

# Comment éviter des catastrophes en organisant le désordre (Three Mile Island ? Deepwater Horizon ? etc.)

Michel Pluviose

Professeur Honoraire du Conservatoire national des Arts et Métiers

Un domaine méconnu de la physique pourrait être à l'origine de grandes catastrophes. Les remèdes proposés, il y a 25 ans, ont été appréciés en France et aux USA en particulier, lors de leur mise en œuvre dans quelques situations devenues scabreuses. Mais on n'en avait pas saisi le sens profond. On explore, dans les documents rappelés ci-après, cette partie de la science demeurée dans la pénombre.

## 1 Introduction

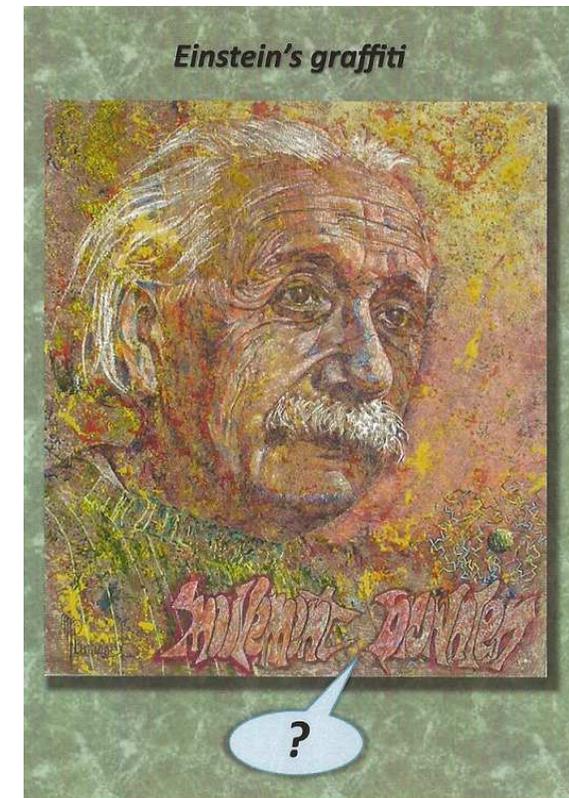
Un jour sans vent, tout paraît calme, et pourtant des milliards de milliards de molécules s'agitent et se bousculent en permanence, dans le monde microscopique, sans trop se faire remarquer. On se croit à l'abri. Et le vent se lève. Il possède une certaine énergie cinétique que l'on peut récupérer en partie sur des éoliennes. Puis parfois, surviennent des bourrasques violentes, des vents tempétueux qui détériorent nos constructions et abîment la nature sur leur passage.

Dans ces cas extrêmes, que fait-on ? Rien !

On se terre en attendant que ces tornades et vents tumultueux s'épuisent. C'est ainsi que la nature s'organise : tempêtes, inondations, tremblements de terre et autres cataclysmes en sont, pour l'humanité, les pires manifestations.

Des phénomènes analogues se manifestent dans les installations qui véhiculent des fluides.

Dans certains cas, les écoulements à forte puissance motrice embarquée chahutent les parois, en les fragilisant et parfois en les détruisant. Ces écoulements doivent être impérativement calmés.



Solution en dernière page

## 2 Le principe de moindre action

La mécanique rationnelle, véhicule l'idée que tous les phénomènes de la nature sont réductibles à un principe de conservation : quantité de mouvement, moment cinétique, énergie cinétique (dans le cas des chocs élastiques), énergie (aspect mécanique).

Les équations de comportement du champ électromagnétique (Maxwell), la mécanique quantique, la lumière quantique (Planck, Einstein), la mécanique ondulatoire (de Broglie), l'électrodynamique quantique, sont toutes des lois réversibles par rapport au temps. Elles obéissent au principe de moindre action.

Le principe de moindre action (Fermat, Maupertuis, Euler, ... ) confirmé par la mécanique analytique (Lagrange, Hamilton, Jacobi,... ) est basé sur la proposition suivante :

*La nature n'aime pas trop se fatiguer.*

Pour aller d'un point A à un point B, la nature choisit, parmi toutes les solutions possibles, le chemin qui minimise une grandeur qu'on appelle : l'action.

Toute cette physique, abondamment enseignée, ignore le frottement. Elle ne veut pas connaître le désordre, l'entropie. Elle est donc impuissante pour dégrader de l'énergie cinétique.



Pour en savoir plus : Chapitre 5 - La naissance de la physique : d'Aristote à Newton  
Chapitre 6 - Les lois de conservation  
Chapitre 7 - Escapade en physique quantique  
Chapitre 8 - Le principe de moindre action



Fermat et sa Muse (Sculpteur : Barrau)

Salle des Illustres du Capitole de Toulouse

Inscription : Fermat, inventeur du calcul différentiel



### 3 Sur la route du chaos

#### 3.1 L'évasement brusque : une référence

#### La prise en compte du frottement en Mécanique des fluides.

L'étude de la structure des jets formés à l'échappement d'un robinet n'a pas été étrangère aux préoccupations des savants anciens, et l'on sait qu'elle a tout particulièrement occupé Léonard de Vinci. Descartes avait aussi étudié les lois des tourbillons. Newton, lui-même, n'a pas dédaigné de s'occuper de quelques-unes de leurs propriétés.

Lorsque ces jets de fluide sont canalisés à l'aval, dans une tuyauterie de reprise, il devient encore plus délicat d'en saisir la nature physique profonde. C'est le problème de l'évasement brusque confiné de Borda.

Celui-ci, en 1766, a reconnu le premier que, dans cette géométrie, le théorème de Bernoulli, issu de la mécanique newtonienne, devait être en défaut. Il détermina la dissipation d'énergie résultant de cette configuration. Borda démontre alors clairement, que ces dissipations sont liées à l'énergie cinétique contenue dans le fluide.



**Jet libre**  
(Léonard de Vinci)

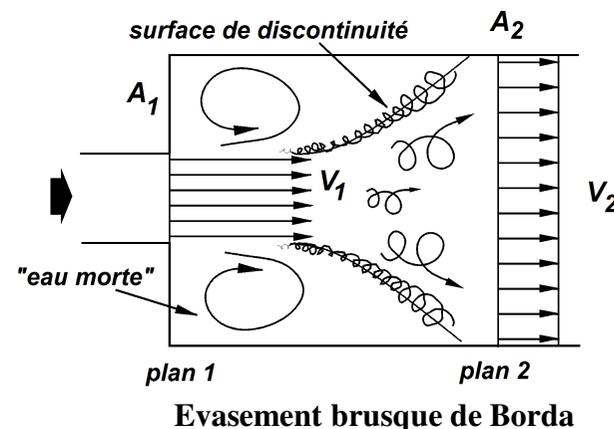


**Jet confiné**  
(Léonard de Vinci)

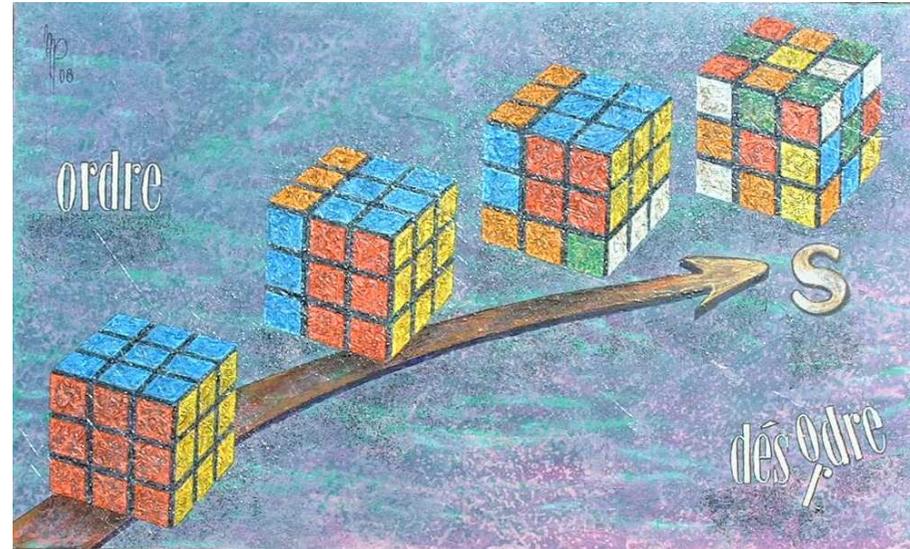
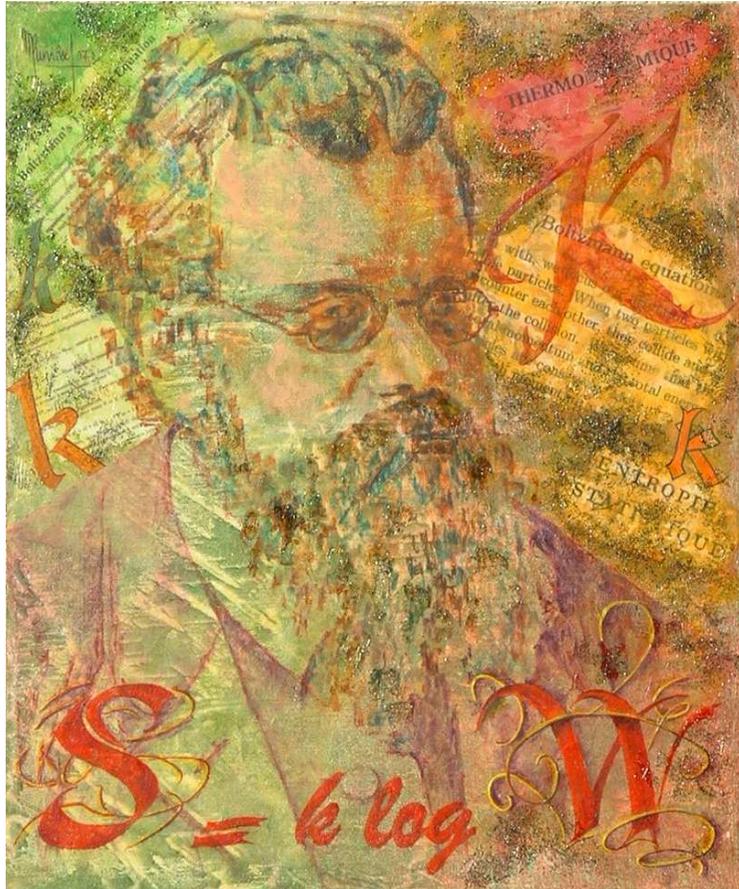
Pour en savoir plus :



- Chapitre 9 - La symétrie des lois de conservation
- Chapitre 10 - Les mathématiques, la physique et .... le frottement
- Chapitre 11 - L'élargissement brusque de Borda
- Chapitre 12 - Une réalisation fondamentale : le digesteur et sa soupape



### 3.2 Ordre et désordre



Un Rubik's cub initialement dans l'ordre, se trouve à une entropie nulle. Il ne peut (en principe) que se désordonner et son entropie augmenter. Un joueur qui alignerait les séquences sans réfléchir mettrait plusieurs milliards d'années pour retrouver ce casse-tête dans l'ordre initial.

L'entropie  $S$  de Boltzmann est une mesure du désordre  $W$  qui règne dans le monde moléculaire.

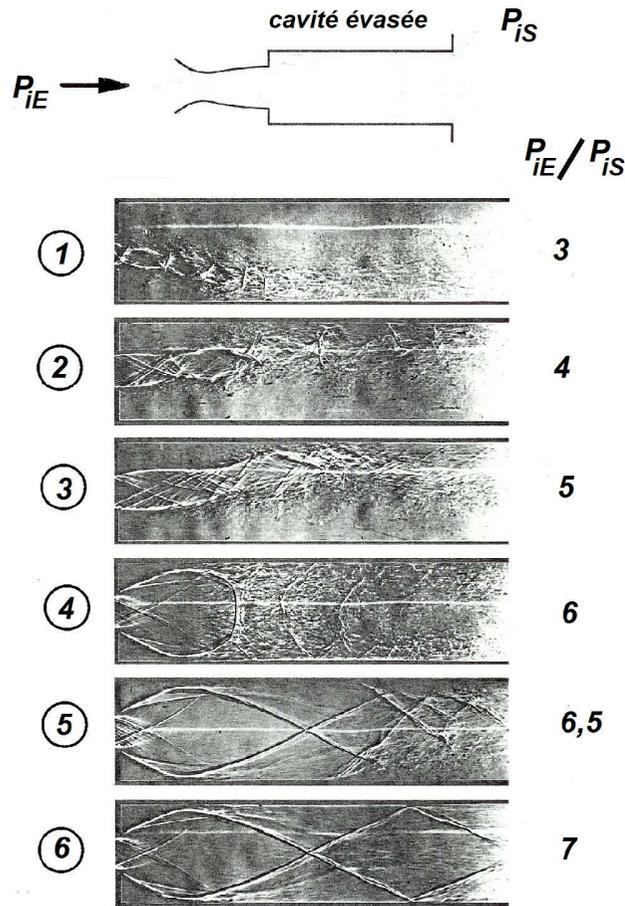


Pour en savoir plus :

- Chapitre 19 - La géométrie fractale de Mandelbrot
- Chapitre 20 - Le chaos déterministe
- Chapitre 21 - Le désordre
- Chapitre 22 - Etonnante physique statistique
- Chapitre 23 - Le chaos moléculaire



### 3.3 Le chaos spatio-temporel dans les évasements brusques confinés

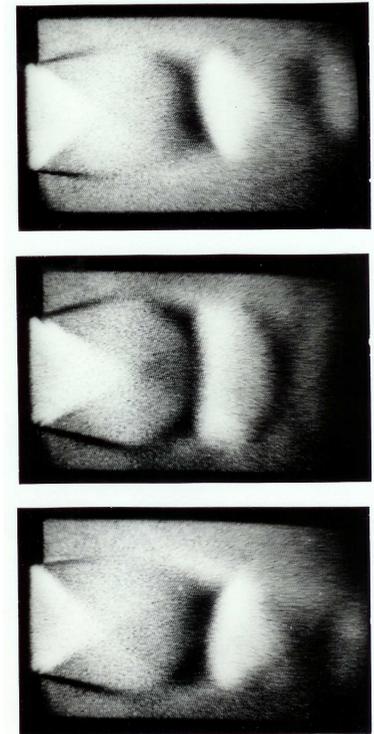


Exemples : crépines, vannes, décrochements de parois

Les visualisations strioscopiques mettent en évidence des structures dissipatives inquiétantes.

Entre les configurations 3 et 4 (figure de gauche), l'écoulement se recentre brutalement. On observe des battements de jets avec brusques variations de pression dans le dispositif. C'est le chaos spatio-temporel.

Ces écoulements fluctuants sont dangereux : s'ils possèdent une forte puissance motrice, ils excitent les structures et peuvent les détruire.



Visualisation des instabilités sur <http://www.youtube.com/watch?v=AOFpQMS3uE8>



Pour en savoir plus :  
 Chapitre 17 - Sautons le mur du son  
 Chapitre 18 - Observer pour comprendre  
 Chapitre 30 - Le trou : visite commentée



Parce que nous n'avons pas détruit leur énergie cinétique, ces jets fluides la dégraderont eux-mêmes en formant des structures dissipatives qui perturbent les installations.

**Est-il raisonnable de laisser les écoulements agir à leur guise dans ce chaos spatio-temporel, quand on sait que les puissances motrices à dissiper peuvent atteindre des mégawatts?**

## 4 Application du principe de pire action

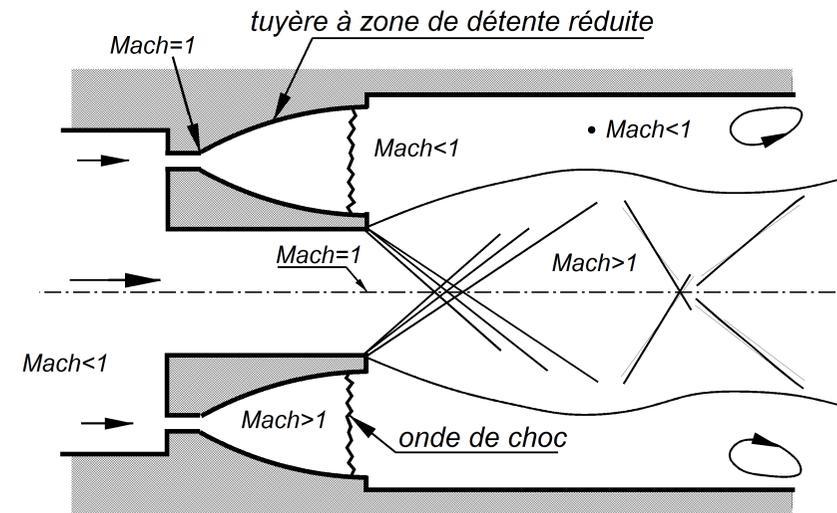
(Attention, c'est nouveau !)

### 4.1 Le vistemboir entropique, dégradateur d'énergie cinétique

On impose à l'écoulement un mélange brutal avec des échanges de quantité de mouvement très intenses.

Cet écoulement est stable et la dégradation de l'énergie cinétique est rapide.

**C'est de la très mauvaise mécanique des fluides ; elle va se révéler fort utile par son action sédative sur les écoulements.**



Exemple de vistemboir entropique

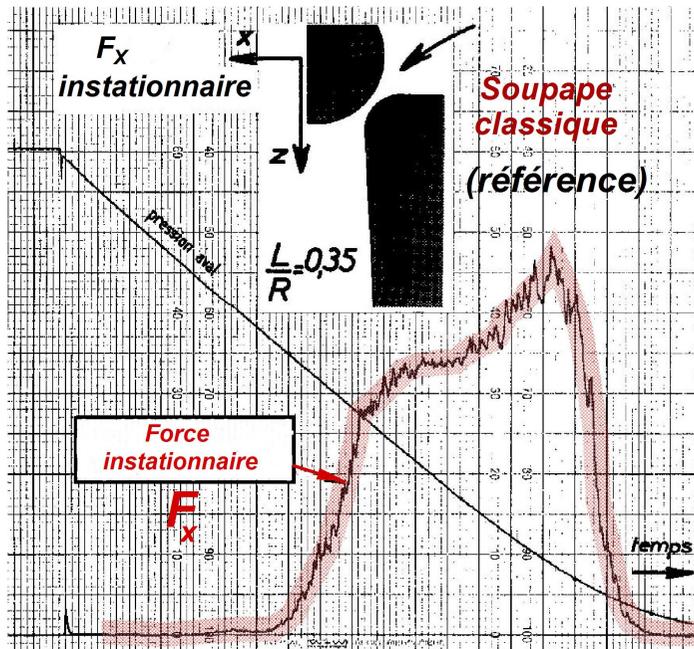


- Pour en savoir plus :
- Chapitre 30 - Le trou : visite commentée
  - Chapitre 31 - Pour s'éloigner de la catastrophe
  - Chapitre 32 - Le mouvement brownien : une chance !
  - Chapitre 33 - Le vistemboir entropique



## 4.2 Application du vistemboir entropique aux soupapes de régulation

Aux charges partielles des centrales thermiques la puissance à dégrader, dans les organes de régulation, peut atteindre plusieurs dizaines de mégawatts.



Avec des vistemboirs, les soupapes de régulation sont enfin calmées !



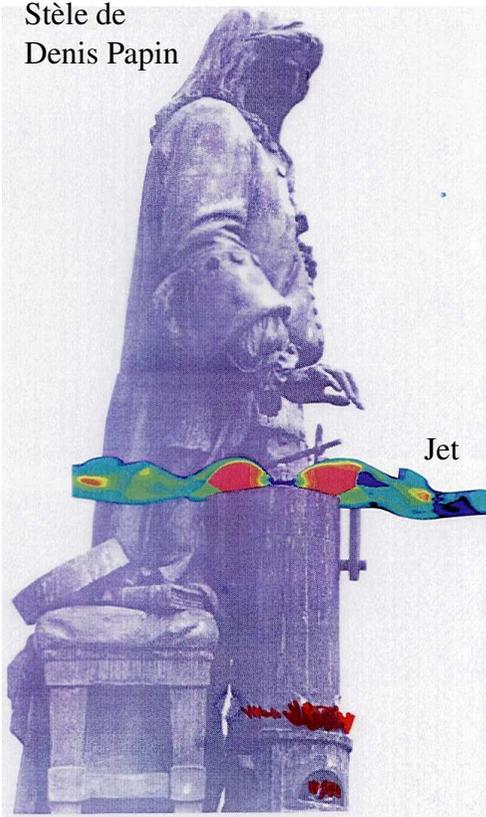
Pour en savoir plus :

Chapitre 34 - Organes de régulation apaisés



### 4.3 Les soupapes de sûreté

Stèle de  
Denis Papin



Des nombres de Mach de 5 apparaissent localement à l'échappement de la soupape de sûreté de Denis Papin, soit des vitesses d'écoulement de l'ordre de 700 m/s.

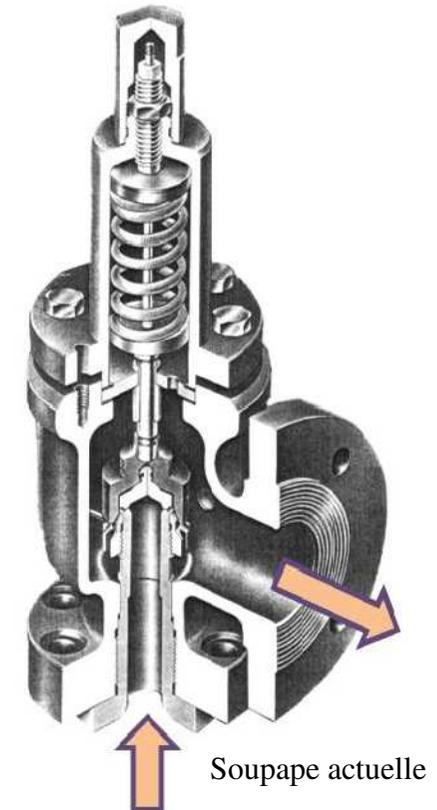
Sur la stèle de Denis Papin (Cour d'Honneur du CNAM), le jet supersonique a été ajouté par photomontage (Calculs effectués par la DER d'EDF pour le bicentenaire du Conservatoire).

On note l'épanouissement du jet libre à l'échappement.

Les soupapes, depuis Papin jusqu'à nos jours, ont subi de nombreuses modifications notables par leurs effets induits sur les écoulements.

L'une des principales est la mise en place d'un collecteur permettant la récupération du fluide expulsé. Toute la puissance motrice contenue dans le fluide, qui se libérait auparavant à l'atmosphère, est maintenant tenue de se dissiper dans l'espace réduit d'une canalisation.

L'écoulement est ainsi fortement gêné par le confinement réduit qui lui est proposé pour se détendre en aval. Le jet va se débrouiller pour dégrader sa puissance motrice au mieux de ses intérêts, de ses caprices, de ses lubies sans se préoccuper le moins du monde de garantir, ni notre sécurité, ni notre environnement, ni nos installations.



**Ces soupapes de sûreté ne sont plus des organes très sûrs.**

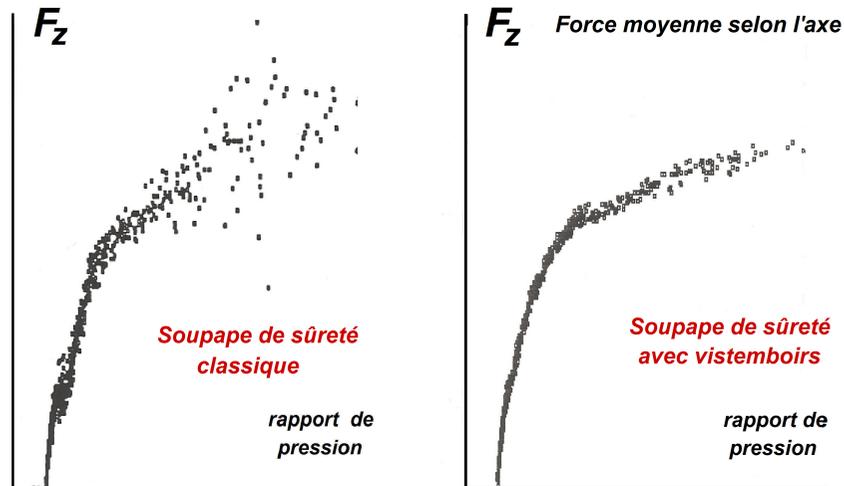


Pour en savoir plus :  
 Chapitre 12 - Une réalisation fondamentale : le digesteur  
 Chapitre 16 - Thermodynamique appliquée  
 Chapitre 17 - Sautons le mur du son



## 4.4 Le vistemboir entropique

### Application aux soupapes de sûreté



**Une géométrie avec des vistemboirs réduit les instabilités.**

La forte différence de pression existant entre l'équipement à protéger et le réservoir en aval engendre des vitesses d'écoulement considérables, dont les effets mécaniques sur les structures sont mal connus.

La puissance motrice du jet, pour une soupape de sûreté industrielle de milieu de gamme, est de l'ordre de 10 000 kW.

## Des soupapes plus tranquilles

Les soupapes de sûreté sont le siège d'écoulements instables, sources de bruit, de vibrations et de dysfonctionnements. Des géométries brevetées réduisent ces instabilités.

■ Cette étude, conduite à l'instigation de la commission Robinetterie industrielle, est le fruit d'une collaboration avec le Cnam et EDF, Au cours de la réunion du 20 novembre 1997 de la commission, Mr. Jean Serin (GEC Alsthom Sapag), Président, en a remercié tous les acteurs, en qualifiant de remarquables les travaux réalisés.

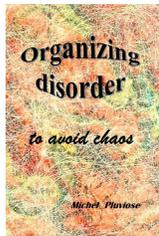
### Bibliography

[1] M. Watremetz, M. Pluviose : « Synthèse des travaux sur les écoulements dans les soupapes de sûreté », rapport Cetim, n° 172 384, mars 1998.

[2] M. Pluviose : « Stabilization of flow through steam turbine control valves », Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 111, octobre 1989.

48

CETIM-Information - n° 160 - Octobre 1998



Pour en savoir plus : Chapter 23 - Toward calm in safety valves



## 5 Incidents majeurs

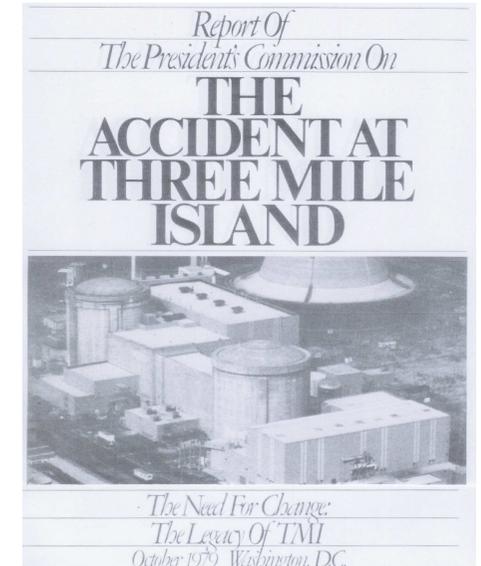
### 5.1 L'accident de Three Mile Island (28 Mars 1979)

L'accident débuta par une suite d'incidents d'exploitation fâcheux mais mineurs, concernant l'alimentation en eau des générateurs de vapeur. Les opérateurs mirent plusieurs minutes pour rétablir la situation. Pendant ce laps de temps, l'eau du circuit primaire, insuffisamment refroidie, avait fait augmenter la pression de ce circuit jusqu'à déclencher l'ouverture de la vanne de décharge du pressuriseur, dont le rôle est d'évacuer l'excès de vapeur vers un réservoir et donc de diminuer la pression dans le circuit primaire.

Lorsque le refroidissement par les générateurs de vapeur fut rétabli et que la pression du circuit primaire commença à descendre en-dessous du seuil d'ouverture de la soupape de sûreté, une autre défaillance se produisit : cette vanne de décharge du pressuriseur reçut l'ordre de se fermer mais resta coincée en position ouverte.

Les opérateurs, regardant l'indicateur de position de la vanne de décharge du pressuriseur, ont vu "vanne fermée" : cette information était fautive. Pour la plupart des observateurs, c'est là le point crucial de l'accident, car l'indicateur retransmettait en salle de commande l'ordre reçu par la vanne et non sa position réelle.

Des incidents en chaîne se poursuivirent jusqu'à la fusion partielle du cœur d'un réacteur. Ce fut le plus grave accident technologique sur le sol des Etats-Unis d'Amérique.




---

**Objection:** Il n'a pas été suffisamment noté que 9 fois avant l'accident, des soupapes de sécurité restèrent coincées en position ouverte. Un accident similaire s'était produit sur la centrale de David-Besse (1977).

La conception de la soupape de sécurité est manifestement en cause dans cet accident.

Les soupapes de sécurité ont de sérieuses difficultés pour se refermer car elles sont trop perturbées lors de leur ouverture. Soumises à des sollicitations mécaniques très importantes et non contrôlées, elles ne peuvent assurer correctement leur fonction. Selon les normes, une soupape de sécurité doit s'ouvrir et se refermer quand les conditions l'exigent. Les soupapes TMI 2 ne suivaient donc pas les normes. Et pourquoi des milliards de milliards de molécules du monde microscopique, s'échappant de ces soupapes, suivraient-elles les ordres venus de notre monde macroscopique ? Nous rêvons !

Une tare, liée à leur conception, entache ces soupapes de sûreté. Il ne s'agit cependant pas d'une tare congénitale, car la soupape de Papin en était dépourvue à sa naissance. Toutes n'en mourront pas, mais toutes sont atteintes.

**L'utilisation du vistemboir entropique aurait-il pu éviter cet accident ?** Absolument oui !

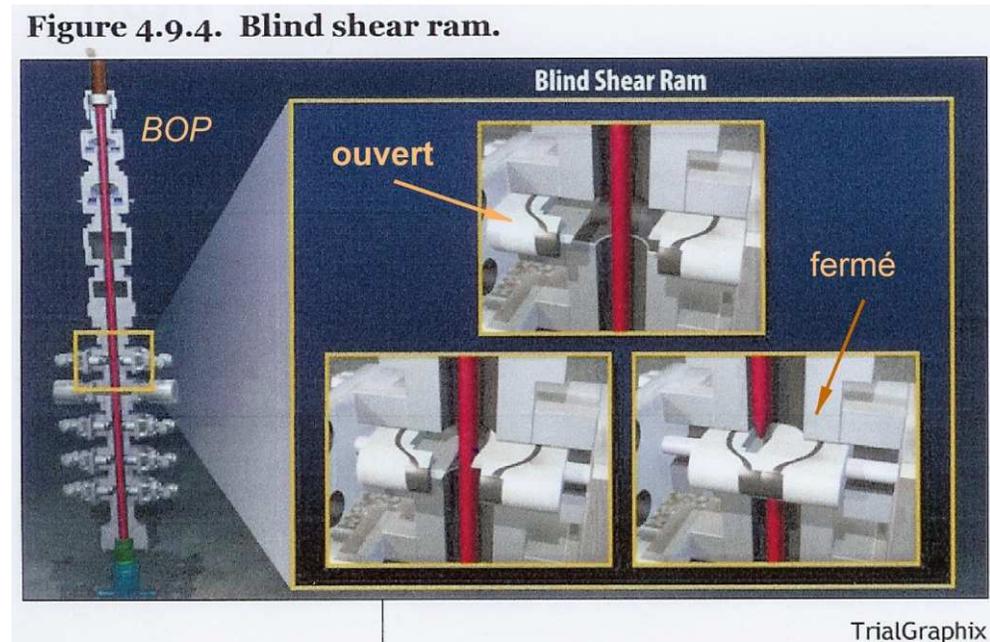
## 5.2 Explosion de la plateforme pétrolière Deepwater Horizon et marée noire dans Golfe du Mexique (Avril 2010)

Extraits de : Final Report (Released 01/11/2011) National Commission on the BP Deepwater Horizon Oil Spill and Offshore Drilling

Limitons-nous à quelques phrases saillantes du document officiel :

” Le blowout preventer (BOP) est un dispositif utilisé couramment pour bloquer l'éruption éventuelle d'hydrocarbures issus d'un puits en exploitation”. On exclut évidemment d'autres causes possibles de cet accident (ciment et boue) qui sortent du cadre de notre propos.

” Les règlements fédéraux avaient exigé que la plateforme pétrolière Deepwater Horizon soit munie d'un BOP incluant un blind shear ram (BSR), lequel est conçu pour cisailier le tuyau de forage du puits (voir figure 4.9.4) en cas d'urgence, pour éviter une éruption. Lors de l'incident, l'équipe de la plateforme a essayé de fermer les éléments du BOP et a activé les systèmes d'urgence. Les systèmes de contrôle automatiques et de secours auraient aussi dû obturer la tuyauterie. Quoiqu'il soit paru évident qu'un de ces systèmes ait activé le système d'obturation, le BSR n'a jamais scellé le puits.” [...]



” Mais même s'il est correctement activé, le BSR peut échouer à obturer le puits à cause de limitations mécanique et de conception connues. Pour que le BSR puisse isoler le puits, il doit être capable de cisailier la tuyauterie traversant le BOP. Mais les BSR ne sont pas toujours capables d'exécuter cette fonction critique, même dans des situations contrôlées.” [...]

” Les essais à faible pression sont en accord avec les pratiques dans cette industrie. La plupart des essais des BSR n'a pas établi la capacité de cet équipement à fonctionner pendant des conditions d'éruption avec de grands volumes de gaz se déplaçant à vitesse importante dans la tuyauterie de forage traversant le BOP.” [...]

L'utilisation du vistemboir entropique aurait-il pu éviter cet accident ?

Mon opinion : cet avis, pour le moins inquiétant, de la commission montre l'importance à apporter aux recherches et développement dans l'industrie pétrolière. L'utilisation d'un vistemboir adapté pourrait se révéler utile, après de nécessaires expérimentations. Il semble cependant plus urgent d'introduire encore davantage de physique et de technologie dans ces applications délicates.

### 5.3 Quelques incidents ... parmi beaucoup d'autres

#### Gas Turbine Division - The American Society of mechanical Engineers (September 1986)

*"Recently we have been working on a problem involving damage to a 600 MW steam turbine in a coal-fired power station near Sioux City, Iowa. We have visited the station at several times and as a result I have become better acquainted with the installation and operation of the four control valves for the turbines. The turbine damage is now the subject of a trial in a court of law so I could not discuss it ..."*

#### Porte-avions Charles-de-Gaulle (Janvier 2010)

Une soupape de sécurité doit être remplacée, annonce la Marine nationale, en estimant que cette intervention prendra plusieurs semaines. Un dysfonctionnement a été mis en évidence et la décision a été prise de procéder à un échange standard de la soupape.

**Mihama 2 (December 2011)** Mihama 2 plant in Fukui prefecture shut down today due to a coolant leak. A valve to adjust the pressure of primary coolant was cited as the problem.

**Etc. and all over the world.**



Restes d'une installation ayant été soumise à des excitations fluides non maîtrisées.

## 6 L'invention du vistemboir : historique, avis et témoignages

- **Soutenance de Thèse de Docteur ès Sciences** (Université Pierre et Marie Curie Paris VI) en 1984

*”Contribution à l'étude des instabilités d'écoulement dans les organes de réglage.”*

- **Brevet déposé en 1984.** Délivré en 1986 (France 84/03.206); en 1987(Etats-Unis 4,688,755), en 1988(Etats-Unis 4,735,224)(Europe 0.156.672), en 1989(URSS 1.450.759) (Canada 1.249.762) Japon(60/39.002)

- Communication à l'ASME, Portland, Oregon, 1986

***Stabilization of Flow Through Steam-Turbine Control Valves.***

Transactions of the ASME Vol.111, October 1989

- **American Society of Mechanical Engineers to Directeur General du CETIM<sup>1</sup>**

*”This past October, Dr. Michel Pluviose of your organization presented an excellent technical paper entitled ”Stabilization of Flow through Control Valves” at the Joint Power Generation Conference held in Portland, Oregon. Please convey our congratulations and thanks to Dr. Pluviose for his efforts in preparing the paper and making a lucid presentation. The paper’s contribution was original and added significantly to the value of the technical sessions...”* Nagraj R. Eleswarapu, Session Chairman (1986)

- **Un avis industriel** (parmi d'autres) : Dresser-Rand (1991)

*”The ASME Transactions of Oct. 1989 contained a 5-page paper by M.Pluviose titled ”Stabilization of Flow through Steam Turbine Control Valves”. This paper generated considerable interest at Dresser-Rand since we were at that time, trying to eliminate valve instability on a recently commissioned, inner-barrel machine in Korea.”*

Que des industriels si réputés aient pris conscience des notions véhiculées par les brevets précités et les aient appliquées est rassurant. On peut ainsi espérer que les centrales thermiques classiques, nucléaires ou solaires, de dernière génération soient équipées de ces vistemboirs salutaires.

- **Un avis scientifique**

*” C’est le mérite de Michel Pluviose d’avoir, le premier au monde, trouvé des remèdes, mais aussi dégagé des idées appuyées sur des expériences méthodiquement conduites et raisonnées qui permettent de comprendre et de concevoir de nombreuses variantes.”*

Robert Legendre, Haut Conseiller scientifique à l'ONERA<sup>2</sup>, Membre de l'Académie des sciences

---

<sup>1</sup>Centre Technique des Industries Mécaniques

<sup>2</sup>Office national d'Etudes et de Recherches Aéronautiques

## 7 Publications

**Comment éviter des catastrophes en organisant le désordre**

*Three Mile Island ?  
Deepwater Horizon ?  
etc ?*

*Un domaine méconnu de la physique pourrait être à l'origine de grandes catastrophes*

**eBook (pdf)**  
<http://turbo-moteurs.cnam.fr/>

**Instabilities of Flow in Sudden Enlargement**



*Michel Pluviose*

Winter Asme Atlanta 1991

**eBook et ePub**  
[www.lulu.com](http://www.lulu.com)

ASME Digital Library      *Stabilization of Flow Through Steam-Turbine Control Valves*      Michel Pluviose

ASME/DIGLIB - Journals - J. Eng. Gas Turbines Power - Volume 111 - pp. 142

ASME/IEEE Power Generation Conference, Portland (Oregon) 1986

**pdf**      <http://dx.doi.org/10.1115/1.3240305>

**L'organisation du désordre**

*Pour éviter le chaos*

*Michel Pluviose*

Quand la physique s'écarte du meilleur pour rejoindre le pire afin de protéger des vies. En retrouvant, par hasard, la philosophie.

**Livre et eBook**

Sur le Web : [www.lulu.com](http://www.lulu.com)

En librairie :

*Privat médecine et sciences*  
33, rue Gambetta 31000 Toulouse  
Tel : 05 61 22 51 43

Pourquoi organiser le désordre ? Une provocation ?  
Non, une innovation !  
La cause d'avaries majeures résulte d'une insuffisante compréhension des écoulements possédant une énorme puissance motrice. Cette partie de la physique est demeurée dans l'ombre : c'est la thermodynamique dégradatrice.  
Dans certaines installations dangereuses, on doit utiliser des dégradateurs entropiques provoquant un désordre massif, mais organisé, afin d'apaiser les écoulements et protéger ainsi les hommes, leurs installations et leur environnement.  
Cette thermodynamique dégradatrice ouvre un nouveau paragraphe à verser au chapitre concernant la thermodynamique du non-équilibre.  
Le chaos avec ses fractales et attracteurs étranges est revisité, pour mieux le comprendre avant de s'en échapper au plus vite.  
On vérifie que l'ordre, le désordre et l'organisation sont toujours et puissamment actifs dans les sciences physique et humaine.

## 8 Organisations et affiliations

### Affiliations industrielles



*Hispano-Suiza*



*Centre technique  
des industries  
mécaniques*

**ATTAG**  
*Association technique pour  
les turbomachines et les  
turbines à gaz*



**Enseignement  
Recherche**

**le cnam**



**Chaire de  
turbomachines  
et moteurs**

## 8.1 L'auteur

Michel Pluviose, professeur honoraire du Conservatoire national des Arts et Métiers (CNAM), a été titulaire de la chaire de turbomachines.

Ingénieur, docteur d'état ès sciences, scientifique de haut niveau mais aussi homme de terrain, il a été ingénieur chez Hispano-Suiza, à la SNECMA, chef du laboratoire de l'ATTAG (Association technique pour les turbomachines et turbines à gaz), responsable des activités fluides compressibles au CETIM (Centre technique des industries mécaniques), ingénieur-conseil en énergétique.



**[www.turbo-moteurs.cnam.fr](http://www.turbo-moteurs.cnam.fr)**

Courriel : **[contact@degradative-thermodynamics.com](mailto:contact@degradative-thermodynamics.com)**

et

**[contact@vistemboir.org](mailto:contact@vistemboir.org)**