

Vers le calme dans certains écoulements grâce au principe de pire action

P^r Michel Pluviose

Chaire de turbomachines
Conservatoire national des Arts et Métiers
292, rue Saint-Martin, 75141 Paris Cedex 03, France
chaire.turbomachines-moteurs@cnam.fr

Les écoulements dans les soupapes de sécurité, en effectuant une incursion très profonde dans le domaine chaotique, sont un remarquable exemple d'application des lois de la thermodynamique. Cet article propose des solutions efficaces pour calmer les écoulements capricieux et dangereux qui perturbent ces soupapes. On introduit un nouveau concept en physique : 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. La puissance motrice disponible est mécaniquement perdue. Les visualisations et mesures effectuées ainsi que 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. Le jet supersonique -issu du calcul- qui s'échappait de la soupape de Papin a été rajouté sur le montage photographique (Fig.1 - 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.

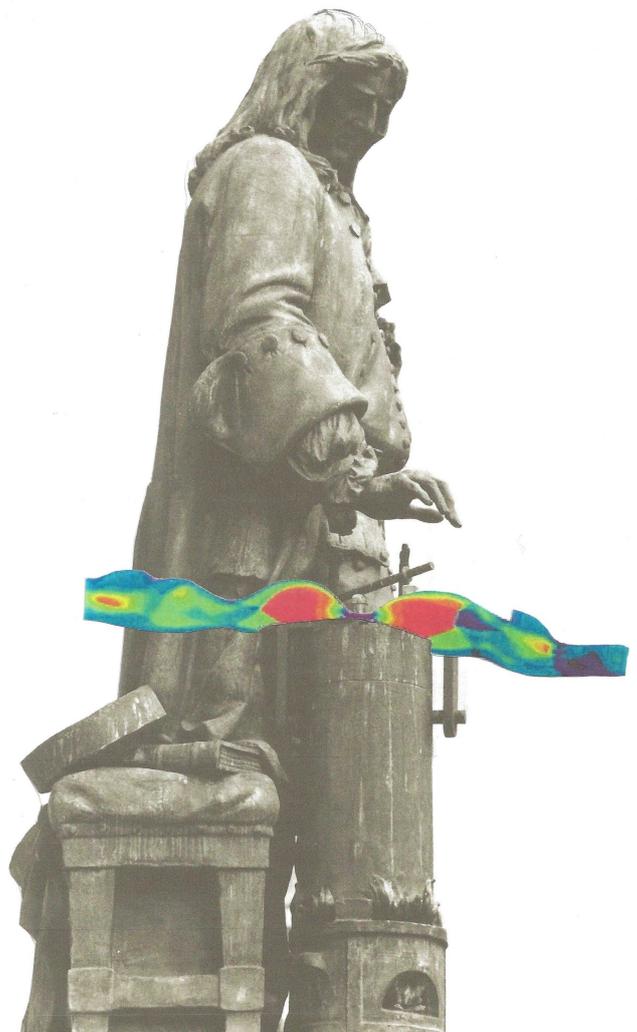


Figure 1 - Stèle de Denis Papin.
Cour d'Honneur du CNAM,
Conservatoire national des Arts et Métiers.
Photomontage révélant l'ampleur du jet
supersonique dans l'atmosphère en aval.

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).

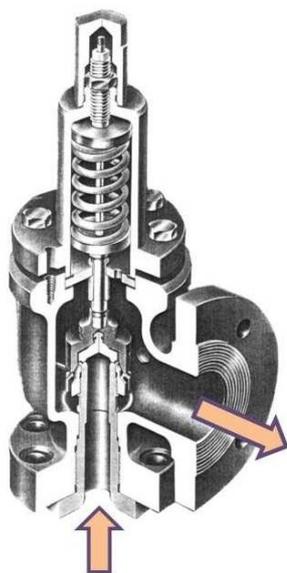


Figure 2 - Soupape de sécurité actuelle.

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 si compliqués qu'on ne peut avoir la prétention de les décrire ici 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.

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. Les phénomènes sont réversibles par rapport au temps et aucune variation d'entropie n'existe. La physique sous cette forme 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 a ainsi 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 initial, 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 le cas pour la viscosité. L'entropie croît. Les écoulements sont laminaires dans cette zone.

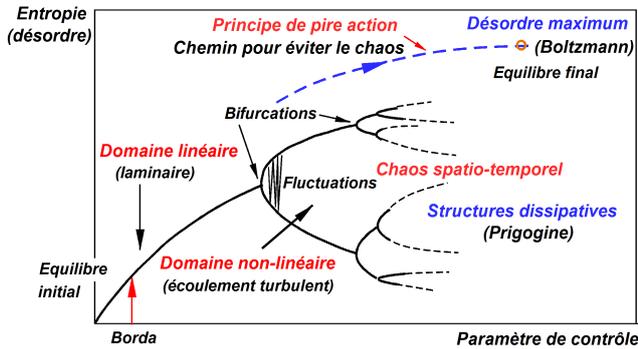


Figure 3 - Domaines thermodynamiques rencontrés lors du fonctionnement d'une soupape de sécurité.

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 ordonnées 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. Les soupapes de sûreté fonctionnent dans cette zone trouble. 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 souvent la déforme.

Puisque on n'a pas été en mesure de détruire suffisamment leur énergie cinétique, les écoulements la dégraderont d'eux-mêmes.

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 de Prigogine sont entretenues par des échanges avec leur environnement; elles faiblissent après un certain temps et certains dommages, puis elles disparaissent. En raison de la partie d'ordre qu'elles contiennent, elles ne sont pas suffisamment dissipatives pour être acceptables dans les soupapes de sûreté.

On doit tout mettre en œuvre pour supprimer ces structures dissipatives constituées par des milliards de milliards de

molécules qui envahissent la forme tridimensionnelle qui leur est offerte et s'organisent sans notre consentement. Elles doivent être détruites afin d'atteindre l'équilibre final de Boltzmann aussi rapidement que possible.

Le principe de pire action

Le principe de moindre action, évoqué précédemment, est un principe d'ordre ; il n'admet aucun désordre. L'ordre et le désordre sont présents dans une structure dissipative.

Le principe de pire action a pour fondement l'organisation du plus grand désordre possible dans un système moléculaire et donc l'élimination de la partie d'ordre qui y est contenue. Le principe de pire action s'oppose ainsi frontalement au principe de moindre action, d'où son nom.

Application du principe de pire action aux soupapes

Dans les écoulements supersoniques, il existe une particularité favorable pour créer énormément de désordre. Dans la partie supersonique d'une détente, les écoulements ne sont plus unidimensionnels. Ils sont morcelés en de multiples parties possédant chacune une direction, une vitesse, etc. Ces valeurs diffèrent notablement d'une particule à sa voisine. Par ailleurs, une détente donnée, a priori sans dissipation d'énergie, peut s'accomplir dans des tuyères de formes différentes. Par exemple, on peut construire des tuyères classiques, comme celles des souffleries supersoniques, ou des tuyères en coquetier analogues à celles utilisées dans les fusées. On admet que les écoulements sont réversibles dans chacune de ces deux tuyères prises séparément (en dehors d'éventuelles ondes de choc) ; rapprochons-les et tout change.

L'instrument qui permet d'appliquer le principe de pire action est appelé un dégradeur d'énergie cinétique, ou plus brièvement un vistemboir [2]. La superposition des deux tuyères précédentes -tuyère classique et tuyère en coquetier - constitue un vistemboir.

Dans un tel empilement de tuyères en structure sandwich, 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. Les particules doivent 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 distribuées azimuthalement pour former une stratification de l'écoulement (fig. 4 par exemple).

La structure des écoulements supersoniques permet ainsi d'obtenir de nombreuses configurations moléculaires, donc de créer un intense désordre, selon Boltzmann.

En diversifiant les écoulements supersoniques avant de les accoler par surprise, on crée un indescriptible pugilat dans le monde des très petites particules. Des phénomènes de transports non-linéaires brutaux entrent en action pour accroître quasi-intamment la production d'entropie.

La géométrie du vistemboir impose à l'écoulement de suivre globalement le principe de moindre action jusqu'au col. Dès le passage du col, c'est le principe de pire action qui se manifeste pour produire une rapide dégradation d'énergie cinétique, avec une grande

stabilité de l'écoulement. En détruisant les écoulements supersoniques dès qu'ils apparaissent, c'est-à-dire dès le franchissement du col de la tuyère, le vistemboir interdit aux molécules de se regrouper en structures dissipatives.

L'utilisation du principe de pire action permet d'atteindre rapidement l'état d'équilibre final sans traverser les secteurs chaotiques et en échappant aux structures dissipatives (Fig. 3). Les applications principales de ce principe sont les dispositifs de détente dans lesquels de l'énergie cinétique doit être dégradée massivement et rapidement. Les soupapes en sont un exemple.

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 le contraire comme actuellement. L'originalité du vistemboir réside dans cette aptitude à inverser l'allégeance d'un monde sur l'autre.

Les échanges de quantité de mouvement sont énormes, et la dégradation d'énergie cinétique doit être rapide. 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

Sur l'auteur

Michel Pluiose, 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] Pluiose Michel, Stabilization of Flow Through Steam-Turbine Control Valves, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, p 642-646, Vol. 111, October 1989
- [2] Pluiose Michel, L'organisation du désordre. Pour sortir du chaos, Librairie Privat (05 61 22 51 43)
- [3] www.degradative-thermodynamics.com
- [4] www.Flows-in-Valves.blogspot.com
- [5] Quieting the Flows in Valves Using Kinetic Energy Degradar, Int. Journal of Thermodynamics, Sept.2013 <http://ehakem.com/index.php/IJoT/article/view/456>

du procédé [1]. Les résultats sont aussi convaincants dans les soupapes de sécurité. On constate que toutes les caractéristiques dynamiques sont atténuées : l'objectif est atteint. L'évolution des efforts moyens, par exemple, présente une allure beaucoup plus régulière sur toute la plage d'utilisation, comme on peut le voir en figure 5.

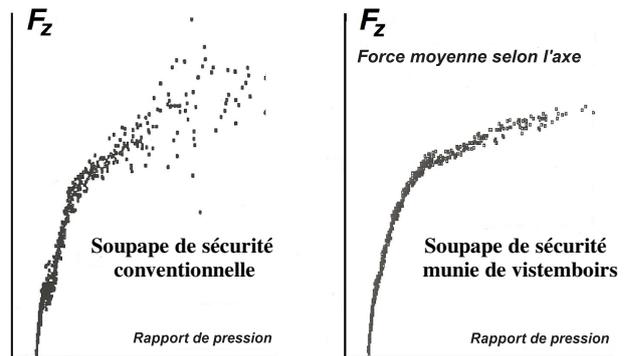


Figure 5 - Comparaison des efforts moyens selon le rapport de pression

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 et la tuyauterie guidant le fluide regagne en sérénité.

Le principe de pire action permet de maîtriser certains écoulements au comportement dangereux. Il ouvre, par ailleurs, de nouvelles perspectives en physique.