

## Vers le calme dans les écoulements grâce au principe de pire action

Michel Pluviose

Chaire de turbomachines

Conservatoire national des Arts et Métiers

292, rue Saint-Martin, 75141 Paris Cedex 03, France

michel\_pluviose@numericable.fr

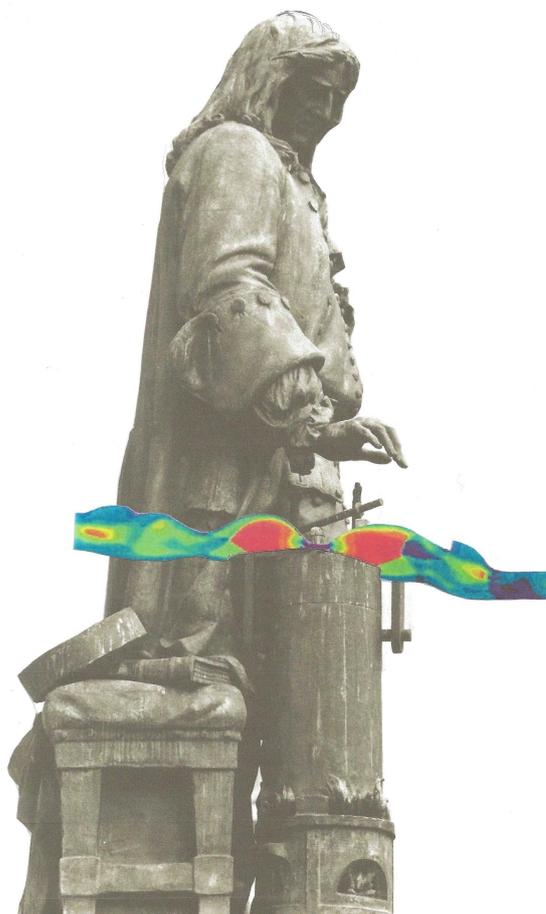
Les écoulements dans les soupapes de sécurité, en effectuant une incursion très profonde dans le domaine chaotique, sont un exemple remarquable d'application des lois de la thermodynamique. Cet article propose des solutions efficaces pour calmer les écoulements capricieux qui perturbent ces soupapes. Un nouveau concept en physique est introduit : le principe de pire action.

### La soupape de Denis Papin : la référence

En 1681, Papin invente le digesteur muni d'une soupape de sécurité. Les écoulements dans la soupape de Papin possèdent une quantité significative d'énergie cinétique puisque la différence de pression entre les réservoirs en amont et en aval est importante (Rapport de pression = 18,6 pour l'exemple de Papin). Avec de tels rapports de pression, les écoulements dans ces dispositifs sont supersoniques. Le réservoir aval est l'atmosphère pour la soupape de Papin. L'énergie cinétique de la vapeur s'échappant de la soupape est dissipée dans l'atmosphère ambiante où elle est transformée en énergie désordonnée d'agitation thermique. Cette puissance motrice est mécaniquement perdue. Les visualisations et les calculs montrent que la soupape de sûreté de Papin fonctionne correctement.

Sur la figure 1, on constate l'épanouissement du jet libre à l'échappement. Des nombres de Mach de 5 apparaissent localement à l'échappement de la soupape de sûreté de Papin, soit des vitesses d'écoulement de l'ordre de 700 m/s. Sur le montage photographique (Fig.1), a été rajouté le jet supersonique calculé qui s'échappait de la soupape de Papin (Calculs effectués aimablement, à la demande de l'auteur, par la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France pour le bicentenaire du Conservatoire national des Arts et Métiers).

Notre propos aurait pu s'achever immédiatement si la dissipation du jet annulaire de vapeur issu d'une soupape actuelle s'effectuait dans une vaste atmosphère en aval, comme le proposait initialement Papin.



*Figure 1 - Stèle de Denis Papin  
Cour d'Honneur du CNAM  
Conservatoire national des Arts et Métiers  
Photomontage révélant l'ampleur du jet  
supersonique dans l'atmosphère en aval*

## Soupape de sécurité actuelle

Les soupapes, depuis Papin jusqu'à nos jours, ont subi de nombreuses modifications notables par leurs effets induits sur les écoulements. Dans les années 1990, on savait que certains problèmes posés par le fonctionnement des soupapes de sécurité pour protéger les chaudières n'étaient toujours pas résolus. Par exemple, une fois qu'une soupape de sécurité s'était ouverte, elle n'était plus étanche à la fermeture. Une recherche d'intérêt général a alors été entreprise. Elle a clairement profité d'études précédentes sur les soupapes de contrôle des turbines à vapeur qui avaient apporté des améliorations significatives du niveau vibratoire de ces dispositifs [1]. Les travaux effectués ont été conduits dans les laboratoires du CNAM et orientés par la Commission robinetterie industrielle du CETIM (Centre Technique des Industries Mécaniques).

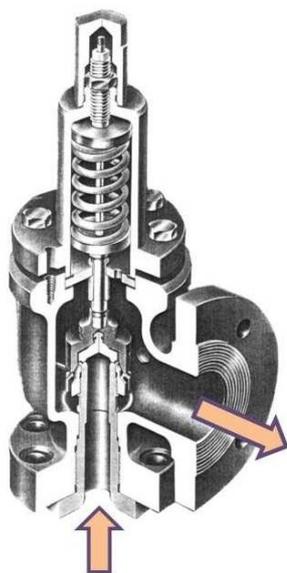


Figure 2 - Soupape de sécurité actuelle

### Influence du collecteur

Un des changements principaux, préoccupant, est la mise en place d'un collecteur permettant la récupération du fluide expulsé (Fig. 2). Le jet n'est plus libre. Toute la puissance motrice contenue dans le fluide, qui se libérait auparavant à l'atmosphère, est maintenant obligée de se dissiper dans l'espace réduit d'une canalisation. Au vu de l'amplitude du jet qui s'échappe de la soupape de sécurité de Papin (Fig. 1), il est clair que l'écoulement est fortement gêné par le confinement réduit qui lui est proposé pour se détendre en aval. Les phénomènes sont trop compliqués pour avoir ici la prétention de les décrire en détail. Tout ce qu'on peut affirmer clairement, c'est que l'écoulement 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 notre sécurité. Les résultats obtenus sur plusieurs modèles en utilisant des visualisations et des mesures, ont révélé des écoulements particulièrement instables avec de fortes fluctuations de pression selon la géométrie étudiée. De nombreux

phénomènes chaotiques ont été observés ; ils interfèrent les uns avec les autres. Les pressions instationnaires mesurées indiquent que des phénomènes acoustiques de forte amplitude prennent naissance dans le dispositif et se propagent très loin dans le canal en aval. Ces observations et les mesures effectuées à l'aide de capteurs à court temps de réponse confirment la violence des instabilités qui semblent suivre les lois du hasard. Le niveau des fluctuations de pression était supérieur d'un facteur sensiblement égal à 3 à celui observé sur une soupape sans confinement.

### Influence de la chambre d'accumulation

En 1848, Charles Retchie inventa une chambre d'accumulation permettant à la soupape de sécurité de s'ouvrir plus rapidement. Cependant, cette solution introduit un autre problème : un second col sonique. Ces cols soniques en série causent des perturbations à certaines levées intermédiaires. Lors de la levée du clapet de la soupape, le col sonique se déplace depuis l'aval aux faibles levées jusque dans la buse à la levée nominale. Donc, il existe une levée critique pour laquelle des instabilités existent, liées à cette indécision du jet à s'ancrer dans une section bien définie. Ce qui conduit souvent à des instabilités, des interactions et des oscillations acoustiques qui mettent en danger le matériel. Heureusement, ces zones délicates sont généralement franchies rapidement. Aucune amélioration ne pourra être achevée si l'on ne fixe pas le col sonique à l'aval en lui interdisant toute remontée vers la buse.

### Lois de la thermodynamique classique pour soupapes de sécurité

Plutôt que d'utiliser les lois de la thermodynamique sous la forme traditionnelle : L'énergie se conserve, mais l'énergie se dégrade, elles s'expriment dans ce texte par : l'énergie se conserve, mais dans certains cas l'énergie doit être dégradée. Entre *l'énergie se dégrade* et *l'énergie doit être dégradée*, la différence est énorme. L'énergie se dégrade consiste à laisser le monde microscopique agir comme il lui plaît. En lui donnant toutes les possibilités de commettre ses méfaits. L'énergie doit être dégradée signifie clairement que nous allons agir. Avec le vistemboir qui va être mis en œuvre ci-après. Toute dissipation d'énergie due aux irréversibilités est liée à la notion d'entropie de la seconde loi de la thermodynamique. Clausius a défini l'entropie dans notre monde macroscopique, alors que Boltzmann en a recherché les fondements dans le domaine microscopique. L'entropie de Boltzmann est une mesure du désordre qui règne dans le monde moléculaire.

### Le principe de moindre action

La mécanique rationnelle, véhicule l'idée que tous les phénomènes de la nature peuvent être réduits au principe de moindre action, lequel est basé sur la proposition suivante : «*La nature n'aime pas trop se fatiguer*».

A l'équilibre, le principe de moindre action contrôle toute

la mécanique classique et quantique. L'entropie est nulle et les phénomènes sont réversibles par rapport au temps. La physique sous cette forme, abondamment enseignée, ignore le frottement. Elle ne veut pas connaître le désordre, l'entropie. Elle est donc impuissante pour dégrader de l'énergie cinétique.

### Sur le chemin du chaos

La structure des filets d'eau coulant d'un robinet a intrigué les savants depuis des siècles. Quand ces écoulements sont canalisés en aval dans une tuyauterie, il devient encore plus difficile d'en comprendre la nature physique profonde. C'est le problème de l'évasement brusque de Borda dans un espace confiné. Borda fut le premier à reconnaître en 1766 que dans cette configuration, le théorème de Bernoulli, issu de la mécanique newtonienne, devait être en défaut. Il détermina la dissipation d'énergie résultant de cette configuration. Borda ainsi a clairement démontré que ces dissipations sont liées à l'énergie cinétique contenue dans le fluide.

### Domaines de la thermodynamique (Fig. 3)

Proche de l'équilibre, c'est le domaine de la thermodynamique linéaire. L'agitation dans le monde moléculaire conduit aux phénomènes de transport. Ces processus sont irréversibles : c'est en particulier la viscosité. L'entropie croît. Dans cette zone, les écoulements sont laminaires.

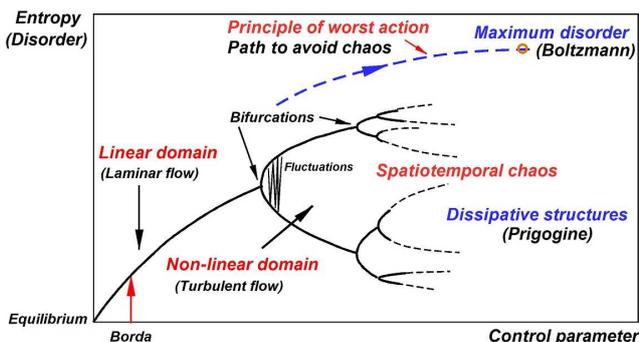


Figure 3 - Domaines thermodynamiques rencontrés lors du fonctionnement d'une soupape de sécurité

Plus loin de l'équilibre, on entre dans le domaine non-linéaire. L'écoulement devient irrégulier et complexe : c'est le régime turbulent. Mais ce n'est pas le désordre complet. Le système a un comportement chaotique déterministe : il possède un attracteur étrange. Cette zone chaotique apparaît après une bifurcation, accompagnée de fluctuations puis de structures dissipatives, nommées ainsi par Ilya Prigogine. Ces structures nouvelles apparaissent loin de l'équilibre, le jet supersonique de la figure 1 en est un exemple. Puis, en s'éloignant encore plus de l'équilibre, on pénètre dans la zone vraiment chaotique, où l'anarchie est la plus totale. C'est la zone de fonctionnement des soupapes de sécurité. Lors du déclenchement d'une soupape de sécurité, les écoulements internes traversent tous ces domaines thermodynamiques. Une soupape de sûreté doit s'ouvrir quand les conditions l'exigent, mais

elle doit être capable de se refermer. Pendant l'ouverture, tout le tumulte interne dû à la puissance motrice qui se dégrade en convertissant l'énergie cinétique du fluide en d'autres formes (énergie thermique, vibratoire, sonore, etc.) attaque la structure mécanique, et parfois la déforme.

### Est-il bien raisonnable de laisser le monde microscopique former des structures dont on perd le contrôle dans nos installations industrielles majeures ?

Les structures dissipatives finissent par s'éteindre après un certain temps et après certains dégâts. Elles ne sont pas suffisamment dissipatives pour être acceptables dans les dispositifs de sécurité. Il faut les détruire pour rejoindre le plus rapidement possible l'état d'équilibre final. En d'autres termes, nous quitterons Prigogine pour nous rapprocher de Boltzmann.

Le contrôle de la dissipation d'énergie par un désordre organisé est notre objectif avoué. En accord avec le message de Boltzmann, il consiste à diffuser l'énergie cinétique dans l'espace par d'incessants échanges d'énergie entre les diverses particules. Il nous faut chercher à supprimer les structures dissipatives formées par des cohortes de molécules qui s'emparent de la forme tridimensionnelle offerte à leurs ébats, et qui s'auto-organisent sans trop se soucier de nous. Ce *laisser-faire* est critiquable car la puissance motrice importante à dégrader est la source de nombreux ennuis, tels que des excitations mécaniques des structures, du bruit, des rotations de veine, des déformations permanentes, des difficultés de refermeture du clapet, etc. Ces dispositifs sont le siège d'un infernal chaos.

### Tentatives pour réduire les instabilités

Pour tenter d'échapper au chaos et aux structures dissipatives qui l'accompagnent, on propose de créer un désordre massif dans le monde microscopique. Dans les écoulements supersoniques, il existe une particularité favorable pour créer du désordre, énormément de désordre. Dans la partie supersonique d'une détente, les écoulements ne sont plus unidimensionnels. Ils sont morcelés en multiples parties possédant chacune une direction et une vitesse particulière. Ces valeurs diffèrent notablement d'une particule à sa voisine. D'autre part, on peut forcer la détente à s'effectuer dans des tuyères de formes différents.

### Le principe de pire action

Pour faire apparaître le principe de pire action, nous utiliserons un dégradeur d'énergie cinétique, aussi appelé un vistemboir, qui a été décrit dans la bibliographie citée [2]. L'un des procédés possible pour maîtriser cet écoulement anarchique consiste à superposer des tuyères classiques et des tuyères en forme de coquetiers. Cela implique la conception d'un vistemboir adapté à cette situation, afin de créer du désordre organisé (Fig. 4). Dans chacune de ces tuyères prise séparément, la dissipation d'énergie est faible (en dehors des ondes de choc). En les superposant dans des structures sandwichs, tout change : chaque particule fluide se retrouve enclavée par d'autres particules n'ayant rien en

commun avec elle, ni la direction suivie, ni la vitesse : une belle pagaille. A l'interface, les particules vont être extrêmement perturbées par les conditions sévères de voisinage engendrées par des fluides se détendant très différemment. Basé sur ce principe, des tuyères de formes différentes sont usinées sur le clapet de la soupape de sécurité. Elles sont distribuées azimutalement pour former une stratification de l'écoulement. La seule chose que nous connaissons vraiment est que cela nous donne, depuis notre monde macroscopique, un moyen d'agir sur les particules du monde microscopique. Et non l'inverse comme actuellement. Les échanges de quantité de mouvement sont énormes, et la dissipation d'énergie cinétique doit être significative par les effets de cisaillement ainsi créés. On met ainsi le désordre dans le monde moléculaire pour échapper au chaos dans notre monde macroscopique.



Figure 4 - Soupape de sécurité munie de vistemboirs

La justification peut être la plus évidente de ce procédé, consiste simplement à remarquer que l'on a rendu les écoulements inaccessibles pour un ingénieur-calculateur basant sa démarche sur la mécanique des milieux continus. Les résultats d'expériences comparatives menées sur une soupape de réglage ne laissent aucun doute sur l'efficacité du procédé [1]. Les résultats sont aussi convaincants dans les soupapes de sécurité comme on peut le voir en figure 5. L'objectif est atteint : on constate que les irrégularités et les instabilités sont atténuées sur les efforts moyens. L'évolution des efforts présente une allure beaucoup plus régulière sur toute la plage d'utilisation. Une analyse

en fréquence des caractéristiques dynamiques indique que celles-ci sont fortement diminuées. L'amplitude de leur niveau global est deux à trois fois moins importante sur les fluctuations de pression et d'effort. Une amélioration encore plus nette pourrait être atteinte avec une configuration où le col serait maintenu à la sortie du clapet.

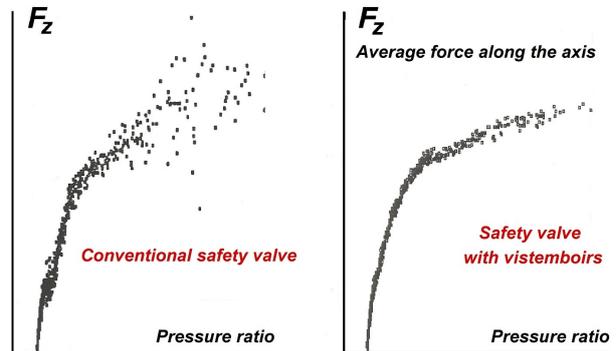


Figure 5 - Comparaison des efforts moyens selon le rapport de pression

### Epilogue

En s'appuyant sur les principes de base de la thermodynamique et de la mécanique des fluides, on a attiré l'attention sur les risques d'incidents liés à des dissipations d'énergie non contrôlées dans les soupapes de sécurité et dans d'autres organes de détente. Plutôt que de laisser l'énergie cinétique, contenue dans la matière, se dissiper par l'intermédiaire de jets instables dans des systèmes d'ondes de choc plus ou moins stationnaires, on propose de privilégier la dissipation d'énergie par un désordre contrôlé en pénétrant dans l'intimité des écoulements. Cette méthode permet de stabiliser les écoulements internes de manière significative. L'ouverture et la refermeture des soupapes de sûreté s'en trouve améliorée.

Le principe de pire action calme les écoulements et constitue, par ailleurs, un problème très intéressant en physique de nos jours et pour l'avenir.

### Sur 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.



### Bibliographie succincte

- [1] Pluviose Michel, Stabilization of Flow Trough Steam-Turbine Control Valves, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, p 642-646, Vol. 111, October 1989
- [2] Pluviose Michel, Organizing Disorder to Avoid Chaos, Paperback, 2012, www.lulu.com,
- [3] www.degradative-thermodynamics.com