Glossaire des termes astronomiques l'Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides http://www.imcce.fr/fr/grandpublic/glossaire.php

Voir l'article précédent (n°75 décembre 2010) pour la bibliographie

Thermodynamique, structure, stabilité et fluctuations

J.K. PLATTEN
Prof. Em., Université de Mons, Belgique.
jean.platten@skynet.be

La description la plus complète que l'on puisse avoir d'un système, c'est la connaissance des positions (ou coordonnées) ainsi que des vitesses (ou énergies) de chaque molécule (ou atome) à chaque instant. Mais les systèmes dont on s'occupe contiennent en général un très grand nombre de molécules (10²³-10²⁴) et donc on voit immédiatement qu'on se heurte à une grande difficulté pratique, en ce sens qu'il n'existe pas d'ordinateurs suffisamment puissants pour traiter autant de valeurs numériques. Et de plus, une telle description serait sans intérêt en raison même de notre incapacité à reproduire le même état initial du système en vue de répéter une expérience. Heureusement la thermodynamique propose un « langage simplifié », généralement suffisant. Par exemple, si on désire déterminer l'évolution de la température dans un morceau de cuivre, ce n'est pas la peine d'étudier le mouvement de vibration de chaque atome au sein du réseau cristallin : il suffit de résoudre une équation toute simple, dite équation de Fourier.

Dès sa naissance, la thermodynamique classique est dominée par la problématique des machines thermiques. Il faut dire qu'elle est née avec le début de l'ère industrielle et même de nos jours il faut aussi que cette thermodynamique classique, science de l'ingénieur par excellence, s'intéresse au fonctionnement d'un frigo, d'une pompe à chaleur, d'un moteur diesel voire d'une centrale nucléaire. Citons à titre d'exemple historique le travail fondamental d'un des « pères fondateurs » de la thermodynamique classique Sadi Carnot (oncle d'un ancien président français de même nom) paru en 1824 « Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance » ; il est possible de télécharger le texte intégral de ce mémoire à partir de la toile. Mais dans cet article, nous voulons apporter une brise de fraîcheur et évoquer quelques idées plus récentes de la thermodynamique moins liées à des problèmes technologiques.

La thermodynamique se base sur deux principes. Le premier concerne la conservation de l'énergie : on ne peut pas créer de l'énergie à partir de rien. Mais nous allons surtout parler du second principe. Il est bien connu que, dès la formulation de ce second principe, la thermodynamique s'est consacrée aux propriétés des systèmes ayant atteint leur équilibre (une situation où les grandeurs intensives telles la température, la pression, les concentrations des différents constituants, ou mieux leurs potentiels chimiques, ont la même valeur en tout point du système). Le milieu du siècle dernier (disons vaguement 1930 - 1960) a vu le développement d'une thermodynamique dite « linéaire » avec des lois valables au voisinage de l'équilibre, là où les forces généralisées (les « causes » des phénomènes) sont reliées aux flux (disons les « effets ») par des lois linéaires. Le nom de L. Onsager (prix Nobel en 1968) est lié à cette époque. A titre d'exemple, s'il existe un gradient de température $\partial T(x)/\partial x$ (ou plus simplement une différence de température) entre deux points x₁ et x₂ dans un système, il y aura en conséquence un flux de chaleur dirigé du point chaud vers le point froid et conformément à une relation linéaire entre force et flux, on aura

$$Q = -\lambda \frac{\partial T(x)}{\partial x}$$
 (1)

expression dans laquelle λ est la conductibilité thermique du système ou du matériau. Un autre exemple est celui d'une réaction chimique où la vitesse de la réaction (un flux de matière qui se transforme) serait proportionnelle à l'affinité de la réaction (la tendance qu'elle a à se produire, une force généralisée), ce qui est rarement le cas, car on démontre dans des cours classiques de thermodynamique chimique que la relation entre vitesse et affinité est de la forme

$$v \propto (1 - e^{-A/RT}) \qquad (2)$$

où **R** est la constante des gaz et **T** la température. Ce n'est que pour une affinité très petite (voisine de zéro) que

l'exponentielle peut être développée en série $e^{-A/RT} \approx 1 - A/RT$ permettant alors

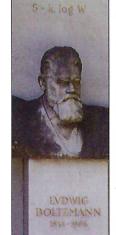


Fig 1

d'obtenir une relation linéaire v∞ A/RT .

Pour expliquer les phénomènes dont nous voudrions parler dans cet article il est nécessaire d'aller plus loin et de quitter le domaine des relations linéaires entre forces et flux. Mais avant toute chose il est nécessaire à ce stade d'introduire une grandeur, l'ENTROPIE, notée S et dont la définition adoptée ici est due au physicien viennois Ludwig Boltzmann (Vienne 1844-1906). Cette définition qui lui donne un sens physique facile à comprendre, est par ailleurs gravée en épitaphe sur sa tombe (voir photo, Figure 1)

$S = k \times ln W$ (3)

L'entropie S est proportionnelle (k) au logarithme népérien de W qui représente le nombre d'états microscopiques que le système peut adopter. La constante de proportionnalité k est appelée la constante de Boltzmann. Le nombre W, parfois appelé nombre de complexions est calculable. L'exemple le plus simple que l'on puisse donner est celui d'un ensemble de molécules diatomiques hétéronucléaires dont les deux atomes discernables ont pratiquement la même taille (NO; HD; O18O17), voire des molécules plus complexes telles l'éthylène deutéré CH₂ = CD₂. Dans tous les cas on peut considérer ces molécules comme ayant une forme symétrique par rapport à l'axe interatomique (ou l'axe C=C dans le cas de l'éthylène) mais pouvant être orientées dans un cristal de deux manières différentes, puisque possédant une « tête », par exemple le deutérium dans HD, ou la partie deutérée CD₂ dans l'éthylène et une « queue » soit l'hydrogène H dans HD ou la partie non deutére CH2 dans l'éthylène. Toutes ces molécules peuvent donc être symboliquement représentées par une flèche indiquant que dans un cristal elles peuvent être orientées avec la « tête » dirigée soit vers le haut ↑, soit vers le bas↓.

La figure 2 reprend quelques configurations possibles pour un cristal comprenant 16 molécules seulement. Il est à

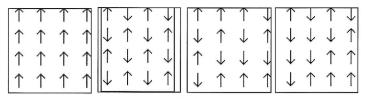


Fig 2

noter que l'on a supposé être à une température tellement basse (proche du zéro absolu) que tout mouvement des molécules est devenu impossible (ni translation, ni rotation, ni vibration) et que seule l'orientation des molécules (des flèches) dans le cristal permet d'obtenir différents états microscopiques. Puisque une même molécule ne peut s'orienter que de deux manières et qu'il y en a 16, le nombre d'états microscopiques (le nombre de dessins différents analogues à ceux de la figure 2 que l'on peut faire) est de 216, soit 65.536 dessins différents (dont 4 seulement sont représentés à la figure 2). En général, avec N molécules, W = 2^{N} et l'entropie vaudra $S = k \ln 2^{N} = Nk \ln 2 = 0.69 Nk$. Notons que ces résultats théoriques sont vérifiés par des expériences calorimétriques. La chose essentielle à noter ici est que parmi les 65.536 dessins différents que l'on pourrait faire, quelques uns seulement correspondent à un ordre parfait, comme le cas (A) où toutes les molécules sont orientées de la même manière, ou alors le cas (B) où il y a une alternance parfaite permettant de savoir comment est orientée n'importe quelle molécule connaissant l'orientation de la première. Mais en général (cas (C) et (D)) la conformation du cristal est totalement désordonnée et semble être due au hasard (un peu comme si nous disposions de 16 pièces de monnaie qu'on lancerait en l'air et qui retomberaient, soit pile, soit face, de manière tout à fait désordonnée). Ceci nous amène à dire que l'entropie est une mesure du désordre dans un système, en ce sens que plus S ou W est grand, plus le pourcentage de dessins correspondant au désordre (au hasard) analogues aux cas C et D de la figure 2, est grand par rapport à ceux représentant l'ordre, cas A ou B.

Une formulation classique du second principe de la thermodynamique prône la croissance de l'entropie d'un système isolé lorsque celui-ci évolue vers l'équilibre. A nouveau prenons un exemple trivial pour illustrer ce propos (Figure 3).

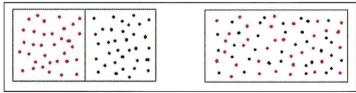


Fig 3

On considère une boîte divisée en deux compartiments par une cloison matérialisée dans la partie gauche de la figure 3 par le trait vertical. Dans les deux parties de cette boite, on met deux gaz différents, disons de l'hélium et du néon, ou tout simplement des molécules rouges et noires. On pourrait calculer l'entropie de ce système composé de deux gaz monoatomiques grâce à la formule dite de Sackur-Tetrode mais nous ne le ferons pas ici car ce n'est pas notre propos. Notons que le nombre de complexions **W** est « assez petit », car il y règne un certain ordre, une certaine structure, en ce sens que toutes les molécules rouges sont nécessairement à gauche et que toutes les molécules noires sont nécessairement à droite. Enlevons la cloison, supprimons en quelque sorte la contrainte et laissons le système évoluer vers

l'équilibre. Etant donné le phénomène de diffusion, les molécules de chaque sorte vont occuper tout le système, partie droite de la figure 3. De nouveaux états microscopiques deviennent accessibles puisque des molécules rouges peuvent maintenant se trouver à droite et des noires à gauche. situation qui était interdite initialement. Le nombre d'états microscopiques accessibles au système (W) a donc augmenté. L'entropie a augmenté. Le désordre moléculaire dans le cas de la partie droite de la figure 3 est maintenant plus grand. La structure initiale a disparu. On n'a aucune chance, dû au mouvement aléatoire des molécules, de revenir spontanément en arrière (au cas de la partie gauche). La thermodynamique classique apparaît essentiellement comme une loi d'évolution exprimant une évolution vers l'homogène, une désorganisation continue, une disparition des structures introduites par les conditions initiales. Faut-il dès lors penser qu'« il y a très longtemps » tout était structuré, tout était « ordre » sur cette terre et que depuis cet « âge d'or » au cours du temps qui s'écoule toute structure initialement préétablie désorganise, disparaît, se dissout dans un chaos progressif? Quand nous regardons autour de nous l'évolution de beaucoup de systèmes, en particulier biologiques, on constate que bien au contraire on évolue du simple au structuré, de l'homogène vers l'inhomogène, de l'absence de structures vers la création spontanée de structures. La croissance d'une plante, le développement d'un embryon, impliquent un ensemble de phénomènes complexes qui conduisent à une organisation élevée des atomes et des molécules qui les constituent. La biologie fournit beaucoup d'exemples de ce type de comportement collectif. Il y avait donc au début du XXème siècle un fossé considérable entre thermodynamique et biologie. Il faut donc aller plus loin que la thermodynamique classique d'équilibre ou proche de l'équilibre, il faut l'étendre loin de l'équilibre là où les lois ne sont plus linéaires. Cette nouvelle thermodynamique a pris son essor il y a un demi siècle et je voudrais citer ici un de ses fondateurs, Ilya Prigogine (Moscou 1917 - Bruxelles 2003), Professeur à l'Université Libre de Bruxelles, Prix Nobel de chimie. en 1977.

La suite de cet article sera consacrée à deux exemples pour décrire la création de structures :

- 1) Le cas de réactions chimiques
- 2) En hydrodynamique, le cas d'une couche fluide chauffée par le bas.

Dans le cas d'une réaction chimique, le bilan à l'échelle macroscopique représente la somme d'un grand nombre de réactions élémentaires mettant en jeu des intermédiaires qui sont successivement créés puis détruits. Par exemple la synthèse de HBr, selon le bilan global

$$\mathbf{H_2} + \mathbf{Br_2} \stackrel{\leftarrow}{\rightarrow} \mathbf{2HBr} \cdot (4)$$

se produit en 5 étapes impliquant des intermédiaires que sont les radicaux Br° et les radicaux H°. Ces intermédiaires sont donc successivement créés dans certaines étapes, puis détruits dans d'autres. Parfois les concentrations de ces espèces intermédiaires dépendent du temps de façon monotone, et deviennent stationnaires à l'équilibre. Précisément dans l'équation (4) le sens de la double flèche implique une réaction d'équilibre, une réaction limitée, qui peut se passer dans les deux sens. L'équilibre est caractérisé par des concentrations (indiquées par des crochets [] dans (5)) bien précises de chaque espèce chimique selon une loi dite de Guldberg et Waage

$$\frac{\left[\mathbf{HBr}\right]^{2}}{\left[\mathbf{H}_{2}\right]\left[\mathbf{Br}_{2}\right]} = \mathbf{K}$$
(5)

où K a une valeur bien déterminée pour chaque réaction chimique. Si K→∞ la réaction est complète en ce sens que les concentrations des espèces chimiques en dénominateur, donc de celles écrites dans le membre de gauche de l'équation stoechiométrique, tendent vers zéro. De même dans les situations intermédiaires, les concentrations ont des valeurs bien précises, même à l'équilibre. Cet équilibre est toujours atteint dans un système isolé, où après avoir introduit les réactifs on les laisse évoluer à leur guise. Par définition même de l'équilibre, les concentrations ne dépendent ni du temps, ni de l'espace. Le système est homogène, sans aucune structure. Cet équilibre est stable, c'est-à-dire que toute fluctuation dans les concentrations des différentes espèces, fluctuations inhérentes aux systèmes comportant un très grand nombre de molécules, va régresser au cours du temps et ramener le système à l'équilibre défini par l'équation (5). Pour écarter le système de son état d'équilibre de manière durable, il faut travailler en système ouvert, dans un réacteur chimique ouvert, en ce sens qu'il faut continuellement introduire les réactifs (ce qui est écrit dans le membre de gauche) et soustraire les produits (écrits dans le membre de droite) dans le réacteur chimique de manière à ce que les concentrations puissent être maintenues différentes de celles imposées par la loi d'équilibre. On parle alors d'un état de non équilibre, éventuellement stationnaire si les concentrations ne dépendent pas du temps. Si on n'est pas trop loin de l'équilibre, si les concentrations des réactifs et produits imposées par le caractère ouvert du réacteur produisent une valeur de la constante K pas trop différente de celle qu'elle devrait avoir selon la loi de Guldberg et Waage, rien de spectaculaire ne se passe. Cet état stationnaire de non équilibre est stable également.

C'est ce qui est représenté à la figure (4) où lorsqu'on s'écarte progressivement de l'équilibre, l'état du système change de manière continue le long de la branche dite « branche thermodynamique ». Le nouvel état est essentiellement obtenu par une modification continue de l'état d'équilibre. Et ce nouvel état stationnaire de non équilibre reste stable vis-à-vis des fluctuations spontanées dans le système. On voit donc la nécessité d'inclure dans une théorie thermodynamique la notion de stabilité de non équilibre, ainsi que l'existence des fluctuations qui modifient aussi bien les flux thermodynamiques (les vitesses des réactions \mathbf{v}_{α}) que les

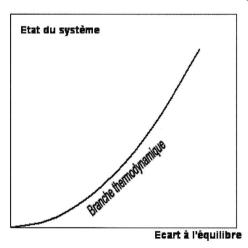
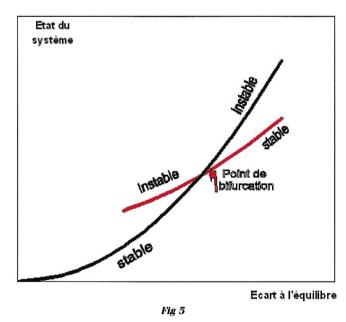


Fig 4 forces thermodynamiques (les affinités des réactions ${\bf A}_{cr}$).

Il n'est pas question ici de développer une telle théorie, ni sa formulation mathématique réservée aux spécialistes dans le domaine, mais elle a été faite, permettant ainsi de comprendre les conditions qui pourraient mettre en danger la stabilité de l'état stationnaire de non équilibre, de repérer les contributions « dangereuses » à la condition de stabilité. Pour le cas de réactions chimiques, le résultat est le suivant : seuls les systèmes chimiques dont les réactions possèdent des mécanismes cinétiques présentant des boucles de rétroaction peuvent mettre en danger la stabilité de la branche thermodynamique et évoluer alors sur une toute autre branche donnant naissance à des phénomènes d'autoorganisation temporelle ou spatiale, à condition qu'ils soient assez loin de l'équilibre. Le cas le plus simple de rétroaction est l'autocatalyse, c'est-à-dire l'activation d'une réaction par l'un des produits qu'elle forme et décrit par exemple par $A+B+X \rightarrow 2X+Y$ (au lieu de simplement $A+B \rightarrow X+Y$). Cette autocatalyse, ou en général ces boucles de rétroaction, permettent d'avoir des termes non linéaires dans les équations (par exemple cinétiques) leur permettant par là même d'avoir plusieurs types de solutions. Donc « non linéarités » et « loin de l'équilibre » sont des conditions pour pouvoir quitter la branche thermodynamique via des fluctuations qui au lieu de régresser au cours du temps vont au contraire s'amplifier, la branche thermodynamique étant devenue instable, et permettre au système d'évoluer le long d'une nouvelle branche correspondant à une auto-organisation de la matière. Cette situation est schématiquement représentée à la figure 5 où la nouvelle branche correspondant à l'auto-organisation (oserait-on l'appeler la « branche de la vie » ?) a été dessinée en rouge.

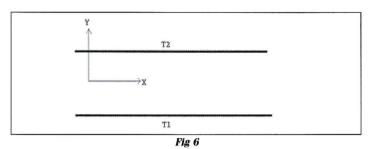
Les deux branches se coupent au point de « bifurcation ». Lorsque l'écart à l'équilibre est faible, la branche thermodynamique est stable, l'autre est instable. Pour un écart suffisamment important à l'équilibre thermodynamique, lorsqu'on arrive au point de bifurcation, on ne reste plus sur la branche thermodynamique qui est devenue instable ; on bifurque sur la « branche de la vie » qui elle est devenue stable. Les concentrations des différentes espèces chimiques dépendent cette fois sur cette branche de l'espace et/ou du temps : c'est l'organisation spontanée spatiale et/ou temporelle des systèmes.



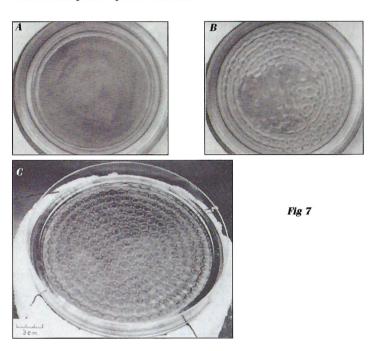
Dans ces organisations spatiales, ces structures, dites « dissipatives », correspondent à une faible valeur de l'entropie et ces situations sont engendrées dans des systèmes capables d'utiliser une partie de l'énergie ou de la matière échangée avec le milieu extérieur pour édifier un ordre macroscopique interne. Ces variations spatiales ou périodiques des concentrations peuvent souvent être mises en évidence par certaines propriétés du mélange, comme la couleur, l'absorption de la lumière de longueur d'onde bien

précise, le pH, le potentiel redox, etc... Certains systèmes présentent une périodicité temporelle remarquablement stable et se comportent comme de véritables horloges chimiques. Nous donnerons des exemples concrets de tels comportements un peu plus tard.

Considérons cette fois une couche de fluide (pourquoi pas l'eau tout simplement) horizontale, contenue dans un récipient et limitée par des « parois » matérialisées à la figure 6 par les deux traits horizontaux. L'axe horizontal sera l'axe X tandis que l'axe vertical sera l'axe Y. Les parois

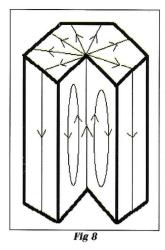


inférieure et supérieure sont maintenues à des températures T1 et T2 différentes. Dans ce cas l'équilibre thermodynamique correspond à une température identique partout, soit T1 = T2, ainsi qu'à l'absence de tout mouvement convectif (vitesse macroscopique nulle en tout point du liquide). C'est l'origine des axes dans la figure 5. Il est aisé de maintenir cette couche fluide hors d'équilibre : il suffit de la chauffer, de faire en sorte que T1≠T2. Nous décidons de la chauffer par le bas de manière à ce que T1>T2. La raison est que si nous chauffons par le haut, rien ne se passera : la montre que stabilité de la la thermodynamique reste stable, le liquide reste au repos et aucune structure n'apparaît, le système se contentant d'une température non uniforme, augmentant linéairement avec la hauteur Y, de la valeur T1 plus petite en bas à la valeur T2 plus grande en haut. Tel est le résultat de la stabilité d'une couche fluide chauffée par le haut. La situation est tout à fait différente si on chauffe la couche par le bas. Dans ce cas des instabilités sont possibles. Une des conditions est d'être loin de l'équilibre thermodynamique, d'avoir un gradient de température suffisamment important, supérieur à celui correspondant au point de bifurcation. Dans ces conditions, la branche thermodynamique peut devenir instable, c'est-à-dire que les fluctuations s'amplifient. Il s'agit ici de fluctuations de température et de vitesse. Normalement la température dans l'état stationnaire n'est pas une fonction de la coordonnée horizontale X (elle ne dépend que de Y); mais suite à des fluctuations nées du hasard et dont on n'est pas maître, la température peut localement être un peu plus petite (disons un millième de degré ou beaucoup moins, mais cela suffit!) et un peu plus grande ailleurs. De même un petit groupe de molécules peut localement avoir une vitesse « collective » très petite (par exemple un petit mouvement vers le haut, mais infiniment petit) au lieu d'avoir une vitesse nulle. Qu'advient-il à ces fluctuations ?. Le critère de stabilité thermodynamique permet de répondre à cette question. Par exemple si le liquide est un très bon conducteur de la chaleur, les fluctuations de température auront tendance à s'amortir plus vite que si le fluide est un mauvais conducteur. Si la viscosité du fluide est grande, elle aura tendance à s'opposer au mouvement, à amortir les fluctuations de vitesses. Il y a donc des causes qui tendent à ce que le fluide reste au repos. Par contre comme nous sommes dans le champ de la pesanteur et que le fluide se dilate, le petit élément de volume où les quelques millions (ou milliards) de molécules sont plus chaudes que leurs voisines, sera moins dense et aura tendance à s'élever dans la couche alors que le fluide environnant plus froid aura tendance à descendre. La dilatation du fluide dans le champ de la pesanteur est une cause qui peut mettre en péril la stabilité de la branche thermodynamique. Donc la « poussée d'Archimède » tend à créer le mouvement ; la diffusivité thermique et la viscosité au contraire tend à s'opposer à la création de ce mouvement. Il est à noter que cette poussée d'Archimède liée à l'existence de zones plus chaudes adjacentes à des zones plus froides, est proportionnelle à la différence de température ΔT=T1-T2 imposée au fluide par chauffage par le bas. Pour que la poussée d'Archimède l'emporte sur la dissipation thermique et visqueuse, il faut donc une différence de température suffisamment grande, il faut être loin de l'équilibre thermodynamique, il faut opérer au-delà du point de bifurcation. Bien entendu, ces problèmes de stabilité de fluide sont connus depuis plus d'un siècle, mais les développements récents de la thermodynamique de non équilibre permettent d'envisager des phénomènes aussi différents que les réactions chimiques instables ou la stabilité de couches fluides dans un même mode de pensée, dans un cadre unifié : l'écart suffisamment important à l'équilibre et les non linéarités sont les deux conditions pour que la branche thermodynamique devienne instable et sont source de structure. En quoi consiste cette structure dans le cas d'une couche fluide chauffée par le bas? La figure 7 montre des photographies du liquide, les vues étant prises par le dessus.



Pour la beauté des images, le fluide est souvent une huile de silicone et la visualisation du mouvement se fait grâce à de la poudre (mieux de très petites paillettes) métallique (d'aluminium, par exemple) mise préalablement en solution par agitation. La partie A de la figure 7 montre le fluide au repos avant la bifurcation : aucune structure n'est visible. La partie B montre la naissance de la convection au point critique : de petits mouvements, de petits tourbillons se mettent en place. La partie C montre la convection parfaitement établie dès que l'on a dépassé le seuil critique. Une remarquable structure en cellules prismatiques hexagonales s'est créée spontanément.

A l'intérieur d'une cellule hexagonale, le fluide monte au centre, arrivé à la surface supérieure il s'étale vers les bords et redescend le long des 6 faces de ce prisme hexagonal comme le montre la figure 8 dans laquelle on a fait une « coupe » triangulaire pour bien visualiser le mouvement à l'intérieur d'une cellule. Donc considérant l'ensemble des cellules prismatiques hexagonales de la figure 7 C, si on se balade horizontalement en passant d'une cellule à une autre,



on verra successivement le liquide monter, puis descendre, monter encore puis redescendre et ainsi de suite. La composante verticale de la vitesse V_{γ} est donc une fonction tout a fait périodique (disons sinusoïdale) de la coordonné horizontale X, comme peuvent l'attester des mesures quantitatives précises de cette vitesse par vélocimétrie Laser – Doppler par exemple.

Il en est de même pour la température : là où le liquide monte, venant du bas, donc de la paroi chaude, il sera plus chaud,

tandis que là où il descend, la température sera plus froide. On observe une variation tout aussi périodique de la température avec la coordonnée horizontale X telle que peut le révéler une thermographie par caméra infrarouge. Ces cellules hexagonales prismatiques sont connues et étudiées depuis fort longtemps, découvertes il y a un siècle par le français Henri Bénard. Nous replaçons simplement leur étude dans un cadre très général, celui de la création de structures dites dissipatives, loin de l'équilibre thermodynamique. Il est clair que ces structures ne peuvent se maintenir que grâce aux échanges, ici d'énergie, avec le monde extérieur. Elles utilisent l'énergie que l'on fournit pour se créer et subsister, d'où leur nom de « structures dissipatives ». Si on cesse de chauffer, elles disparaissent tout aussi spontanément, puisque l'on retourne à l'équilibre thermodynamique.

Il est temps maintenant de donner des exemples de structures loin de l'équilibre dans le cas de réactions chimiques, ce que nous avions déjà évoqué dans un paragraphe précédent. Une réaction chimique particulièrement étudiée est connue sous le nom de « réaction de Belousov-Zhabotinski » (en abrégé BZ). Boris Pavlovich Belousov dans les années 1950 travaillait dans un laboratoire de l'Armée Rouge et étudiait le cycle de Krebs, un ensemble de réactions biochimiques intervenant dans le métabolisme des sucres, dont le glucose. Une des espèces intermédiaires dans ce cycle de Krebs est l'acide citrique et Belousov voulait le doser par le bromate de potassium KBrO₃. L'acide citrique est oxydé en CO₂ et l'ion bromate BrO₃- est réduit en ion bromure Br-. Comme toute réaction d'oxydo-réduction est caractérisée par un transfert d'électrons, et dans le but d'augmenter la vitesse de la réaction de titrage, Belousov ajouta un catalyseur, l'ion cérium qui peut exister sous la forme Ce³⁺ ou Ce⁴⁺ facilitant le transport d'électrons. Comme souvent dans un titrage on ajoute un indicateur coloré pour observer le « point d'équivalence » par un changement de coloration. Au lieu de cela Belousov a observé des changements périodiques de coloration. C'est donc un peu par hasard que Belousov, lors de sa tentative de dosage de l'acide citrique par du bromate, a « vu » des oscillations dans les concentrations des différentes espèces chimiques, sans comprendre leur importance et leur origine. A cette époque aucune revue russe importante n'a voulu publier ses résultats car, pensaient les experts, non conformes aux lois de la thermodynamique. Il les a donc publiés dans une revue tout à fait obscure et sans aucun impact scientifique (Sbornik Referatov po Radiaconi Medecine). Aussi à cette époque de guerre froide, l'occident n'avait pratiquement pas accès à ce qui se faisait derrière le rideau de fer et méconnaissait tout à fait les travaux faits à l'est. En 1961, Anatol Zhabotinski s'intéresse aux oscillations chimiques, et reprend les expériences de Belousov dont il avait entendu parler, mais il remplace l'acide citrique par de l'acide malonique $\mathrm{CH}_2(\mathrm{COOH})_2$. Donc la réaction BZ est simplement l'oxydation de l'acide malonique par du bromate dont le bilan global s'écrit

$$3 \text{ CH}_2(\text{COOH})_2 + 4 \text{ BrO}_3 \rightarrow 4 \text{Br}_1 + 9 \text{ CO}_2 + 6 \text{ H}_2 \text{ O}_3$$
 (6)

Pour fonctionner à une vitesse appréciable, il faut un catalyseur, le couple Ce³+/Ce⁴+, (le couple Fe²+/Fe³+ est tout aussi efficace) et la réaction a lieu en milieu acide. Si l'équation (6) représente le bilan global, elle se déroule cependant en un très grand nombre d'étapes élémentaires, entre 18 et une quarantaine selon les auteurs, impliquant 21 espèces chimiques intermédiaires différentes. Il faut donc un mécanisme simplifié pour pouvoir avancer dans une modélisation mathématique de cette réaction. Selon un modèle connu sous le nom d'OREGONATOR, car étudié par une équipe de chercheurs de l'université d'Oregon aux Etats-Unis, les étapes importantes seraient :

1 ere phase:

$$\begin{split} Br^- + BrO_3^- + 2H^+ &\rightarrow HBrO_2 + HOBr & (a) \\ Br^- + HBrO_2 + H^+ &\rightarrow 2HOBr & (e) \\ Br^- + HOBr + H^+ &\rightarrow Br_2 + H_2O & (b) \\ Br_2 + CH_2(COOH)_2 &\rightarrow BrCH(COOH)_2 + Br^- + H^+ & (g) \end{split}$$

2ième phase :

$$BrO_3^- + HBrO_2 + H^+ \rightarrow 2BrO_2^+ + H_2O$$
 (c)
 $BrO_2^+ + Ce^{3+} + H^+ \rightarrow HBrO_2 + Ce^{4+}$ (d)
 $2HBrO_2 \rightarrow HOBr + BrO_3^- + H^+$ (f)

3ième phase:

$$2\text{Ce}^{4+} + 2\text{CHBr}(\text{COOH})_2 + \text{CH}_2\text{COOH})_2 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Br}^- + 2\text{Ce}^{3+} + 3\text{CHOH}(\text{COOH})_2 + 4\text{H}^+ \tag{h}$$

Les étapes (a) et (b) sont des étapes d'initiation, (c) et (d) de production autocatalytique de HBrO_2 (voir plus loin), (e) et (f) de consommation de HBrO_2 , (g) et (h) d'oxydation de l'acide malonique. On voit donc, même dans le cadre d'un modèle simplifié, la complexité du mécanisme réactionnel, comprenant comme boucle de rétro-action l'étape autocatalytique obtenue en combinant les étapes (c) et (d), puisque l'acide bromeux HBrO_2 produit en (d) augmente fortement la vitesse de l'étape (c) où il apparaît dans le membre de gauche. Puisque l'étape (c) produit deux radicaux BrO_2^{\bullet} , leur consommation dans l'étape (d) implique de multiplier par 2 cette étape (d), et en faisant (c)+2(d), on obtient aisément

$$BrO_3^- + HBrO_2 + 2Ce^{3+} + 3H^+ \rightarrow 2HBrO_2 + 2Ce^{4+} + H_2O$$
 (c) + 2(d) = d'

C'est bien une étape autocatalytique puisque pour produire des molécules d'acide bromeux HBrO_2 il en faut au départ. Plus l'étape (d') produit de l' HBrO_2 , plus elle va vite, puisque sa vitesse, proportionnelle aux concentrations de ce qui est écrit dans le membre de gauche, est en particulier proportionnelle à la concentration en HBrO_2 . Le produit final de l'étape (d') catalyse sa propre formation. Cette étape autocatalytique est l'étape dangereuse en ce qui concerne la stabilité de ce système chimique. Si on le maintient loin de l'équilibre thermodynamique, les concentrations des intermédiaires pourraient ne plus être stationnaires. On peut se demander ce que l'on entend par « loin de l'équilibre thermodynamique » s'agissant du bilan chimique donné par l'équation (6). Les réactions d'oxydo-réduction étant pratiquement complètes, l'équilibre correspondrait à la

disparition complète de l'acide malonique ou du bromate. Il faudrait donc dans le réacteur introduire en continu ces de manière à maintenir constantes concentrations à une valeur appropriée aux instabilités. Alternativement on pourrait initialement les introduire à ces concentrations et laisser le système réagir et évoluer vers l'équilibre. Ce n'est donc que pendant un temps limité que les conditions de non équilibre seront dans ce cas respectées, et l'instabilité, si elle s'instaure, ne pourra qu'être éphémère, puisque obligatoirement le système évoluera vers l'équilibre. En milieu homogène, c'est-à-dire sous agitation, des oscillations auto entretenues, mais cependant éphémères et qui durent plusieurs dizaines de cycles ou plusieurs dizaines de minutes peuvent être observées. Elles sont mises en évidence par un indicateur redox (ici l'orthophénantroline ferreuse) qui change de couleur avec le potentiel redox, passant alternativement du bleu au rouge. Au lieu de se contenter d'une simple visualisation d'un changement de couleur, on peut utiliser des méthodes photochimiques basées sur l'absorption de la lumière à une longueur d'onde de 340 nm où les ions Ce4+ sont les seuls à absorber. D'autre méthodes électrochimiques mesurant part quantitativement le potentiel redox moyen grâce à des électrodes (une électrode de platine et une de référence au calomel par exemple) peuvent être employées. Sur la figure 9 A, on voit le bécher contenant les réactifs dont la couleur change périodiquement du bleu au rouge, tandis qu'une électrode enregistre sur un écran le potentiel redox, reproduit en détail sur la partie B de la figure 9.



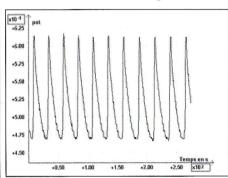


Fig 9 B

On peut ainsi se rendre compte de la régularité de ces oscillations chimiques. L'analyse de Fourier de ce signal montre une seule fréquence, voisine de 0,04 Hz correspondant à une période de l'ordre de 25 s. Comme on peut s'en rendre compte de visu sur la figure 9 B, nous sommes ici en présence d'une véritable horloge chimique, pourtant extrêmement facilement réalisable en laboratoire.

Une autre réaction chimique oscillante très connue et facile à réaliser en laboratoire est connue sous le nom de « réaction de Briggs-Rauscher », dont le mécanisme simplifié serait:

$$IO_3^- + 2 H_2O_2 + H^+ \rightarrow HOI + 2 O_2 + 2 H_2O$$
 (A)

$$HOI + CH_2(COOH)_2 \rightarrow ICH(COOH)_2 + H_2O$$
 (B)

La réaction (A) a été étudiée par Bray et Liebhafsky à Berkeley en 1921. Elle concerne la décomposition de l'eau oxygénée H₂O₂ en eau et en oxygène, en présence d'iodate et en milieu acide. La quantité d'oxygène libéré semblait osciller au cours du temps, ce qui ne paraissait pas anormal à cette époque car la réaction a lieu en phase hétérogène. En 1973, deux professeurs de lycée, Briggs et Rausher désirant réaliser une expérience de cours pour leurs étudiants, ont essayé d'ajouter de l'acide malonique (à cette date la réaction BZ était connue) et des ions Mn++ comme catalyseur. Ils ont observé des phénomènes d'oscillations fortement amplifiés par rapport aux observations de Bray, avec des périodes de quelques secondes. A nouveau cette réaction se déroule en de multiples étapes (minimum 16) comprenant de nombreux intermédiaires, principalement de l'iode I₂ et l'ion iodure I². L'iode I₂ forme avec l'amidon un complexe coloré en bleu, ce qui permet aisément de mettre en évidence sa formation. Concernant cette réaction de Briggs-Rauscher il est donc facile de mettre en évidence les périodes aux cours desquelles la concentration en iode est grande (solution colorée en bleu) et les périodes aux cours desquelles la concentration en iode est petite (solution incolore). Des vidéos de ces oscillations chimiques peuvent facilement être trouvées sur Internet, en particulier sur le site de Youtube.

A coté de l'ordre temporel, un ordre spatial, voire spatio-temporel peut être obtenu avec ce genre de système réactionnel dans des conditions de concentrations (et expérimentales) légèrement différentes de celles conduisant à l'ordre temporel. Revenons à la réaction BZ. Alors que les temporelles auto entretenues résultent uniquement de la cinétique de la réaction BZ, il faut un couplage entre la diffusion et la cinétique pour créer une autoorganisation spatiale. La diffusion seule dans des conditions proches de l'équilibre tend à rendre toute concentration homogène à travers tout le système, mais loin de l'équilibre, couplée à une cinétique complexe, la diffusion peut être source de structure spatiale. Cette auto-organisation spatiale peut être stationnaire (on parle alors de structure de Turing)

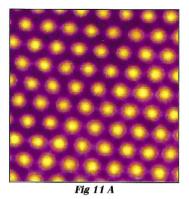
ou au contraire elle peut correspondre à la propagation de fronts de concentration (on parle dans ce cas d'ondes chimiques). Il faut une inhomogénéité spatiale dans concentrations pour induire une telle structure et celle-ci peut être due à une fluctuation locale dans la concentration d'un des réactifs alors créée volontairement l'expérimentateur en ajoutant localement une goutte d'un des réactifs dans le système. Bien comme avant il faut des étapes d'activation/inhibition, des autocatalyses, etc. Mais n'est pas suffisant. thermodynamique, basée sur les équations de

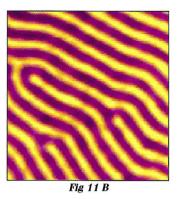
conservation écrites pour des modèles simplifiés, nous apprend que les différents intermédiaires doivent diffuser à des vitesses très différentes. En particulier l'activateur doit diffuser beaucoup plus lentement que l'inhibiteur. La figure 10 montre une structure monodimensionnelle obtenue en ajoutant les 4 réactifs (acide malonique, bromate de potassium, acide sulfurique, ion cérium) en quantité ad hoc (voir les articles spécialisés pour ces valeurs) dans tube à essai. Après quelques temporelles oscillations au COURS desquelles de faibles inhomogénéités de concentration prennent naissance, des couches alternées rouges et bleues à l'indicateur (coloration due orthophénantroline ferreuse) apparaissent une à une. La figure 10 montre l'état final

Fig 10 qui subsiste près de 30 minutes après quoi

le système retourne à l'équilibre.

Si on veut maintenir ces structures dissipatives indéfiniment, il faut travailler en système (en réacteur chimique) ouvert. C'est ce qu'a fait une équipe de l'Université de Bordeaux (équipe De Kepper) pour la réaction dite CIMA (chlorite – iodure alcalin – acide malonique). Ils ont pu obtenir dans un gel bidimensionnel des structures de Turing soit « bandes », soit de type hexagonal représentées à la figure 11.

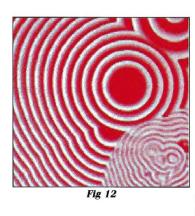




Il est intéressant de remarquer l'analogie entre la figure 11A et les cellules de Bénard représentées à la figure 7C. Rappelons encore une fois à ce stade que la diffusion au niveau local tend à « gommer » des inhomogénéités spatiales, mais au niveau « global » son interaction avec la cinétique chimique rendue complexe par des autocatalyses et des « activations/inhibitions » est responsable de la création de structures et ceci est vraiment NON INTUITIF!

Concernant les ondes chimiques, la réaction BZ a de nouveau bien été étudiée dans une boite de Pétri . Les réactifs sont introduits dans cette boite circulaire sur une épaisseur de l'ordre du millimètre à des concentrations favorisant les ondes. Eventuellement des inhomogénéités sont volontairement introduites. Très rapidement des « cibles » apparaissent (anneaux concentriques alternativement rouges ou bleus) de manière aléatoire dans la boite ; à partir de ces cibles des ondes de concentrations se développent et interagissent entre elles et avec les bords. Des vidéos montrant ces ondes chimiques sont disponibles sur la toile, en particulier sur le site Youtube.

La figure 12 montre un instantané de ces ondes chimiques dans une variante de la réaction BZ. En effet la réaction BZ produit du CO_2 sous forme de petites bulles, ce qui nuit gravement à la qualité des images. Pour éviter le dégagement de CO_2 et produire de belles images, on peut remplacer l'acide malonique par la cyclohexane-1,3-dione CHD qui elle ne produit pas de CO_2 . C'est en cela que consiste la variante de BZ. La différence entre les motifs obtenus si on répète l'expérience est causée par l'isotropie de la diffusion. En effet, comme la diffusion peut se faire dans toutes les directions de la même manière, on obtient des formes générées aléatoirement.



Les exigences requises pour édifier un ordre macroscopique interne, résultant d'une instabilité chimique dans des conditions éloignées de l'équilibre (échange continuel d'énergie et/ou de matière avec le extérieur), monde sont compatibles avec les mécanismes de certaines parmi les plus importantes biochimiques réactions responsables du maintien

d'une activité biologique, comme par ex. la GLYCOLYSE, réaction de dégradation du glucose, sucre à 6 carbones, dans

les cellules au cours du catabolisme. Sans vouloir donner ici l'ensemble des nombreuses réactions concernant la glycolyse que l'on peut trouver dans tout cours de biochimie, il semble cependant opportun d'en extraire quelques actes élémentaires pour illustrer ce qui est conforme à nos propos sur les conditions d'instabilité. Mais avant tout adoptons quelques notations simplificatrices, soit :

A: glucose

C1: fructose 6-phosphate

D1 : forme active de l'enzyme phosphofructo kinase

D2 : complexe enzymatique C2 : fructose di-phosphate

F: glycéraldehyde 3-phosphate

Les quelques actes élémentaires qui nous intéressent concernant les instabilités sont :

$$A \rightarrow C1$$
 $C1+D1 \rightarrow D2$
 ATP

$$\downarrow D2 \rightarrow C2+D1$$
 ADP

$$C2 \rightarrow 2F$$

$$A \rightarrow 2F$$

Donc globalement le glucose (molécule A à 6 atomes de carbone) se transforme en deux molécules F (à 3 atomes de carbone). Cette transformation s'accompagne d'une transformation concomitante d'ATP (adénosine tri phosphate) en ADP (adénosine di phosphate), non seulement une première fois lors de la transformation de glucose en fructose 6-phosphate (A \rightarrow C1), mais une deuxième fois lors de la transformation de fructose (mono)-phosphate en fructose diphosphate (C1 + ATP \rightarrow C2 + ADP) lors d'une réaction enzymatique de type Michaelis-Menten. Nous extrayons de l'excellent livre « Molecular biology of the cell » écrit par une série d'auteurs américains (B. Alberts, D. Bray, J. Lewis, M. Raff, K. Roberts, J. Watson), mais traduit par M. Minkowski en français (« Biologie moléculaire de la cellule », publié chez Flammarion Médecine Science), ce qui suit :

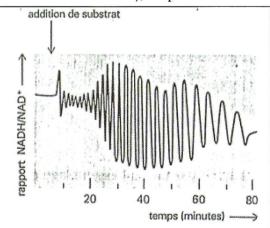


Figure 2-39 L'addition soudaine de glucose à un extrait contenant les enzymes et cofacteurs nécessaires à la glycolyse peut produire d'importantes fluctuations cycliques dans les concentrations des intermédiaires tels que le NADH. Ces oscillations métaboliques sont dues, en partie, au contrôle en retour positif de l'enzyme glycolytique phosphofructokinase.

Fig 13

« Notons que la phosphofructokinase est activée par l'ADP, qui est un produit de la réaction qu'elle catalyse (ATP + fructose 6-phosphate → ADP + fructose 1-6 diphosphate), et est inhibée par l'ATP, qui est l'un de ses substrats. Il en résulte que l'enzyme est soumise à une forme complexe de contrôle en retour positif. Dans certaines circonstances, un tel contrôle en retour donne naissance à des oscillations impressionnantes dans l'activité de l'enzyme, auxquelles correspondent des fluctuations dans les concentrations des divers intermédiaires de la glycolyse (Figure 2-39). Alors que la portée physiologique de ces oscillations est inconnue, elles illustrent la facon dont un oscillateur biologique peut être créé par un petit nombre d'enzymes. En principe, de telles oscillations pourraient tenir lieu d'horloge interne permettant à la cellule de « mesurer le temps » et, par exemple, de remplir certaines fonctions à intervalles constants ».

Ces oscillations dont il est question dans ce livre sont reproduites à la figure 13. Donc des oscillations glycolytiques sont observées in vitro, mais aussi in vivo. En particulier elles ont été observées dans les cellules bêta du pancréas où elles semblent être impliquées dans la sécrétion pulsatile de l'insuline. D'autres réactions d'intérêt biologique montrent également ces phénomènes d'oscillations, comme la phase obscure de la photosynthèse.

Notons que ces mécanismes simplifiés de réactions organiques ou biochimiques peuvent être mis en équation dont l'intégration montre effectivement l'existence de cycles limites, en d'autres termes d'oscillations temporelles. Incluant dans ces mécanismes la diffusion, on peut alors obtenir (généralement numériquement) une structure spatiale, parfois localisée.

Des réactions chimiques auto-organisées spatialement seraient à l'origine des taches ou des rayures que présentent les animaux sur leur pelage. On a démontré que les taches du guépard étaient dues à de tels phénomènes. (Taches, rayures et labyrinthes, P. De Kepper, La Recherche, n° 305, janvier 1988, p 84-89). Attention, même s'il est tentant comme nous le faisons à la figure 14 de comparer une structure spatiale basée sur un modèle cinétique (partie A) au pelage de certains animaux (partie B), il ne faut pas généraliser trop vite. On veut simplement indiquer ici qu'une structure biologique n'est pas en contradiction avec les lois de la physique.



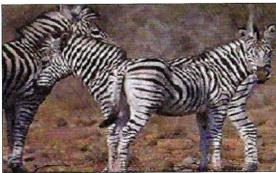


Fig 14 B

Il est temps de donner une petite conclusion à cet article. Le philosophe français Henri Bergson (1859-1941) considérait le second principe de la thermodynamique comme la plus métaphysique de toutes des lois naturelles. Il est vrai que la formulation classique du second principe de la thermodynamique correspond à une théorie de la destruction de structures et sous ce rapport on peut même considérer la croissance de l'entropie comme une mesure de la vitesse de cette destruction. Mais les idées plus récentes (depuis le

milieu de XXème siècle) font que cette doctrine incorpore aujourd'hui l'étude de la création de structures par la prise en considération des fluctuations autour des états instables loin de l'équilibre. Le nouvel état structuré, apparu au delà d'un point critique (première bifurcation), peut lui même devenir instable et donner lieu à une deuxième bifurcation. En principe un nombre arbitraire d'instabilités successives peuvent suivre la première. Et par bifurcations successives on peut obtenir des états de plus en plus complexes. Il existe aussi des situations où au point de bifurcation deux nouvelles solutions stables peuvent émerger (bifurcation « fourche »). D'autre part si les instabilités successives conduisent chaque fois à des états périodiques, de nouvelles fréquences s'ajoutent à chaque fois rendant le signal temporel de plus en plus complexe. Parfois les fréquences nouvelles sont incommensurables et dès lors le signal n'est plus périodique. On dit qu'il est « chaotique » et le comportement temporel du système après une nième instabilité est tout à fait imprédictible, bien qu'il obéisse aux mêmes lois déterministes qu'avant ces instabilités. Ceci est lié à l'extrême sensibilité aux conditions initiales. Deux états initiaux infiniment voisins vont évoluer de manière complètement différente rendant imprédictible toute information à long terme (« effet papillon »). C'est le chaos déterministe et aussi « la fin des certitudes ». Il arrive aussi que l'état du système ne puisse plus être connu uniquement par la valeur des paramètres physico-chimiques, mais il faut lui adjoindre "l'historique", la succession des états par lesquels il est passé. Les comportements dynamiques des systèmes sont finalement d'une richesse incomparable ce qui rend leur étude des plus attractive.

Quelques références générales (outre celles citées dans le texte).

Concernant la théorie générale de la stabilité des systèmes hors d'équilibre (très ardue !) et des structures dissipatives dans les réactions chimiques :

Structure, Stabilité et Fluctuations, par P. Glansdorff et I. Prigogine, Masson Paris, 1971

Concernant la stabilité hydrodynamique (cellules de Bénard) :

Convection in liquids, par J. K. Platten et J.Cl. Legros, Springer Verlag, Berlin, 1984

Concernant l'œuvre de Prigogine, la société royale de chimie (de Belgique) lui a rendu un hommage posthume en publiant un numéro spécial de sa revue contenant un ensemble remarquable d'articles sur les différentes structures dissipatives qui explicitent assez largement les quelques idées élémentaires développées dans le présent article :

Chimie Nouvelle, Numéro spécial Ilya Prigogine, N°84, décembre 2003.

Enfin ne pas oublier la toile! Avec le moteur de recherche Google, entrer « réactions chimiques oscillantes », et (à condition de faire le tri) on obtiendra des heures de lecture intéressante, ainsi que quelques vidéos (dont celles présentées lors de la conférence donnée à l'ADASTA le 12 janvier 2011).

Etudes texturales en 2D et 3D des produits des explosions vulcaniennes du volcan Soufrière Hills, 1997

THOMAS GIACHETTI

Docteur de l'Université Blaise Pascal, spécialité volcanologie Direction de thèse : Professeur Timothy H Druitt, Dr. Karim Kelfoun









Prix du jeune chercheur de la ville de Clermont-Ferrand 2011



I. LE CONTEXTE GÉNÉRAL DE LA THÈSE

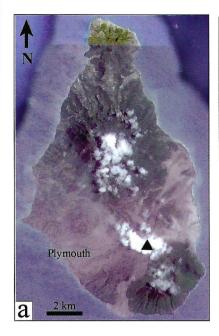
J'ai réalisé ma thèse au sein du Laboratoire Magmas et Volcans (LMV) à Clermont-Ferrand, d'octobre 2006 à janvier 2010, sous la direction de Tim Druitt et de Karim Kelfoun. Le thème scientifique central du LMV est l'étude des processus magmatiques et volcaniques, depuis la fusion dans le manteau terrestre jusqu'à l'éruption en surface. Par sa taille (~100-150 chercheurs), le LMV est l'un des plus importants laboratoires de recherche au monde entièrement dédiés à l'étude des processus magmatiques et volcaniques. Les recherches de son équipe de volcanologie se focalisent sur la volcano-tectonique, la mise en place des écoulements volcaniques, l'observation géophysique et la télédétection. L'équipe se base sur des observations ciblées de volcans spécifiques pour effectuer la modélisation des mécanismes volcaniques. Elle a aussi des compétences dans le domaine des risques volcaniques via des collaborations avec des observatoires volcanologiques et des organismes de gestion des risques. Le sujet de ma thèse s'insérait tout à fait dans les thématiques de recherche de cette équipe.

II. L'ÎLE DE MONTSERRAT, LE VOLCAN SOUFRIÈRE HILLS ET L'ÉRUPTION EN COURS DEPUIS 1995

Montserrat (Figure 1a) est une petite île dépendant du Royaume-Uni, située à environ 55 km au Nord de la Guadeloupe, dans l'arc des Petites Antilles. D'un point de vue géologique, l'île de Montserrat se trouve au niveau où la plaque atlantique plonge sous la plaque Caraïbe (Figure 1b). Lorsqu'une plaque océanique plonge sous une autre plaque tectonique, elle est réchauffée et libère des fluides, changeant ainsi les conditions physico-chimiques du coin de manteau terrestre coincé entre les deux plaques. Le coin mantellique et la plaque plongeante entrent alors partiellement en fusion, donnant naissance à un magma dont la remontée à la surface engendre la naissance de volcans d'arc insulaire, tels ceux formant l'Arc des Petites Antilles, dont font aussi partie la Montagne Pelée à la Martinique et la Soufrière de la Guadeloupe.

Jusqu'en 1995, Montserrat vivait surtout du tourisme, étant même surnommée l'île d'émeraude des Caraïbes. Elle comptait alors 12 000 habitants et sa capitale Plymouth était célèbre pour ses studios d'enregistrements. Le volcan Soufrière Hills (~915 m d'altitude), situé au sud de l'île (Figure 1a), n'avait encore jamais connu d'éruption historique. Le 18 juillet 1995, après trois années d'augmentation de la sismicité, le volcan entre en éruption et est toujours actif depuis cette date, alternant entre phases calmes et périodes plus intenses. L'éruption est principalement liée à la formation et à l'effondrement de dômes de lave visqueuse (comme le Puy de Dôme), entraînant souvent des coulées pyroclastiques qui sont des mélanges de blocs, de cendres et de gaz à plusieurs centaines de degrés et se déplaçant à plusieurs dizaines de km/h. Depuis 1995, il y a eu quatre grandes périodes d'extrusion de dômes de lave visqueuse, séparées de périodes de calme relatif. La quatrième phase d'extrusion de dôme a débuté en août 2008 et se poursuit actuellement, ponctuée de phases de regain de croissance du dôme et de phases d'effondrements partiels de celui-ci. Une coulée pyroclastique de taille modérée s'est produite le 24 février 2011, illustrant le fait que, même s'il ne croît pas de façon marquée depuis plusieurs mois, le dôme reste potentiellement dangereux.

Evacuée tôt après le début de l'éruption, la capitale Plymouth, située au sud-ouest de l'île (Figure 1a) a été ensevelie sous plusieurs mètres de dépôts volcaniques. L'essentiel de l'administration et du pouvoir se trouve maintenant dans la partie nord de l'île, le sud étant interdit d'accès la plupart du temps. Depuis le début de son éruption en 1995, la Soufrière Hills a tué une vingtaine de personnes. En 2006, l'île ne comptait plus qu'à peine 5 000 habitants, les autres ayant fui, la poursuite de l'éruption et la méconnaissance par les scientifiques de l'évolution à moyen et long terme du type d'activité éruptive empêchant tout retour des populations en toute sécurité. En raison de l'impact que ce volcan a sur la vie de l'île, mais aussi sa proximité avec



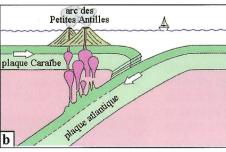


Figure 1 :

a) photographie satellite de l'île de Montserrat en 2006 (source : Google Earth). Au sud-ouest, la capitale Plymouth est partiellement enterrée sous les coulées pyroclastiques. Le triangle noir représente le sommet du volcan Soufrière Hills.

> b) Schéma de la zone de subduction Atlantique/Caraïbe.

eu d'équivalent depuis le début de l'éruption. Une explosion vulcanienne typique de 1997 se déroulait en deux phases : 1) une première phase de forte intensité (~10 minutes), qui comprend l'explosion majeure commençant par l'expulsion d'un bouchon de lave dense et de forts taux d'émission, et qui est caractérisée par l'effondrement de fontaines, par la formation d'un large panache turbulent et par la stabilisation de celui-ci dans l'atmosphère, et 2) une seconde phase d'une durée de quelques dizaines de minutes (typiquement 1 à 3 heures) et de faible intensité, caractérisée par le déclin de l'explosion, avec un panache lent, incliné, et qui est transporté surtout vers l'ouest ou le nordouest par les alizés.

IV. LA PROBLÉMATIQUE DE LA THÈSE

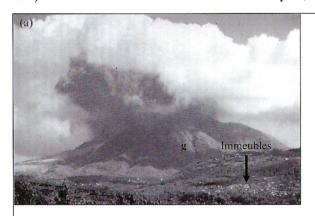
En terme de violence de l'activité éruptive, les explosions vulcaniennes constituent un type d'éruption situé entre les éruptions de type dôme de lave visqueuse, souvent moins violentes, et les éruptions dites pliniennes, plus longues, plus explosives et qui émettent un volume de magma beaucoup plus important (e.g. éruption du Vésuve en 79 après J.C). Les volcans de zone de subduction peuvent avoir une activité éruptive qui varie de façon progressive ou brutale d'un style à l'autre, au cours d'une même éruption. Les études du dynamisme des éruptions pliniennes sont assez nombreuses en raison du risque souvent important que représentent ces éruptions pour les populations. En revanche, il existait peu d'études concernant le dynamisme de conduit des éruptions vulcaniennes avant ma thèse. Etant données la quantité et la qualité des observations et des mesures disponibles pour l'éruption de la Soufrière Hills, les explosions vulcaniennes de 1997 constituaient une cible idéale pour comprendre le dynamisme de ce style d'activité éruptive.

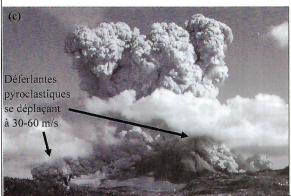
Le but de ma thèse était de comprendre ce qu'il s'est passé dans le conduit du volcan lors des éruptions

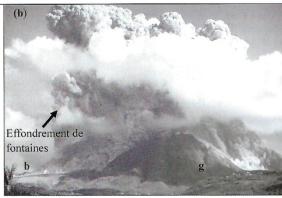
d'autres îles peuplées importantes, la Soufrière Hills est l'un des volcans le plus et le mieux étudié au monde. L'observatoire de Montserrat, créé très tôt après le début de l'éruption en 1995, dispose de nombreux enregistrements (sismicité, vidéos, photos, etc.) concernant les différentes phases de l'éruption, données très précieuses pour les volcanologues.

III. LES EXPLOSIONS VULCANIENNES DE 1997

Entre août et novembre 1997, la Soufrière Hills a subi deux séries de 88 éruptions au total, consistant en des explosions assez courtes (1-3h), mais produisant des coulées pyroclastiques et des panaches éruptifs pouvant atteindre jusqu'à 15 km d'altitude (Figure 2). Ce type d'éruption, dit vulcanien, s'est reproduit à plusieurs reprises à la Soufrière Hills depuis 1995, mais ces deux séries d'explosions très rapprochées dans le temps (environ une explosion toutes les 10h) et très similaires dans leurs caractéristiques, n'ont pas







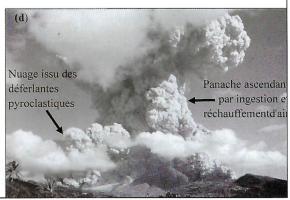


Figure 2 : Exemple d'explosion vulcanienne de la Soufrière Hills en 1997. L'effondrement de fontaines provoque la formation de déferlantes pyroclastiques sur les photographies (a), (b) et (c). Des cendres ont été expulsées par l'impact de blocs balistiques sur le sol jusqu'à 1,7 km du cratère (b).

vulcaniennes de 1997. Plus précisément, nous voulions déterminer et quantifier les processus de vésiculation du magma lors de ces explosions. Comme une eau gazeuse dans une bouteille hermétiquement fermée, le magma qui se trouve dans la chambre magmatique et à la base du conduit du volcan avant une explosion contient beaucoup de gaz dissous (volatils), et notamment de l'eau et du dioxyde de carbone (H₂O et CO₂), ainsi que de nombreux autres gaz en plus faibles quantités (H₂S, SO₂, HCl, etc.). C'est en grande partie ces gaz et notamment leur exsolution, c'est-à-dire leur matérialisation sous forme de bulles, qui va contrôler le caractère explosif des éruptions (comme une bouteille d'eau gazeuse que l'on ouvre). En effet, si les bulles ont le temps de se former et de croître lorsque le magma est encore chaud et peu visqueux, elles peuvent alors coalescer (i.e. fusionner) lors de la remontée, et former des chenaux dans le conduit qui vont permettre au gaz de s'échapper de façon passive. Ceci aura pour effet de limiter l'explosivité de l'éruption (type dôme de lave visqueuse), les chenaux laissant circuler les gaz et leur permettant de s'extraire hors du magma, agissant un peu comme des soupapes de sécurité. En revanche, si le magma est trop visqueux ou trop froid pour laisser grandir les bulles, les volatils vont tout de même continuer à s'extraire du liquide vers les bulles, augmentant alors la pression contenue dans celles-ci. La surpression ainsi générée peut aboutir à une fragmentation explosive du magma, c'est à dire à la fracturation du magma en de nombreuses parcelles ultérieurement éjectées hors du conduit, provoquant des éruptions beaucoup plus intenses (type vulcanien ou plinien).

V. L'APPROCHE ET LES OUTILS UTILISÉS

Pour tenter de comprendre ces divers processus de nucléation, croissance et coalescence des vésicules ainsi que le dégazage et/ou la fragmentation du magma, j'ai étudié les textures (taille, forme, couleur, contenu en cristaux et en bulles, etc.) des produits des éruptions, appelés aussi pyroclastes. Cette étude a nécessité l'utilisation de plusieurs outils, chacun apportant une donnée importante permettant de répondre à la problématique générale.

La première étape a été d'aller chercher sur le terrain à Montserrat la matière première de l'étude (missions de terrain en 2006 et 2008), c'est-à-dire, identifier les dépôts issus des explosions vulcaniennes de 1997, puis trier, sélectionner, découper, emballer, étiqueter et répertorier les roches présentant des textures caractéristiques. L'étude texturale s'est d'abord faite par observations à différentes échelles (œil nu, loupe binoculaire, microscope optique, microscope électronique à balayage) à la fois sur les échantillons bruts, des surfaces cassées, ou sur des lames minces, c'est à dire des tranches très fines d'échantillon (épaisseur inférieure à celle d'un cheveu). J'ai ensuite analysé les échantillons en utilisant différentes techniques répertoriées ci-dessous et pour lesquelles figurent le principe, le type de préparation nécessaire et le nombre d'échantillons étudiés, le type d'acquisition et les outils informatiques utilisés pour traiter les données obtenues.



Pycnométrie à

HÉLIUM

- Principe : Evaluer la porosité des échantillons (proportion vide/solide) et déterminer si les bulles sont isolées les unes des autres ou si elles sont connectées

(et peuvent alors potentiellement laisser s'échapper le gaz).

- Préparation des échantillons (~100) : Scie circulaire à diamant, étuve.

- Analyses et traitement : Pycnomètre à hélium, balance, pied à coulisse, Excel.

ANALYSES D'IMAGES EN 2D



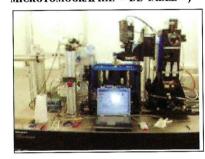
- Principe: Etudier la taille, la forme et le nombre de bulles et de cristaux ainsi que leurs relations spatiales.

- Préparation des échantillons (15): Réalisation de lames minces des échantillons (30 µm d'épaisseur), métallisation.

- Acquisition : Appareil

photo, Microscope Electronique à Balayage.
- Analyses et traitement : Logiciels Photoshop, ImageJ,
Excel, Matlab. Très gros travail d'analyse d'images (~1 an)

Analyses micro-tomographiques (synchrotron et microtomographie « de table »)



- Principe : Obtenir des données 3D pour quantifier les textures des vésicules (allongement, forme, nombre) et des cristaux. Comparer ces données avec celles issues de l'analyse en 2D (novateur).

- Préparation des échantillons (12) : scie à

diamant, tour à usiner.

- Analyses et traitement : 3dma_rock (linux), Blob3D, Quant3D, Paraview, Matlab, Excel, VGStudio.

ANALYSES MICROSONDE ET SPECTROSCOPIE RAMAN





- Principe : analyser la composition chimique des échantillons.
- Préparation des échantillons (30) : Broyeur mécanique, résine, polissage, métallisation.
- Analyses et traitement : spectroscope Raman, Microsonde, Excel, PeakFit.

VI. RÉSULTATS

LES TEXTURES CARACTÉRISTIQUES OBSERVÉES

Les échantillons ont été prélevés dans deux types de dépôts, ceux des retombées du panache et ceux des coulées pyroclastiques (Figure 3a). Dans ces dépôts on trouve plusieurs types de textures :

- Des **ponces** : on les trouve à la fois dans les dépôts de retombées où elles constituent ~100% du dépôt et dans les dépôts de coulées pyroclastiques (>95% du dépôt). Elles

mesurent de quelques cm à plus d'un mètre et sont plutôt angulaires (retombées) ou arrondies à cause du transport (coulées pyroclastiques). Ce sont des roches légères, contenant beaucoup de bulles de tailles très variables. Les ponces les plus denses sont souvent foncées (noires, grises) et les plus vésiculées sont claires (beiges, blanches, Figure 3b).

- Des **bombes en croûte de pain** : ces pyroclastes sont ainsi nommés car leur surface extérieure est craquelée, comme la croûte du pain. En coupe (Figure 3c), ces échantillons présentent deux textures, une croûte très sombre et très dense (i.e. sans vésicule) et un intérieur poreux, souvent grisâtre à blanc, présentant de nombreuses vésicules. Dans l'intérieur des bombes en croûte de pain, on trouve souvent des cristaux qui sont fracturés, créant des pores de plusieurs centaines de micromètres (1 micromètre = 10^{-6} m). Les bombes représentent moins de 5% du volume total émis et sont éjectées depuis le cratère sous forme balistique.

- Des **échantillons complètement denses** : sans bulle et noirs, comme la croûte des bombes en croûte de pain. Ils sont très minoritaires (~1%) dans l'ensemble des dépôts.



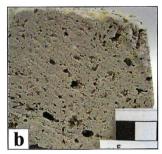




Figure 3 :
a) dépôt d'une coulée
pyroclastique illustrant la
présence de ponces arrondies
de tailles variables.
b) ponce claire très vésiculée,
c) coupe d'une bombe
en croûte de pain.

Nous avons mesuré les teneurs en eau contenue dans le verre volcanique de tous les échantillons. En utilisant ces teneurs en eau et en faisant certaines hypothèses, il a été possible de déterminer la position stratigraphique relative des échantillons les uns par rapport aux autres, avant chaque

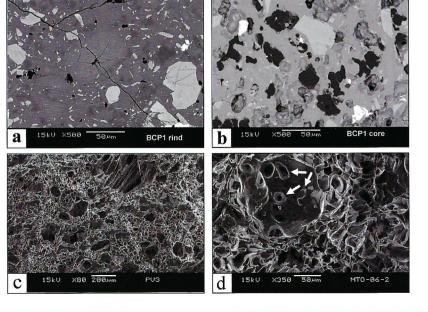
explosion. Ceci nous a permis de découvrir que la texture finale d'un échantillon dépendait directement de sa position initiale dans le conduit, avant chaque explosion. Ainsi, nous avons déterminé que les échantillons totalement denses provenaient de l'extrémité supérieure du conduit (formant un "bouchon" en haut du conduit), que les bombes en croûte de pain se trouvaient juste sous ce bouchon et que les ponces étaient placées initialement dans la partie inférieure du conduit.

Figure 4:
Photographies au Microscope électronique
à Balayage de pyroclastes issus
des explosions vulcaniennes
de la Soufrière Hills en 1997.
a) Croûte d'une bombe en croûte de pain.
Quasiment pas de bulle.
b) Intérieur d'une bombe en croûte de pain. Plus de bulles à la
fois connectées (noir) et isolées (aspect vitreux).
c) Ponce très vésiculée (>75% de vide). Beaucoup de bulles
petites, intermédiaires et grandes.
d) Coalescence de petites bulles dans une bulle de taille
intermédiaire (flèches blanches).

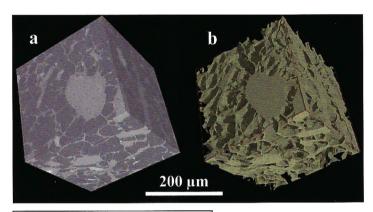
CARACTÉRISTIQUES DES VÉSICULES DANS LES DIFFÉRENTES TEXTURES

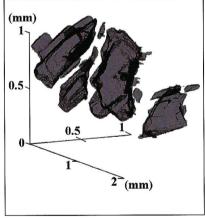
Les différentes textures ont ensuite été auscultées à différentes échelles afin de déterminer les caractéristiques des vésicules présentes et la teneur totale en bulles a été mesurée par pycnométrie à hélium. Les ponces sont les échantillons les plus vésiculés (jusqu'à 80% de vide dans ces échantillons), les échantillons denses et les croûtes des bombes sont les moins vésiculés (<25% de vide) et les intérieurs des bombes en croûte de pain ont une vésicularité intermédiaire. La taille des bulles observées dans tous les échantillons varie de quelques microns à plusieurs centimètres. Les observations à toutes les échelles de ces bulles nous ont permis de définir trois types de bulles en termes de tailles :

- Des petites vésicules (inférieures à quelques dizaines de microns de diamètre) : présentes dans tous les échantillons, en très grande quantité dans les ponces et les intérieurs des bombes en croûte de pain (Figure 4b et c), elles sont quasiment absentes des croûtes des bombes et des échantillons denses. Elles sont souvent rondes et apparaissent isolées les unes des autres (Figure 4a-c). Ces bulles, de par leur taille et leur forme très ronde, sont synexplosives, c'est à dire qu'elles se sont formées durant l'explosion et n'ont pas eu le temps de grandir.
- Des grandes vésicules (supérieures à plusieurs centaines de microns de diamètre) : elles sont de deux types, 1) de grands pores angulaires liés à la fracturation de cristaux dans les bombes en croûte de pain, 2) des vésicules très déformées, liées à la coalescence de vésicules plus petites et que l'on ne retrouve que dans les ponces. Ces grandes vésicules déformées ont eu le temps d'évoluer, c'est à dire de grandir et de coalescer. Ces vésicules sont pré-explosives, c'est à dire qu'elles étaient présentes dans le magma avant chaque explosion.
- Des vésicules de taille intermédiaire (entre quelques dizaines et quelques centaines de microns) : elles ne sont présentes que dans les ponces. Elles proviennent de la coalescence des petites bulles, comme il est possible de le voir sur la Figure 4d, et donc leur apparition est forcément postérieure à celle des petites vésicules. Elles sont donc aussi nécessairement syn-explosives.



Ces observations de vésicules ont été réalisées à la fois en 2D et en 3D. L'avantage de la 2D est que la méthode est bien contrainte et facile à mettre en place, même si elle demande beaucoup de temps de travail. Cependant, elle oblige à faire certaines hypothèses concernant la forme des vésicules, ce qui a un impact important sur la quantification des diverses populations de vésicules que nous avons faite. De plus, il est impossible de déterminer les relations spatiales entre vésicules et cristaux. La 3D a donc été utilisée pour la première fois à plusieurs échelles sur le même échantillon volcanique, et en utilisant notamment la meilleure précision disponible dans le monde à l'heure actuelle. Elle nous a permis à la fois de confirmer ou d'infirmer certaines hypothèses faites après la visualisation des images en 2D (exemple du cristal fracturé créant de grand pores de la Figure 5, supposé exister en 2D et dont l'existence a été confirmée en 3D) et pour la première fois, des données quantitatives issues des analyses 3D ont été comparées directement avec celles issues de l'analyse en 2D.





haut) Visualisation en 3D d'un morceau d'une ponce très vésiculée.

Figure 5 :

bas) visualisation d'un seul cristal fracturé en 3D.

QUANTIFICATION DES VÉSICULES DANS LES DIFFÉRENTES TEXTURES

Nous avons quantifié les différentes populations de vésicules, c'est à dire que nous avons déterminé le nombre et le volume des vésicules en fonction de leur taille, pour chaque texture caractéristique présentée précédemment. La Figure 6 présente ces distributions de taille de vésicules en fonction de leur taille pour l'intérieur d'une bombe en croûte de pain et pour une ponce. Les barres grises représentent les vésicules connectées (coalescées) et les barres noires les vésicules isolées. On retrouve, quantitativement cette fois-ci, ce qui avait été observé qualitativement :

- Les bulles ont des tailles variant de quelques microns à plusieurs millimètres.
- Dans l'intérieur de la bombe en croûte de pain, on distingue une famille de petites bulles ($\sim\!20~\mu m$) et une famille de grandes vésicules qui correspond aux grands pores ($\sim\!1~mm$). Les petites bulles sont en partie isolées. Les grands pores sont connectés.

- Dans les ponces, on distingue trois familles de vésicules, la population de petites vésicules en partie isolées et qui forme les futures bombes en croûte de pain, une population de grandes vésicules qui sont liées à la nucléation, croissance et coalescence de bulles pré-explosives, et une population de vésicules intermédiaires (~100 μm), formées par la croissance des petites bulles.

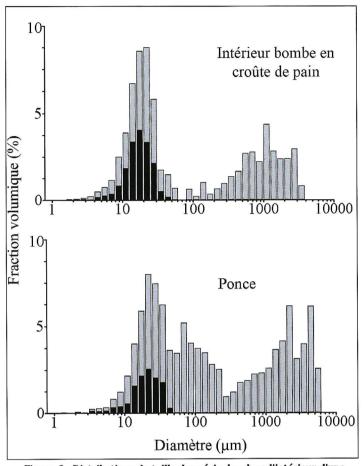


Figure 6 : Distributions de taille des vésicules dans l'intérieur d'une bombe en croûte de pain et dans une ponce. Les barres noires montrent les vésicules isolées et les noires, les vésicules connectées.

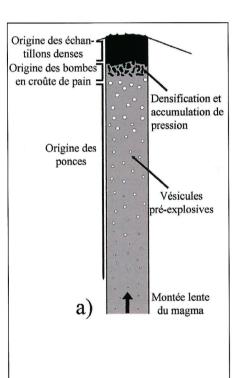
VII. CONCLUSION: LE DYNAMISME DES EXPLOSIONS VULCANIENNES

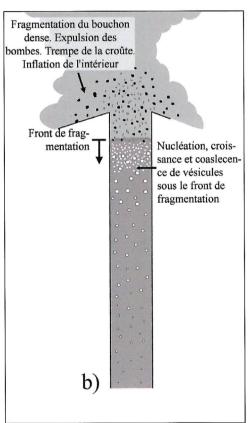
Ces données, ainsi que de nombreuses qu'il est difficile de détailler par manque de place, nous ont permis de définir les processus de vésiculation du magma durant les explosions vulcaniennes de la Soufrière Hills en 1997 et de réaliser le modèle suivant, retraçant les différentes étapes de l'explosion (Figure 7) :

- a) Juste avant chaque explosion: un bouchon de lave dense se forme à l'extrémité supérieure du conduit, scellant le reste du conduit et empêchant les gaz de s'extraire. Ce bouchon provoque une accumulation de pression dans la partie supérieure du conduit. Au fil du temps, le bouchon se densifie et se refroidit petit à petit. Juste sous ce bouchon se trouve le magma à l'origine des futures bombes en croûte de pain, qui est alors homogène et ne contient quasiment aucune vésicule. Enfin, dans tout le reste du conduit se trouve le magma à l'origine des futures ponces et qui contient des vésicules pré-explosives.
- b) La pression sous le bouchon devient trop forte et celuici explose, provoquant une décompression brutale qui se propage vers le bas du conduit de façon très rapide. Cette décompression soudaine provoque la nucléation et la croissance de nouvelles vésicules. Cette vague de

décompression est suivie par une vague de fragmentation, qui provoque la fracturation et l'expulsion du magma hors du conduit. La propagation de la fragmentation vers le bas du conduit est plus lente que celle de la décompression, de sorte que le temps entre décompression et fragmentation augmente avec la profondeur. Les fragments de bouchons denses sont expulsés. Le magma se trouvant juste sous ce bouchon est qui forme les futures bombes donnant l'aspect croûte de pain aussi expulsé par morceaux et le contact avec l'air fige la partie extérieure de ces morceaux, qui n'a eu le temps de former que quelques petites vésicules. En revanche, dans l'intérieur qui est protégé du refroidissement pendant quelques secondes, des bulles ont le temps de nucléer et de croître, formant la population de petites vésicules rondes et isolées identifiée précédemment. Cette nucléation de vésicules entraîne une augmentation du volume de l'intérieur de la bombe qui va provoquer la fracturation de la partie extérieure, fragile, donnant cet aspect croûte de pain. L'augmentation du volume va aussi provoquer la fracturation des cristaux à l'intérieur des bombes.

c) Plus bas dans le conduit, là où sont formées les ponces, le délai entre la nucléation de nouvelles bulles et la fragmentation du magma est plus long, laissant le temps aux nouvelles bulles formées de croître, puis de coalescer. Ce délai plus long explique la formation de la population de vésicules de taille intermédiaire, visible uniquement dans les ponces. L'explosion vidange le conduit sur 0,5-2 km de profondeur avant de s'arrêter. Entre deux explosions (~10h), le magma remonte dans le conduit de façon lente et visqueuse. Puis un nouveau cycle reprend, jusqu'au commencement d'une nouvelle explosion.





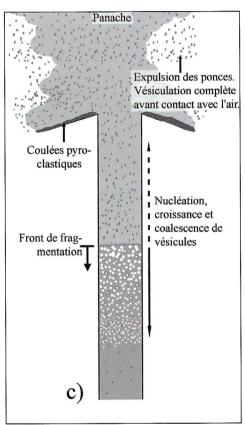


Figure 7 : Modèle de conduit lors des explosions vulcaniennes de la Soufrières Hills de Montserrat, 1997

LA TENSION SUPERFICIELLE DE L'EAU



ROLAND FUSTIER, professeur retraité de sciences physiques, ancien formateur lufm et président académique de l'UdPPC

Voici une animation qui propose encore une démarche d'investigation.

Etonnement et expériences contre intuitives, questionnement et émissions d'hypothèses, vérifications expérimentales, recherche de documentation dans livres de physique encyclopédies et sites Internet, recherche d'applications et prolongements vers de nouvelles questions.

Selon Archimède un corps plus dense que l'eau coule... Et pourtant le trombone ou le CD posés délicatement flottent à la surface.

Le trombone en fer est 7,4 fois plus dense que l'eau et le CD en polyacrylate 1,2.

Le CD remonte à la surface dans une eau salée contenant 250 grammes de sel par litre (densité 1,25).

LA SURFACE DE L'EAU SE COMPORTE UN PEU COMME UNE MEMBRANE ÉLASTIQUE

Expérience 1

Faire glisser les trombones à la surface du pot de yaourt rempli à ras bord.

Les maladroits pourront déposer le trombone à plat avec un autre trombone déplié en angle droit.

Une autre astuce consiste à le poser sur un bout de papier toilette ou sopalin , attendre que le papier s'imbibe et coule laissant le trombone à la surface.



Remarque : lorsqu'on pousse plusieurs trombones ceuxci s'attirent ou restent près du bord.

Observer la surface de l'eau autour des trombones et sur le bord du verre.

Interprétation : dans l'eau chaque molécule est attirée par ses voisines. Au sein du liquide elles sont attirées de façon identique dans toutes les directions et sont donc soumises à une force moyenne nulle.

Les molécules dans le creux de la « membrane » ont des voisines qui les attirent vers le haut.

L'ajout de quelques gouttes d'eau savonneuse provoque la chute des trombones au fond du verre.

Interprétation : les molécules de savon poussent les molécules d'eau et les remplacent à la surface détruisant la « membrane ».

Expérience 2

Laisser tomber une goutte d'eau savonneuse à la surface de l'eau saupoudrée de poivre gris.

Les grains de poivre sont poussés vers les bords du plat.



Remarque : on a montré auparavant qu'une goutte d'eau est sans effet puisque les grains de poivre reprennent leur place après l'impact

Cette expérience permet d'évaluer la taille d'une molécule de savon !

Protocole - préparer une solution diluée 200 fois de savon lave vaisselle

- mesurer le volume de 50 gouttes avec un comptegouttes gradué ou une pipette et une burette graduée (en déduire le volume d'une goutte)
 - calculer la surface du cercle libéré du poivre
- le volume de la goutte divisé par 200 donne le volume de savon
- ce volume divisé par la surface donne l'épaisseur de la couche de savon

On a pris la précaution de vérifier auparavant que la chute d'une deuxième goutte double la surface libérée par le poivre ce qui amène à penser que les molécules de savon ne s'empilent pas mais constituent une seule couche.

Le calcul nous donne entre 20 et 30 nanomètres pour la taille de la molécule

Expérience 3

Poser délicatement le CD à plat sur l'eau et le charger avec quatre écrous.

Observer la surface bombée de l'eau avant et après l'ajout des écrous.

On recommence l'expérience avec un CD dans lequel on a percé 8 trous de 1 cm de diamètre sur lequel on pose 6 écrous (expérience contre intuitive!).



On pourrait penser qu'en diminuant la surface de contact entre le plastique et l'eau la tension superficielle qui maintient le disque à la surface diminuerait...Nous avons en fait un phénomène de « bord » La surface a diminué de 6% alors que les bords ont augmenté de 59%.

Remarque: nous ne pouvons pas mettre en «évidence » des relations de proportionnalité pour des raisons expérimentales (difficulté pour répartir correctement les écrous, un moindre décalage incline légèrement le CD et fait passer l'eau sur un côté du disque provoquant l'immersion).

L'effet de tension superficielle est plus spectaculaire pour le trombone qui est nettement plus dense que le CD.

Cela est dû à une longueur des bords plus importante par rapport à la surface pour le trombone (longueur de bord 20 cm pour une surface de 1 cm²) en comparaison du CD (42 cm pour 110 cm²).

Précaution : pour toutes ces expériences trombones et CD doivent être bien secs et les récipients bien rincés.

La lecture des ouvrages de physique et la consultation des sites Internet définissent la tension superficielle comme le quotient d'une force par une longueur (N/m) ce qui conforte les expériences réalisées.

Expérience 4

Poser un cercle d'eau avec une pissette sur un CD, approcher un autre CD tenu par une ficelle jusqu'au contact. Les deux CD se collent l'un à l'autre et l'on peut soulever l'ensemble !!!.





<u>Nota:</u> c'est la tension superficielle qui intervient lorsqu'on mouille le doigt pour tourner les pages récalcitrantes d'un livre.

Expérience 5

Évaluer la force qui maintien le contact.

Prendre deux lamelles pour préparation microscopique auxquelles on a collé un bouchon muni d'un crochet.

Répandre de l'eau avec la pissette sur une des lamelles sans laisser couler puis poser délicatement l'autre dessus sans faire glisser. Elles restent collées.

Suspendre l'ensemble et accrocher des masses marquées jusqu'à obtenir la séparation.

Nous trouvons entre 100 et 120 grammes!

Avec des plaques de verre de format A4 nous pouvons atteindre entre 500 et 700 g



Nous n'observons pas d'effet de bord dans ces deux expériences pourtant les molécules d'eau adhérent aux disques et augmentent l'interface. Phénomène du même type que la capillarité.

On peut définir une énergie à fournir pour augmenter cette interface en J/m². L'analyse dimensionnelle donne une unité équivalente en N/m *où l'on retrouve l'effet de bord !!!*



QUELQUES PROLONGEMENTS

Les gouttes d'eau :

- La tension superficielle de l'eau retient la goutte du robinet
- Les gouttes sont sphériques car la tension superficielle tend à rendre minimale sa surface de contact avec l'air pour un volume donné d'eau.
- Les molécules d'eau forment une enveloppe autour des bulles de ${\rm CO_2}$ qui se regroupent si l'on secoue la bouteille.

Les bulles de savon :

- comment se forment les bulles de savon ?
- les tensioactifs (hydrophile et hydrophobe)
- pression et taille des bulles

C'est l'objet d'une autre animation.

(cette animation sur la tension superficielle de l'eau a été proposée aux « Jeunes Pousses » le 16 mars et à Cours d'eau H20 Clermont-Ferrand 29 et 30 avril 2010)

Nous cherchons un mathématicien français

(Jeu proposé par Jocelyne Allée)

Mon premier est un intervalle de temps
Mon second est une céréale
Mon troisième peut être noir, chaud, fort, mort ...
Mon quatrième est un moyen de transport
Mon cinquième est une lettre accentuée
Mon tout vous donne le prénom et le nom de ce
mathématicien.

Dans la grille 4 x 4 suivante sont dissimulés les noms de la ville où il est né et de celle où il est mort. Pour lire ces 2 noms on se déplace verticalement ou horizontalement mais pas en diagonale :

o	v	S	Т
L	E	I	R
N	A	Y	A
E	N	C	P

La solution peut être consultée sur le site internet de l'Adasta : http://www.adasta.fr/									
Solution du jeu précédent (revue N°75) « mots coupés » :									
Ne w ton	grav ita tion								
Ga li lée	lun et te								
Ed i son	phon ogra phe								
Co per nic	astr on omie								
Ei nst ein	rela tiv ité								
Bec que rel	radi oacti vité								
Roe nt gen	ray ons X								
Lav ois ier	oxy gè ne								
Avo gad ro	ato m es								
D ar win	evo lut ion								



Enfin voici un tableau dans lequel vous devez compléter des petits mots de 3 lettres (dont un sigle) dans les colonnes verticales. Par exemple, dans la première colonne on peut écrire BLÉ. Mais attention, plusieurs possibilités peuvent exister. Si vous faites le bon choix, vous découvrirez dans la ligne intermédiaire le titre d'un ouvrage écrit par le mathématicien inconnu.

NB : Une apostrophe figure dans une des cases vierges. Les cases barrées de la deuxième ligne (X) correspondent à des espaces entre mots.

В	T	X	E	É	T	M	A	D	T	X	C	É	\mathbf{X}	I	0	L	É	P	0	Т	G	0	S
		X								\mathbf{X}			X	Ħ									
É	S	X	T	U	R	R	E	A	L	X	P	É	X	E	M	S		Т	E	É	L	E	L

Les conférences du second semestre 2011

Jeudi 12 mai

18h - SPECIALE conférence-débat "Energies" => Energie nucléaire : réacteurs de fission et fusion, Perspectives - Christian NGO, Ancien ingénieur en chef CEA Directeur d'Edmonium, société de conseil en nucléaire.

Mercredi 18 mai

17h30 - De photosynthèses en respirations, les chemins de l'énergie dans les être vivants (végétaux, animaux, bactéries) Michel Gendraud, Professeur honoraire de Physiologie végétale, Univ. Blaise Pascal - Clermont Fd.

Mercredi 8 juin

17h30 - Génome humain : nouvelles frontières, nouvelles explorations - Yves-Jean Bignon, Chef Départ. Oncogénétique Centre Jean Perrin - Clermont Fd.

Jeudi 9 juin

18h - SPECIALE conférence-débat "Energies" => Quelle énergie pour l'automobile de demain ? - M. Beretta, Directeur PSA.

Mercredi 21 septembre

17h30 - Nanotechnologie dans les sciences du vivant - Valérie Hoffart, Université d'Auvergne Faculté de Pharmacie.

Mercredi 19 octobre

17h30 - Deux fondateurs de la médecine moderne : Pasteur et Koch - Georges Anton, Ingénieur chimiste ENSCT.

Mercredi 16 novembre

17h30 - La canopée, un monde nouveau offert à la Science. Bruno Corbara, Labo Microorganismes, CNRS Univ. B. Pascal-Clermont Fd

Mercredi 7 décembre

17h30 - Déficit auditif chez l'enfant - Paul Avan, Professeur Lab Biophysique Sensorielle, Université d'Auvergne.

Programme des animations Jeunes Pousses

Mercredi 25 mai

Circuits électriques

Mercredi 25 juin

Les éoliennes : sortie-visite au plateau d'Ally (43)



Séance Jeunes Pousses du 13 avril sur les couleurs

ADASTA

Adhésions et Abonnements

Adhésions à titre individuel 30 €

Adhésions à titre collectif 80 €

L'adhésion donne droit à la revue Auvergne-Sciences, à des réductions sur les locations et les achats, à des invitations aux conférences et aux visites d'entreprises (une participation aux frais peut être demandée lors de certaines visites).

Permanences - elles sont assurées par les bénévoles :

lundi de 14h à 18h, mercredi de 9h à 12h

En cas d'absence laisser message sur répondeur ou E-mail.

Adresser le courrier : ADASTA, Centre Riche-Lieu - 13, rue Richelieu - 63400 Chamalières

Siège social - 10, rue de Bien-Assis - 63000 Clermont-Ferrand Tél. 04 73 92 12 24 - E-mail : adasta@wanadoo.fr - Site internet : www.adasta.fr

Dépôt légal Mai 2011 - N° ISSN - 1166-5904

Vent solaire et les pannes

Grâce à l'organisation de conférences scientifiques impliquant les meilleurs spécialistes dans leurs domaines, l'ADASTA (Association pour le Développement de l'Animation Scientifique et Technique en Auvergne) met les divers et multiples champs de la science à la portée du plus grand nombre.

e dernier invité en date, Luc Dettwiller, spécialiste d'optique impliqué dans la coronographie (étude de la couronne solaire), a traité du Soleil, de son activité, de sa surveillance. Un thème a priori théorique et loin de nos préoccupations, mais dont les ressorts peuvent impacter notre vie quotidienne.

Professeur en Mathématiques Spéciales (filière Physique-Chimie) au Lycée Blaise-Pascal de Clermont-Ferrand, Luc Dettwiller est de ces enseignants qui estiment qu'il faut garder l'esprit en éveil pour rester intellectuellement tonique. Une façon d'appréhender son métier qui l'a conduit à demeurer au contact de la recherche jusqu'à calculer l'optique du nouveau coronographe (une lunette astronomique très particulière : projet CLIMSO - CLIchés Multiples du SOleil) installé depuis 2007 à l'Observatoire du Pic du Midi (*).

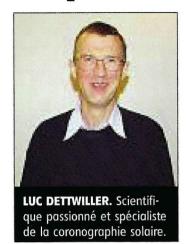
Si le principe général de la lunette astronomique remonte à l'époque de Galilée, c'est Isaac Newton qui promut le télescope pour pallier le défaut majeur des lunettes de son temps – le chromatisme. Il faudra attendre presque cent cinquante ans pour voir émerger de meilleures lunettes utilisant des objectifs achromatiques, qui ouvrirent la voie à des observations plus poussées.

La coronographie constitue la partie de l'astronomie qui étudie la couronne solaire, c'est-à-dire son « atmosphère ». Indétectable à l'œil nu car moins lumineuse que la « surface » du soleil (le rapport est de l'ordre du million), la couronne devient visible à l'occasion d'une éclipse solaire. Mais le phénomène reste rare et de courte durée.

Passion

Ce problème lié à l'observation a été résolu en 1931 par Bernard Lyot. En bloquant les rayons solaires les plus lumineux, à la manière d'une éclipse, son coronographe parvient à rendre visible la lumière de la couronne. Installé depuis à l'Observatoire du Pic du Midi, il permet des observations quotidiennes.

En 1995 est lancée la mission spatiale Soho, ayant pour objectif d'étudier la structure interne du Soleil, la chaleur de son atmosphère, les origi-



nes du vent solaire. Puis en 2006 le satellite Hinode prend le relais. Le coronographe s'avère un complément de choix pour la sonde. En effet, si l'atmosphère terrestre et les turbulences dues au réchauffement de l'air enlèvent tout intérêt aux forts grossissements pour un coronographe sur Terre et lui interdisent de voir la haute couronne, cet instrument reste indiqué pour embrasser la totalité de la basse couronne, alors que Hinode zoome sur une partie.

Le 13 mars 1989, le Canada vécut une coupure générale d'électricité. En cause, une « tempête solaire » singulièrement violente, due à un brusque excès de particules éjectées de la couronne vers l'espace, en direction de la Terre. Arrivant à proximité de notre planète, elles désorganisent les courants électriques de quelques

millions d'ampères qui circulent dans la magnétosphère terrestre : ils sont alors dérivés le long de lignes de champ magnétique atteignant le sol auprès des régions polaires. Au Canada, dont le sous-sol n'est pas très conducteur, ils se propagent à travers le réseau électrique, faisant sauter au passage tous les postes de transformation à l'entrée des grandes villes. Trois jours furent nécessaires pour rétablir le courant.

Pour mieux comprendre ces phénomènes, il est indispensable d'accumuler les données. C'est la raison pour laquelle le coronographe transmet des données à raison de quatre images de type différent par minute. En comparaison, du fait des délais de transmission, un satellite ne peut transmettre qu'une image toutes les 10 minutes au mieux.

Ainsi, après la météorologie terrestre, qui nous cause déjà bien des soucis, c'est la météorologie solaire qui s'avère susceptible de bloquer nos sociétés technologiques. La science recèle toujours de quoi nous étonner et nous passionner.

(*) Les observations sont accessibles par internet à l'adresse http://bass2000.obspm.fr/home.php

Article paru dans le journal La Montagne (18 décembre 2010) et reproduit ici avec son autorisation,

Préparation du grand saut



COMPTE-RENDU DE LA CONFÉRENCE DE MICHEL FOURNIER LE MERCREDI 8 DÉCEMBRE 2010 PAR DOMINIQUE NOISETTE PROFESSEUR, AGRÉGÉE DE SCIENCES PHYSIQUES"

DOMINIQUE NOISETTE

MICHEL FOURNIER



INTRODUCTION

« Rentrer à pied » de l'espace... un des fantasmes de l'astronaute.

C'est ce qu'avoue Jean-François Clervoy, l'astronaute français, sur le site de Michel Fournier dont il parraine le projet de « G*rand Saut* » depuis 40 km d'altitude.

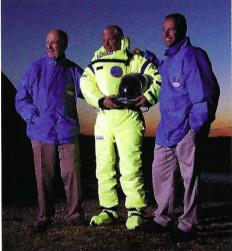
Mais il ne s'agit pas que de réaliser un des vieux rêves de l'humanité en allant, au risque de devenir un nouvel Icare, évoluer dans les hautes couches de l'atmosphère...

Si, en août 2011, Michel Fournier réussit le saut après avoir atteint, grâce à un ballon stratosphérique, l'altitude de 38 km, il battra quatre records du monde :

- Record d'altitude de saut en chute libre
- Record d'altitude de vol humain sous un ballon
- Record du temps en chute libre
- Record de vitesse en chute libre



Nacelle dans laquelle M. Fournier effectue les 2 heures de montée



Michel Fournier et ses parrains : André Turcat, pilote d'essai du Concorde, et Jean-François Clervoy, astronaute

Tout au long de ces presque vingt années de préparation, il aura fait avancer la science, suscitant des recherches dans des domaines aussi variés que les transmissions radio, la résistance des matériaux, la préparation psychologique aux séjours en environnement hostile ou l'adaptation aux conditions extrêmes de l'organisme humain et, plus

MICHEL FOURNIER DANS L'ACADEMIE

prosaïquement, des instruments de mesure.

En décembre 2010, un projet démarré dans une classe de première « *bac pro* » gros œuvre et travaux publics a permis de réunir autour de Michel Fournier, personnalité à l'origine non scientifique mais porteuse d'un projet réveillant des rêves ancestraux, des élèves de tous niveaux :

- collégiens encore naïfs (collèges Trémonteix de Clermont Ferrand et Molière de Beaumont),

- élèves de lycées généraux souvent peu conscients des applications directes de ce qu'ils apprennent (lycée polyvalent de Chamalières).
- élèves de lycées professionnels souvent peu motivés par les disciplines d'enseignement général (lycées Pierre Joël Bonté de Riom, Valéry Larbaud de Cusset, Saint Jacques de Compostelle et Auguste Aymard du Puy, la Chartreuse Paradis de Brives Charensac),
- étudiants de classe préparatoire aux grandes écoles (lycée Lafayette),



Avec les lycéens du Lycée professionnel Pierre-Joël Bonté

Le 8 décembre 2010, le parachutiste de l'extrême donnait une conférence rue de Bien-Assis, à l'intention des membres de l'ADASTA bien sûr, mais aussi de ses sympathisants et d'enseignants informés de cette rencontre par leurs inspecteurs et l'UdPPC.

Le 10 décembre, Michel Fournier rencontrait Gérard Besson, recteur de l'académie de Clermont-Ferrand, intéressé par un projet qui aura favorisé les rencontres entre enseignants et permis d'humaniser les sciences : chacun des "types" d'élèves participant au projet en a besoin, en tant que futur spécialiste, en tant que citoyen (et les élèves majeurs le sont déjà à part entière) voire même peut-être en tant que parent de futur scientifique!

GENESE DU PROJET « LE GRAND SAUT »

LE PROJET FRANÇAIS S 38

Lorsqu'à la suite de l'explosion de Challenger en janvier 1986 la France lance le projet, il s'agit de tester en grandeur réelle un moyen d'éjecter de leur vaisseau des astronautes en détresse afin qu'ils regagnent le sol en parachute depuis la stratosphère.

Pour ce projet, baptisé S38 en référence à l'objectif de sauter depuis 38 km d'altitude, sont sélectionnés Jean-François Clervoy, le futur astronaute, ancien polytechnicien, et Michel Fournier, futur officier, qui a quitté l'école à 13 ans avant d'être formé par l'armée. De ce premier contact entre les deux hommes naîtra une longue amitié...

En septembre 1988, un mannequin bardé de capteurs est

largué par le CNES à Aire sur Adour et cette première expérience confirme la faisabilité du projet. Mais six mois plus tard, à la suite de l'abandon du projet Hermès de navette spatiale européenne et de la concentration des moyens financiers sur le lanceur Ariane, la France arrête le projet S38.

Quatre ans plus tard, Michel Fournier quitte le service actif pour continuer l'aventure à titre privé. Comme Bernard Palissy brûlant ses meubles pour atteindre la température critique permettant de découvrir le secret de la porcelaine, il vend tous ses biens et s'endette : les moyens financiers nécessaires pour mettre au point et tester tout le matériel nécessaire à la réalisation du « *Grand Saut* » sont considérables. On découvrira au fil de cet article quelques uns des défis qu'il lui faut relever.

LES PRECURSEURS ET LES CHALLENGERS

On sait que Gagarine, dont on fête cette année les 50 ans du vol, atterrit non pas à bord de sa capsule, mais en parachute, et que cette procédure ne fut rendue publique qu'en 1990 tant les autorités soviétiques de l'époque avaient craint que ce détail empêchât l'homologation de l'exploit; mais le premier homme de l'espace ne s'était éjecté qu'à mi-hauteur de la troposphère, c'est-à-dire une trentaine de kilomètres plus bas que l'altitude visée par Michel Fournier.

Quelques mois auparavant, en 1960, l'américain Joe Kittinger avait sauté d'une altitude de 31 300 m dans le cadre du projet Excelsior. Il s'agissait alors de tester des parachutes à haute altitude car à cette époque, les américains étudiaient effectivement la possibilité de faire rentrer sur Terre des astronautes par ce moyen. Mais Kittinger avait été victime d'une mauvaise stabilisation dans des couches de l'atmosphère - trop peu denses pour que le parachutiste puisse modifier sa position par des mouvements du corps - et il avait, lors de l'ouverture tardive de son parachute, absorbé une décélération estimée à... 22 g!

Parce qu'il avait perdu connaissance et qu'il n'avait pu ouvrir lui-même son parachute, son record n'a pas été homologué. Il reste cependant la référence pour tous ceux qui souhaitent tenter un « grand saut » même si c'est le soviétique Andreïev qui, officiellement, détient le record d'altitude avec un saut effectué en 1962 à 24 483m.

Michel Fournier a rencontré Joe Kittinger. Né en 1928, celui-ci est aujourd'hui en retraite mais s'intéresse toujours de près aux tentatives de ses successeurs.

Le lecteur intéressé trouvera sur Internet de nombreuses photos et vidéos du saut de Kittinger : des caméras et appareils photos, réchauffés par des bouillottes, avaient été embarqués à bord de la capsule et ils ont permis de filmer les différentes phases de la chute.

Il y a un an, il avait été annoncé que l'autrichien Félix Baumgartner, recordman de base-jump, tenterait le « *grand saut* » pendant la fenêtre d'août 2010, mais cet unique challenger de Michel Fournier a finalement abandonné.

UNE CHUTE LIBRE TRES SPECIALE

DES CONDITIONS EXTREMES DE TEMPERATURE

Alors que pour les sauts d'entraînement à très haute altitude le parachutiste n'est soumis que très brièvement à des températures de l'ordre de -30°C, Michel Fournier y sera exposé beaucoup plus longtemps, non seulement pendant la chute, mais pendant la montée qui s'effectue très lentement, en ballon.

Michel Fournier nous a aimablement communiqué un tableau dont nous ne reproduisons ci-dessous que quelques extraits. On pourra donc remarquer dans un premier temps la grande amplitude de variation de la température. On sait qu'à 50 km d'altitude, la température est positive alors qu'elle atteint un minimum à 11 km : -56°C.

En réalité, pour Michel Fournier qui sera animé d'une très grande vitesse, la température équivalente, c'est-à-dire la température qu'il ressentira sous les effets combinés de la température et du vent, sera inférieure à -110°C.

STANDARTS ATMOSPHERIQUE OACI 1962

ALTITUDE	TEMPERATU	PRESSION	DENSITE		SON
m	°C	hPa	g/l	m/s -	km/h
40 000	- 17	3,16	4,3		
38 000	- 22	4,13	5,6		
36 000	- 27	5,42	7,6		
34 000	- 34	7,17	10,3		
32 000	- 37	9,5	13,9	296,5	1067,4
11 000	- 56,50	226,04	296,9	296,5	1067,4
10 000	- 43,5	264,20	336,8	300	1080
9 000	- 37	307,17	380,5	304,5	1096,2
8 000	- 30,5	355,83	428,6	308,5	1110,6
7 000	- 24	410,48	481,1	313	1126,8
6 000	- 17,5	471,50	538,4	317	1141,2
5 000	- 11	540,08	600,8	321	1155,6
4 000	- 4,5	616,31	668,6	325	1170
3 000	2	700,97	742,1	329,5	1186,2
2 000	8,5	794,86	821,6	333	1190,8
1 000	15	898,76	907,5	337	1213,2
0000	15	1013,25	1 225,6	341	1227,6

RISQUE DE SYNCOPE Nécessité d'une stabilisation

Michel FOURNIER totalise actuellement près de 9 000 sauts dont une centaine à plus de 8000 mètres. Il a notamment effectué le 10 septembre 1992 un saut homologué de 11 898 mètres à Gap. Cette expertise lui permet de gérer la dernière partie de la chute libre.

Mais, on vient de le voir en évoquant la mésaventure de Kittinger, il y a si peu d'air au-dessus de 30 km, que lorsqu'il quittera la nacelle, une infime impulsion involontaire pourra suffire à le mettre en rotation. Il risquera alors la syncope si sa vitesse de rotation atteint les 10 tr/min.



Michel fournier en chute quasi libre : les mouvements des bras et des jambes permettent de stabiliser la position.

Quels que soient alors les réflexes acquis lors des entraînements, il ne pourra stopper ce mouvement car ses membres ne pourront prendre suffisamment appui sur l'air. En atmosphère très raréfiée, il est en effet impossible de réaliser les figures que l'on peut couramment admirer lors des concours de saut en chute libre.

Aussi, dès que Michel Fournier quittera la nacelle, l'ouverture automatique d'un petit parachute sera déclenchée : c'est ce parachute stabilisateur, offrant beaucoup plus de prise à l'air que les bras et les jambes du parachutiste, que prétend représenter sur le montage photographique ci-contre

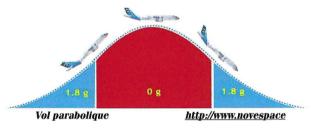


réalisé pour une revue de vulgarisation scientifique, la sorte d'écharpe orange fixée au dos de Michel Fournier. Dans la réalité, il s'agit d'un petit parachute rond! On remarquera que sur cette illustration, Michel Fournier est représenté les bras le long du corps, dans une position (inclinaison du corps et position des membres) longuement travaillée à l'entraînement de facon à minimiser le risque d'entrée en rotation.

Nécessité d'un entraînement en microgravité

Michel Fournier a effectué plusieurs entraînements en vols paraboliques bien qu'il ait à son actif de nombreux sauts dont la première partie s'effectue en chute libre. Car si un parachutiste peut se trouver en état d'impesanteur, dès qu'il modifie l'orientation de ses membres, il exerce sur l'air - et il en subit en retour - une action qui n'est pas du tout négligeable : en raison de sa grande vitesse relative, il agit sur l'air en orientant différentes parties de son corps un peu comme un avion modifie l'orientation des volets placés sur les ailes... Dans la cabine d'un avion effectuant un vol parabolique, en revanche, la vitesse relative du passager par rapport à l'air de la cabine est presque nulle et les sensations sont proches de celles de la chute libre dans des couches de l'atmosphère où la résistance de l'air est quasi négligeable.

Les vols paraboliques réunissent dans un même avion jusqu'à 40 passagers, le plus souvent des chercheurs pouvant réaliser jusqu'à 15 expériences simultanément, mais parfois aussi des personnes ayant besoin, comme Michel Fournier, de se familiariser avec ces situations d'impesanteur. Chaque séance permet d'enchaîner plusieurs paraboles, chacune offrant un peu plus de 20 secondes d'impesanteur.



Le principe du vol parabolique et de la mise en impesanteur des passagers est simple, même s'il est techniquement délicat à réaliser :

 - A 6 km d'altitude, le pilote cabre l'avion (accélération 1,8 g) jusqu'à atteindre une assiette positive de 45° à 7,5 km.

- Le pilote « pousse le manche » jusqu'à annuler la portance (composante verticale de la résultante aérodynamique) et la poussée des moteurs est réduite pour tout juste équilibrer la traînée (composante horizontale de la résultante aérodynamique). L'avion et les passagers ne sont alors plus soumis qu'à une seule force : leur poids. Cet état d'impesanteur dure pendant environ 22 secondes tandis que l'avion effectue une parabole dont le sommet est à 8,5 km d'altitude.
- A 7,5 km d'altitude, le pilote redresse l'avion qui retrouve son « palier » de vol stabilisé à 6 km d'altitude et peut alors amorcer une nouvelle phase de vol parabolique.



FAIBLE PRESSION ET RISQUE D'EMBOLIE

Comme les plongeurs qui subissent une forte dépression lors de la remontée à la surface, Michel Fournier va subir une forte dépressurisation car il est impossible de maintenir l'intérieur de sa combinaison à la pression atmosphérique du sol. Il lui faut donc subir une dénitrogénation qui commencera bien avant le décollage.

Respirer de l'oxygène pur pendant de longues périodes n'est pas sans risque : les poumons peuvent être brûlés, mais

surtout, peut survenir une euphorie qui pourrait engendrer une prise de risque inconsidérée.

C'est pourquoi Michel Fournier s'habitue, sur des périodes de plus en plus longues, à respirer de l'oxygène pur. Alors que la limite couramment admise était de 3 heures, il est parvenu à repousser cette durée à une dizaine d'heures.

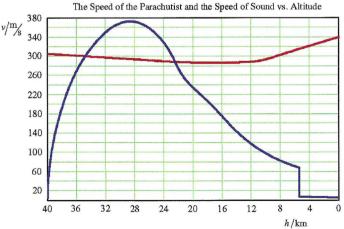


De la même façon, il a effectué plusieurs séjours dans un caisson hypobare de la Comex et en chambre thermo physiologique, à -150°C, au Centre de Recherche du Service de Santé des Armées.

PASSER LE MUR DU SON...

Un rapide calcul permet d'établir que Michel Fournier, parti sans vitesse initiale, atteint en une trentaine de secondes et au bout de 5 km de chute, une vitesse de 310 m/s (v =). En se reportant au tableau donné plus haut, on pourra constater que cela correspond à une vitesse supérieure à la vitesse du son aux altitudes considérées.

Michel Fournier nous a aimablement communiqué le résultat des calculs réalisés par Seppo Mäkinen, professeur à l'Ecole Polytechnique de Finlande : on voit sur le graphe qu'il devrait atteindre Mach 1,27 et que sa vitesse devrait rester supérieure à celle du son pendant un peu plus de 35 secondes.



Vitesse de Michel Fournier (en bleu) et vitesse du son (en rouge) en fonction de l'altitude

La question se pose alors de la résistance du corps humain : les mesures effectuées sur le mannequin dans le cadre du projet S38 permettent de penser que la raréfaction de l'atmosphère est, à cette altitude, suffisante pour que Michel Fournier ne ressente pas de vibrations susceptibles de mettre sa vie en danger.

UN EQUIPEMENT DE HAUTE TECHNOLOGIE

UNE COMBINAISON DE SPATIONAUTE MODIFIEE

Les sorties dans l'espace ont lieu dans le vide. Même si Michel Fournier peut se dire spationaute car il évoluera, au début de son saut, à une altitude qui appartient à l'Espace, il sera au bout de quelques dizaines de seconde, soumis à des frottements de l'air trop importants pour qu'un équipement classique y résiste. Parmi les modifications, on peut citer celle de la visière qui doit résister à une pression dynamique de l'ordre de 50 000 N/m² (5476 kgf/m²).

L'équipement est composé de trois couches. L'une est en laine naturelle pour absorber la transpiration ; la deuxième est un équipement stratosphérique complètement pressurisé qui permet, bien que la nacelle soit pressurisée, de résister une heure à une pression très faible, voisine de 1 hPa ; la surcombinaison est réalisée en Thermolite®, un mélange breveté de microfibres ultrafines qui lui permet de résister pendant 10 minutes à une température de l'ordre de -100°C.

Des élèves du lycée professionnel Pierre Joël Bonté de Riom ont estimé que la conductivité thermique de la combinaison de Michel Fournier était, à épaisseur égale, 100 fois plus faible que celle du polystyrène!

On peut mesurer les progrès technologiques effectués en comparant la masse équipée de Michel Fournier, 115 kg, à celle de Joe Kittinger, 160 kg, qui était loin de bénéficier, malgré le caractère imposant de son équipement, de la même isolation et du même confort.

DES GANTS UNIQUES

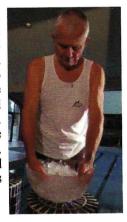
Les gants sont équipés d'un dispositif chauffant situé sur



le dessus de la main et proche de la peau. Chaque gant comprend deux batteries qui peuvent être mises en service par Michel Fournier au moment nécessaire. Ils sont suffisamment souples pour que le parachutiste puisse lui-même actionner le dispositif d'ouverture du parachute, condition de

l'homologation du saut.

Malgré cet équipement, Michel Fournier s'entraîne à supporter le froid : alors que la température des extrémités ne peut, pour une personne non entraînée, descendre en dessous de 15 à 20° sans que la personne éprouve une sensation de « doigts gelés » qui constitue par ailleurs un signal d'alarme, Michel Fournier a éduqué son organisme et il peut aujourd'hui descendre à 5°C, sans éprouver de sensation de froid excessive et, surtout, sans que ses doigts ne gèlent effectivement.



UN BALLON STRATOSPHERIQUE GIGANTESQUE

Une masse à enlever très importante

Les ballons stratosphériques sont conçus pour soulever au maximum quelques centaines de kilogrammes de matériel de mesure. Ici la masse totale du ballon, de la nacelle et de son occupant est supérieure à une tonne et demie.

La nacelle présente un tableau de bord qui permet de suivre différents indicateurs car tant Michel Fournier que le

ballon et la nacelle elle-même sont capteurs. Il s'agit bardés de des données d'enregistrer physiologiques et environnementales non seulement pour enrichir des bases de données à usage scientifique aussi pour surveiller le déroulement du vol et déclencher le cas échéant la séparation du ballon et de la nacelle. Ainsi, au cas où une collision ou une malfaçon devrait entraîner une fuite de l'hélium et le dégonflage du ballon, au cas où le parachutiste aurait un malaise avant



de parvenir à l'altitude maximale, la nacelle se détacherait du ballon et trois parachutes se déclencheraient automatiquement pour accompagner son retour au sol. Tous ces capteurs et équipements de secours correspondent à une surcharge.

Une enveloppe de polyéthylène au volume record

La longueur du ballon dégonflé est de 187m. La masse de l'enveloppe « triple épaisseur » est de 1 tonne bien que l'épaisseur d'une feuille de plastique ne soit que de 16 microns...

Sur la photo, on peut voir le ballon étalé sur le sol et la nacelle dans laquelle a pris place Michel Fournier suspendue à l'extrémité de la grue. Au décollage, après 50 minutes de gonflage à l'hélium, son volume est de 4 000 m³. Au cours de la montée, en raison de la diminution de la pression extérieure et du réchauffement du gaz par le rayonnement solaire, le ballon gonfle et peut atteindre un volume maximal de 600 000 m³. On verra plus loin qu'à la différence des ballons stratosphériques destinés aux campagnes de mesure météorologiques, le ballon de Michel Fournier est un ballon « ouvert », c'est-à-dire que l'excès d'hélium peut s'échapper par le bas du ballon afin d'éviter toute surpression susceptible de provoquer la déchirure de la membrane et l'explosion du ballon.



Des élèves du collège de Beaumont ont estimé que le ballon, au moment où il quitte le sol, est 34 fois plus volumineux que leur salle de classe mais que, lorsqu'il atteint son volume maximal, il peut contenir... 90 « petits » collèges semblables au leur!

DES PROCEDURES DE VOL COMPLEXE

FENETRE METEO

Comme on le sait si on a déjà effectué un vol en montgolfière, le moment le plus propice au décollage se situe aux premières heures du matin. Il en va de même pour le ballon stratosphérique.

Mais tout serait trop simple s'il suffisait d'attendre un beau jour de printemps ou d'été, où le vent serait nul et où le Soleil, bien visible dès son lever, chaufferait rapidement l'hélium...

Tenter le « grand saut » n'est possible qu'en mai et en août. Il faut en effet éviter les jet streams, situés à très haute altitude et qui soufflent à des vitesses pouvant atteindre 600 km/h. Outre le fait qu'ils risquent d'entraîner le ballon très loin du point de décollage, ils présentent surtout un danger parce que leur vitesse varie très rapidement en fonction de l'altitude : le ballon, les parachutes, la nacelle constituent un ensemble qui s'étale verticalement sur près de 200 mètres et un cisaillement, avec une différence de vitesses d'entraînement entre le haut et le bas de la chaîne de vol qui atteignant quelques centaines de kilomètres par heure serait fatale.

En mai et en août, se produit une inversion de ces vents. Leur vitesse est alors minimale. On peut espérer en août, au dessus du Canada, une « fenêtre » météo un peu plus longue que celle du printemps : elle peut être de près de deux semaines avec des différences de vitesse de vent entre le haut et le bas de la chaîne de vol inférieures à 40 km/h.

SECURITE

Envisagé en France en 2000, le vol a finalement été interdit en raison des risques qu'il faisait courir aux populations. Le Canada a accepté que les deux derniers essais et la prochaine tentative d'août 2011 se déroulent à North Battleford dans le Saskatchewan, province dont la densité de population moyenne est extrêmement faible (moyenne de 1,5 habitant / km²!). Le vol sera suivi par les contrôleurs aériens de Transport Canada comme s'il s'agissait d'un aéronef « normal ».

Si tout se déroule comme prévu, parvenu à l'altitude maximale, Michel Fournier quittera la nacelle. Un dispositif pyrotechnique permettra alors de provoquer la séparation de la nacelle et du ballon.

Trois parachutes se déclencheront et ramèneront au sol la nacelle et son équipement. Un autre dispositif pyrotechnique permettra de provoquer, lorsque la nacelle ne sera plus située à l'aplomb du ballon, la déchirure et la dislocation de l'enveloppe de plastique. Il s'agit ici de reproduire pour ce ballon ouvert ce qui constitue la fin classique des ballons stratosphériques fermés qui explosent lorsqu'ils atteignent une altitude telle qu'ils ne supportent plus la différence de pression entre l'hélium intérieur chauffé par le Soleil et l'air extérieur devenu plus rare.

La descente de la nacelle sera suivie par un système GPS afin d'être récupérée le plus rapidement possible.

La descente de Michel Fournier qui risque d'être déporté par les vents sera également suivie avec la plus grande attention. On a vu que son équipement, bien que beaucoup



plus léger que celui de Joe Kittinger, restait très lourd. Les lacs sont fort nombreux dans cette province canadienne et le risque principal couru par le parachutiste est d'atterrir non pas sur la terre ferme mais dans un lac. Les services de secours disposant de plusieurs véhicules 4x4 et d'hélicoptères disposeraient alors d'un maximum de 10 minutes pour le sortir de l'eau.

Avant le saut, d'autres causes pourraient entraîner un dégonflage rapide du ballon : des fuites en cas de malfaçon de l'enveloppe qui reste une réalisation prototypique ou une collision. Si le ballon devait se dégonfler sans exploser avant que Michel Fournier ne quitte la nacelle, ce serait une masse de plus d'une tonne de plastique qui s'abattrait sur l'habitacle et l'entraînerait vers le sol. Des détecteurs permettent donc de déceler des fuites d'hélium et de déclencher le cas échéant la séparation de la nacelle alors que le ballon est encore assez gonflé pour rester en l'air. Michel Fournier aurait alors le temps de sauter depuis la nacelle qui serait ensuite ramenée au sol selon la procédure « normale » qui vient d'être décrite.

GONFLAGE DU BALLON

On découvrira ci-dessous quelques images, copies extraites du film de science vidéo service visible sur le site de l'association 3i3s (International Independent Institute for Space ans Satellite Solutions) https://www.3i3s.org/



Le camion contenant l'hélium



Le ballon est maintenu à la main pendant la première partie du gonflage. Une équipe de spécialistes supervise l'opération de dépliage de la très fine et très fragile membrane



Le ballon est lâché.

La boule visible à l'arrière plan n'est pas la Lune mais l'un des deux petits ballons qui permettent de repérer la direction du vent.







CONCLUSION

On le voit, l'aventure que Michel Fournier nous convie à vivre à travers lui est très riche, sur le plan humain bien sûr, mais aussi sur le plan scientifique.

Si en Août 2011 la prochaine tentative de Grand Saut ne devrait pas aboutir au succès, il ne faudrait pas que la déception fasse oublier les avancées réalisées par une équipe de spécialistes qui aura travaillé durant plus de 10 ans. Toute la préparation physique de Michel Fournier, toutes les réalisations techniques ont permis de faire avancer la connaissance : réalisation d'un ballon d'une taille jamais atteinte, recherche des matériaux, mise au point des protocoles et bien sûr... étude des réactions d'un organisme humain soumis à des conditions extrêmes.

On ne peut que souhaiter que Michel Fournier réalise le rêve de sa vie et voie résolus tous les problèmes techniques que pose ce défi et dont cet article a tenté de révéler la complexité. Dans tous les cas, l'ADASTA espère l'accueillir pour une nouvelle conférence.

