Évolution des connaissances à l'occasion des études de thermohydraulique nucléaire

Fresh knowledge from nuclear thermohydraulics research

Roger Séméria

Chef du Service des Transferts Thermiques
Département de Transfert et Conversion d'énergie
Centre d'Études Nucléaires de Grenoble

Generalités

Avant la seconde guerre mondiale les installations industrielles nécessitant une meilleure compréhension des écoulements diphasiques furent les chaudières conventionnelles, les installations pétrolières et chimiques. Les besoins dans ces secteurs subsistent encore, mais depuis les années 50, le développement des réacteurs nucléaires refroidis par liquides (eau, sodium, liquides organiques, sels fondus) a suscité un effort de recherche très important dans tous les pays ayant recours à l'énergie nucléaire.

On peut se demander pourquoi les réacteurs nucléaires nécessitent une connaissance des écoulements diphasiques meilleure que celle demandée par les chaudières classiques :

Tout d'abord les géométries de l'écoulement sont plus complexes que les tubes puisque le combustible gainé se présente sous forme de faisceaux de barreaux en général verticaux dont l'écartement est maintenu par des grilles ou des fils en hélice, les diamètres hydrauliques sont faibles (quelques millimètres) et les densités de flux thermique ne sont pas uniformes. D'autre part tout défaut local de refroidissement conduit à un endommagement de la gaine du combustible et à une contamination accrue du circuit primaire, ce qui gêne l'exploitation et la détection d'incidents plus graves.

Dans les réacteurs nucléaires BWR et PWR, l'eau sert à la fois de caloporteur et de modérateur : le titre en vapeur intervient non seulement dans l'hydraulique mais aussi dans la neutronique. Pour les surrégénérateurs il faut surtout éviter les entraînements de gaz par le sodium qui, en régime normal, est très loin des conditions d'ébullition.

Dans les réacteurs à eau, la puissance thermique extractible est limitée par le phénomène de "burn-out" c'est-à-dire l'assèchement de la gaine par une vaporisation trop intense du film liquide mouillant la paroi.

Ces conditions critiques d'assèchement doivent être prévues avec précision pour que dans les conditions normales d'exploitation du réacteur on n'atteigne jamais ces conditions.

Enfin, et c'est là la raison essentielle de l'étude approfondie des écoulements diphasiques, les incidents de fonctionnement exceptionnels conduisent le plus souvent à l'analyse du comportement du cœur du réacteur dans un écoulement diphasique dont les caractéristiques résultent du comportement de l'ensemble du système.

L'étude des accidents extrêmes n'a jamais été aussi poussée par le passé, même dans des activités industrielles de risque comparable ; aussi découvrons-nous peu à peu les diverses méthodes et leurs limitations dans l'analyse des accidents de très faible probabilité.

A partir du moment où on accepte de s'éloigner des conditions normales de fonctionnement, on franchit les limites technologiques qui justement imposaient ces conditions. Dans les machines, les limites sont mécaniques ou métallurgiques (limites élastiques des métaux, températures de transformation, d'oxydation rapide, ou de fusion, et...) ; au-delà il faut décrire l'évolution du système avec ses déformations, ses ruptures, et le cas échéant concevoir, puis qualifier les systèmes de sauvegarde qui limiteront les dégâts à un niveau tolérable par la collectivité.

Dans la description de tels accidents hypothétiques, tel que l'accident de référence des réacteurs à eau (rupture totale et instantanée d'une canalisation du circuit primaire), on constate que les phénomènes thermohydrauliques sont ceux qu'il faut décrire avec le plus de réalisme possible car dans une situation très complexe et rapidement évolutive, le concept d'hypothèse pessimiste devient souvent inutilisable.

Après quelques démarches incertaines, la méthode actuellement retenue pour l'analyse des accidents

Figure 1. — Méthode d'analyse de sûreté.

repose sur une description aussi réaliste que possible des événements, la probabilité de chacun d'eux devant être précisée pour aboutir finalement à une évaluation quantifiée du risque.

On peut schématiser la méthode d'analyse par la figure 1 ; selon l'importance du problème posé, certaines étapes seront plus ou moins développées ou remplacées même par des approches totalement empiriques : du point de vue de l'utilisateur final, on comprend que tout ce qui se trouve trop en amont de ses préoccupations lui apparaisse inutilement long et coûteux, jusqu'au jour où s'étant contenté de tests globaux, il s'apercevra qu'il est incapable d'extrapoler au cas réel.

En conclusion de ces généralités, il me paraît donc souhaitable d'insister sur l'importance des programmes de recherches de base que l'on a facilement tendance à sacrifier dans une gestion par objectifs.

Les écoulements diphasiques dans les réacteurs nucléaires

Sans reprendre la description de ces écoulements déjà abordée maintes fois, nous allons essayer d'en montrer les progrès récents en distinguant :

- les écoulements en conduite, permanents ou lentement variables
- les écoulements en régime transitoire — Instabilités

- les phénomènes thermiques : ébullition et condensation
- les aspects théoriques.

Les écoulements permanents en conduite

Ils sont caractérisés pour un débit donné de chaque phase par la configuration d'écoulement, c'est-à-dire la répartition spatio-temporelle de la probabilité de présence de chaque phase.

La prévision des pertes de pression est actuellement assez satisfaisante ainsi que la prévision du taux de présence moyen dans une section, ceci pour des géométries simples et des écoulements "stables" ($L/D > 100$) à vitesse modérée.

Il reste des progrès à faire :

- sur les géométries complexes : écoulement parallèlement ou transversalement à des barreaux par exemple
- sur les conduites courtes comprenant des singularités
- sur la description fine de l'écoulement : fluctuations spatio-temporelles de l'écoulement dues par exemple à une configuration à bouchons
- sur les écoulements à contre-courant dans des géométries complexes ou avec des effets transversaux importants.

Les écoulements transitoires

Dans un écoulement en évolution rapide, les deux phases n'ont pas spontanément la configuration du régime permanent ; les écarts de vitesses entre elles peuvent être très élevés et varier rapidement. On peut y rencontrer des phénomènes analogues aux phénomènes soniques dans les gaz.

De tels comportements commencent à être correctement modélisés dans le domaine correspondant à la dépressurisation des circuits primaires des réacteurs à eau (155 bars à 5 bars).

De nombreux types d'instabilités en écoulement diphasique ont été répertoriés, toutefois les mécanismes intervenant pour écrêter les oscillations non linéaires ne sont pas encore clairement explicités.

Phénomènes thermiques

L'ébullition a fait l'objet de milliers de publications et seules de nouvelles techniques de mesure ou l'extension à des fluides peu courants peut apporter des résultats nouveaux. Qualitativement les phénomènes sont élucidés, mais les aspects quantitatifs relèvent toujours d'une approche empirique. En régime transitoire rapide le déséquilibre thermique à la vaporisation est encore mal prévu ; en particulier la nucléation dans les liquides surchauffés ou sous tension reste un domaine de recherche pour la physique fine des liquides en contact avec des particules ou des parois.

Les explosions thermiques, rencontrées dans diverses conditions (volcans sous-marins, sidérurgie, gaz liquéfiés, accidents nucléaires hypothétiques) sont un exemple de phénomène thermique rapide (1/100 de seconde et moins) où les phénomènes hydrodynamiques et thermiques avec déséquilibre important sont forte-

ment couplés : l'étude du transfert de chaleur entre un corps chaud et un corps froid avec vaporisation et condensation rapides a bien progressé mais la modélisation complète n'est pas achevée : notamment les phénomènes de propagation (détonation thermique) ne sont pas encore analysés.

La condensation a été moins étudiée que l'ébullition. Sur une paroi froide, la formation d'un film de condensat, ou exceptionnellement de gouttes séparées a été bien étudiée, encore que les coefficients d'échange en régime transitoire soient encore mal prévus.

La condensation d'un jet de vapeur dans un liquide froid donne lieu à des instabilités très brutales encore mal modélisées.

Les aspects théoriques

Un gros effort d'écriture correcte des équations de conservation sous diverses formes moyennées a été fourni et est satisfaisant pour les écoulements unidimensionnels. Les lois d'interaction entre phases ont besoin d'être mieux exprimées pour obtenir des systèmes cohérents capables de décrire correctement les transitoires rapides. Un effort reste à faire pour la théorie des propagations, les notions de choc et d'écoulement supercritique.

Les écoulements bi et tridimensionnels ont été peu abordés ; en régime permanent on peut se contenter d'approches empiriques, mais en transitoire, le sujet n'est pas encore abordé. On peut notamment souligner l'insuffisance des travaux théoriques sur les écoulements diphasiques dans les tuyaux courbes (coudes, pompes, séparateurs, etc...)

Retombées industrielles non nucléaires

Comme indiqué sur la figure 1., c'est par les études effectuées en amont des recherches les plus appliquées que l'on trouve un fond commun à de multiples applications qui nécessiteront elles-mêmes des recherches particulières coûteuses.

La déception et l'envie de visiteurs, industriels ou autres, dans un centre de recherches nucléaires vient du refus de reconnaître ce fait : c'est qu'il faut payer cher pour valoriser les compétences existantes d'une équipe en dehors de son domaine prioritaire d'activités. Cela explique aussi la sous-évaluation que font les utilisateurs des connaissances qu'ils ont glanées ici ou là.

Pour en revenir aux écoulements diphasiques, on peut aujourd'hui considérer que le transfert de connaissance entre le nucléaire et les autres domaines commence à se faire : des cours sur ce thème ont débuté depuis quelques années dans quelques écoles d'ingénieurs en France ; des livres, pas toujours bien utilisables, commencent à paraître. Certaines équipes de recherche nucléaire se sont partiellement ou presque totalement diversifiées (Centre de Harwell au Royaume Uni, notre laboratoire de Grenoble a 20 % de recherches non nucléaires).

Les domaines rapidement touchés par ce transfert sont ceux en expansion où on rencontre des industriels dynamiques : après le dessalement d'eau de mer (évapo-

rateurs et condenseurs à faible écart de température), on aborde maintenant le domaine des économies d'énergie et des énergies renouvelables où les équipements thermiques (et souvent diphasiques) représentent souvent plus de la moitié de l'investissement.

Les procédés de refroidissement des machines ont profité de la meilleure connaissance des phénomènes de vaporisation : trempe, refroidissement par pulvérisation, utilisation de caloducs.

Dans le proche futur, les études d'impact des installations industrielles auront recours aux méthodes et à certaines analyses développées pour les réacteurs nucléaires : en particulier les phénomènes associés à des dépressurisations accidentelles peuvent être étudiés en utilisant les codes de calculs et certains modèles développés pour les réacteurs.

Evolution des recherches pour les besoins nucléaires

En ce qui concerne les écoulements diphasiques, les connaissances actuelles permettent une assez bonne prévision des performances normales d'un réacteur en ayant recours à de très nombreuses formulations empiriques, qui, à chaque modification du réacteur, doivent être réexaminées et souvent confirmées par de nouveaux essais. Au stade actuel des études de sûreté, on peut prévoir que les essais globaux en cours montreront le conservatisme des prévisions, mais la transposition quantitative aux réacteurs nucléaires restera encore longtemps délicate, tant que des modèles plus physiques n'auront pas été inventés. On a jusqu'à présent peu étudié en détail les incidents et les petits accidents (petites brèches dans les PWR par exemple) et il est certain que dans ce domaine, il y a beaucoup à faire pour améliorer l'exploitation des réacteurs.

Enfin on ne peut que souligner une fois de plus le sous-développement des connaissances de base pour la conception de ce qu'on appelle les appareils conventionnels tels que les générateurs de vapeur avec leurs séparateurs et sécheurs, les surchauffeurs, les condenseurs, et les turbines à fort taux d'humidité ; sans parler de tous les accessoires tels que soupapes, vannes dont le fonctionnement en diphasique doit être prévu dès qu'il peut se produire lors d'incidents.

On peut tenter d'énumérer les thèmes où il serait souhaitable d'améliorer nos connaissances :

- *Similitude* : les méthodes anciennes de l'analyse dimensionnelle doivent être revues avant d'être utilisables en diphasique car le nombre de paramètres y étant très élevé, il faut établir une hiérarchie entre eux en fonction du ou des phénomènes étudiés. Les changements de fluide ou d'échelle géométrique reposeront de plus en plus sur des modèles numériques correctement validés.
- *Instrumentation* : des progrès sont encore possibles sur les sondes pour les rendre utilisables dans toutes les conditions réelles rencontrées. Le traitement des mesures, spécialement pour les fluctuations et les transitoires doit être perfectionné pour être utilisable dans les modèles physiques.

— *Analyse théorique :*

- Les écoulements transitoires méritent encore des développements théoriques (propagations, chocs).
- Les descriptions à deux ou trois dimensions devraient pouvoir se développer compte tenu des performances accrues des ordinateurs.
- Les modèles physiques des diverses configurations d'écoulement et de leur comportement thermique sont encore très insuffisants spécialement pour les écoulements annulaires dispersés (films liquides pariétaux + gouttes) dans des géométries pouvant être très complexes : les phénomènes d'entraînement de gouttelettes à partir du film ou à l'inverse de dépôt de gouttelettes sont encore mal modélisés.

Nous avons déjà dit combien la condensation par contact direct liquide-vapeur loin des parois était importante dans l'analyse de certains accidents et jusqu'à

présent mal prise en compte, ce qui conduit à surestimer les effets mécaniques des vaporisations brutales.

Après ce survol, certainement trop superficiel, je ne puis que renvoyer aux publications les plus récentes citées ci-après.

Bibliographie

- 6^e Congrès International sur le transfert de chaleur (Toronto, Août 1978). — Conférences invitées (Keynote papers) KS 9-11-13-15-17-21 (Sûreté des réacteurs nucléaires) -23-25-26-28-29-31-33 et nombreux mémoires généraux dans les sessions spécialisées.
- BANKOFF S.G. — Topics in two-phase heat transfer and flow, *Winter Annual Meeting of ASME* (San Francisco, Déc. 1978), ASME, 1978.
- DELHAYE J.M., GIOT M. et RIETHMULLER M.L. — *Thermo-hydraulics of two-phase systems applied to industrial design and nuclear engineering*. Editions Hemisphere Mc Graw Hill, 1979.

Discussion

Président : M. le Professeur FORTIER

M. le Président. — Je remercie M. SEMERIA et j'ouvre la discussion.

M. FITREMANN. — Vous venez d'exposer le problème des recherches théoriques ou expérimentales. Il y en a un très grand nombre.

Est-ce qu'il y a des problèmes plus urgents que d'autres ? ... Comment peut-on faire le tri, puisqu'on ne peut pas traiter tous les problèmes en même temps ?

M. SEMERIA. — Faisons l'hypothèse que l'accident de référence soit toujours à la mode dans 5 ans. Je crois que les problèmes les plus importants concernent la phase "basse pression" : le renoyage du cœur, les écoulements à contre-courant à deux et trois dimensions, avec condensation directe.

M. MONDIN. — Je voudrais apporter un élément de réponse un peu philosophique. M. FITREMANN a posé la question de l'ordre d'urgence des problèmes à résoudre.

Or il faut savoir que depuis une quinzaine d'années il y a eu énormément de contrats passés avec l'industrie, les organismes nationaux et l'Université en Amérique et, un peu moins, en Angleterre. En France cela s'est très peu pratiqué.

Alors pourquoi, à la suite de cet énorme volume de recherches, les connaissances fondamentales n'ont-elles pas mieux progressé que ce que l'on constate. Simplement parce que ces contrats étaient à court terme. Les résultats étaient demandés à très bref délai. Or les problèmes sont si complexes qu'il faut laisser désormais aux équipes de fondamentalistes le temps de la réflexion, il ne faut pas leur imposer des délais.

Si une stratégie de recherche à long terme avait été adoptée dès les années 1960 on ne connaîtrait pas la situation actuelle, caractérisée par un retard considérable dans les connaissances de base. Je crois que c'est un aspect qu'il était extrêmement important de souligner.

Cela ne veut pas dire tout de même qu'il n'y ait pas de problèmes semi-fondamentaux pour lesquels il y a une certaine urgence ; cela ne veut pas dire non plus que des équipes universitaires ne peuvent pas parvenir à les résoudre. Mais il ne faudrait

pas qu'un souci d'urgence fasse laisser au second plan ou renvoyer aux calendes la réflexion en profondeur.

M. JAFFRIN. — Chacun s'accorde à reconnaître que la longévité du nucléaire est de quelques dizaines d'années. Alors si la recherche fondamentale doit s'étaler sur 10 ou 20 ans, son efficacité risque d'en être fort diminuée.

Est-ce que la solution qui consiste à faire des cotes mal taillées avec la recherche appliquée n'est pas finalement, d'un point de vue industriel, la bonne méthode ?

M. MONDIN. — De toute manière la recherche des cotes mal taillées est indispensable. D'ailleurs on est en plein dedans, et il n'est pas question de la supprimer.

Vous dites que le nucléaire n'en a que pour quelques dizaines d'années : je vous laisse la responsabilité de cette affirmation. Je pense qu'avec les surgénérateurs nous avons du nucléaire pour au moins un siècle.

M. SEMERIA. — Il est difficile de demander à des industriels d'avoir des visions à 30 ans ; ils ont déjà de la peine à avoir une vision à 5 ou 10 ans, et cela se comprend.

Les études fondamentales sont celles qui ont le maximum de retombées ; donc de toute façon ce ne sera pas perdu. Les études appliquées et les tests globaux se poursuivent avec une ampleur fonction des moyens financiers disponibles.

M. le Président. — Personnellement je pense qu'on peut mener parallèlement la recherche appliquée et la recherche fondamentale, cette dernière pouvant progresser beaucoup plus lentement. Il est bien entendu que pour les applications immédiates on est obligé de faire de la recherche appliquée.

Actuellement les laboratoires universitaires hésitent à trop se lancer dans la recherche fondamentale dans le domaine du diphasique, simplement parce qu'ils craignent de ne pas arriver à des résultats dans un temps relativement limité.

Les conditions de déroulement de leur carrière obligent les Universitaires à mener un travail dans un temps relativement limité. Je pense que c'est la raison pour laquelle beaucoup

d'études fondamentales dans le domaine du diphasique ne se font pas.

Personnellement je me souviens avoir beaucoup hésité à lancer mes élèves dans le domaine du diphasique parce que j'avais peur qu'ils ne réussissent pas à sortir une thèse dans un temps relativement raisonnable.

M. JAFFRIN. — Je voudrais revenir au problème de la similitude que vous avez soulevé et qui est très difficile s'agissant des fluides diphasiques.

Pour les fluides monophasiques on sait qu'on peut parfois remplacer un fluide par un gaz ou inversement ; et si l'on voulait par exemple modéliser des expériences faites à haute pression, donc dans le cas où la densité du gaz est voisine de celle du liquide, est-ce qu'on pourrait employer — au lieu du mélange

diphasique "gaz-liquide", — un mélange de deux liquides ?

M. SEMERIA. — "Forte pression", c'est vraiment très près de la pression critique, parce qu'à 150 bars, le liquide a encore une masse spécifique 6 fois plus élevée que celle de la vapeur.

M. JAFFRIN. — On peut trouver des liquides de rapport de densité 2 à 3.

Quelqu'un. — La viscosité intervient ?

M. JAFFRIN. — Il y a aussi un problème de tension de surface ?

M. SEMERIA. — Cela dépend des configurations d'écoulement. La similitude avec deux liquides serait à tenter. Il faudrait la vérifier dans des cas relativement simples où l'on a des résultats à la fois en "liquide-gaz" et en "deux liquides".

Abstract

Fresh knowledge from nuclear thermohydraulics research

In the introduction, it is explained why the two-phase flows are so important in nuclear engineering specially for the water moderated reactors (BWR and PWR).

The geometry of the core (bundles), the power and flow distribution are so complex that detailed thermohydraulics computer codes are needed for having a good prediction of the behavior of the core in normal and accidental conditions.

For very low probability accidents, the system is beyond the normal technological limits and the thermohydraulics phenomena are controlling the evolution and must be predicted as realistically as possible.

The method for safety analysis is illustrated by the figure 1 : it must be noted that the basic research is far upstream of the reactor application, but cannot be neglected if a credible extrapolation from the tests to the reactor is needed.

In part 2, the present state of the knowledge in two-phase flows is summarized and the needs for a better understanding

are listed for

- flows in pipes
- transient flows
- thermal phenomena
- theoretical aspects.

In part 3, the author shows how it is possible to use the methods and knowledge obtained in nuclear field for non-nuclear applications.

In part 4, the evolution of the needs for research in nuclear field is indicated : much more emphasis must be given to the incidental behavior of the reactors and to the small accidents. A better knowledge is also needed on the behavior of the different components in such conditions.

The most important topics for developing useful basic research concern similarity, instrumentation, transient flows, multidimensionnal flows, thermal phenomena specially direct condensation.