

5.2. Phénomènes pouvant entraîner une défaillance précoce de l'enceinte

5.2.1. Échauffement direct des gaz de l'enceinte

5.2.1.1. Introduction

Le phénomène d'échauffement direct de l'enceinte (DCH⁴) est illustré schématiquement sur la figure 5.12. Lors d'un accident de fusion du cœur d'un REP, un bain de corium, mélange d'oxydes d'uranium et de zirconium, de métaux non oxydés (zirconium et acier) et de produits de fission divers, peut se former au fond de la cuve. Si une défaillance du fond de la cuve intervient dans cette situation, du corium est éjecté dans le puits de cuve avec de la vapeur d'eau, éventuellement de l'hydrogène provenant du circuit primaire et de l'eau liquide (qui peut encore être présente au fond de la cuve lors de sa défaillance). En fonction de la pression dans la cuve au moment de sa défaillance, l'éjection induit une fragmentation plus ou moins fine du corium et une dispersion plus ou moins importante des fragments en dehors du puits de cuve. Cette dispersion de corium fragmenté conduit à des échanges thermiques très efficaces entre le corium et les gaz ainsi qu'à une oxydation des composantes métalliques du corium, produisant de l'hydrogène. L'oxydation se fait en majeure partie par la vapeur d'eau présente dans le circuit primaire, mais également par la vapeur d'eau contenue dans l'enceinte. Les températures atteintes par les gaz de l'atmosphère de l'enceinte et la présence de particules de corium très chaudes déclenchent alors une combustion de l'hydrogène créé par oxydation du corium dispersé. Cette combustion pourrait provoquer celle de l'hydrogène déjà présent dans l'enceinte au moment de la défaillance de la cuve si sa concentration est suffisamment élevée. Ces phénomènes provoquent un échauffement et une montée en pression rapides (en quelques secondes) de l'atmosphère de l'enceinte avec pour conséquence possible une défaillance de l'étanchéité ou un endommagement de l'enceinte de confinement. Par ailleurs, les chargements appliqués directement à la cuve (poussée due aux gaz et aux liquides sortant de la cuve, pression dans le puits de cuve) peuvent entraîner un déplacement plus ou moins significatif de la cuve elle-même, provoquant éventuellement un ébranlement des structures et des circuits primaire et secondaire, avec un risque de bipasse de l'enceinte en cas de brèches induites à l'extérieur de l'enceinte de confinement sur un circuit connecté au circuit primaire et non isolé de ce dernier.

Le risque de défaillance de l'enceinte de confinement lié à l'échauffement direct des gaz de l'enceinte est apprécié, d'un point de vue technique, en supposant l'absence d'eau dans le puits de cuve lors de la défaillance de la cuve. Des essais ont en effet montré que le risque de combustion est plus élevé en l'absence d'eau dans le puits de cuve. Dans les cas où de l'eau est présente en grande quantité dans le puits de cuve, le phénomène essentiel pouvant menacer l'intégrité de l'enceinte de confinement est l'explosion de vapeur qui pourrait survenir lors de la rupture de la cuve lorsque du corium très chaud entre en contact avec l'eau dans le puits de cuve ; l'explosion de vapeur est traitée au paragraphe 5.2.3. Pour les réacteurs en exploitation en France, l'absence d'eau dans le

4. On utilise en général l'acronyme anglais DCH pour *Direct Containment Heating*.

puits de cuve lors de la rupture de la cuve correspond à une situation où le système d'aspersion dans l'enceinte (système EAS) n'a pas fonctionné avant la rupture de la cuve. Pour les réacteurs de type EPR, l'objectif d'« élimination pratique » du risque d'explosion de vapeur dans le puits de cuve impose que le puits de cuve soit maintenu sec avant la rupture de la cuve.

5.2.1.2. Phénomènes physiques mis en jeu

Si les phénomènes intervenant lors d'un DCH sont qualitativement bien compris, les mécanismes physiques détaillés correspondants et leur importance sur la montée en pression des gaz de l'enceinte de confinement comportent de nombreuses incertitudes [1, 7]. L'ampleur et les conséquences d'un DCH dépendent fortement de la géométrie du réacteur et une approche expérimentale a longtemps été privilégiée, accompagnée du développement de modèles simplifiés pour l'interprétation des essais et l'extrapolation au cas d'un réacteur de puissance. Cependant, la nature particulièrement violente du phénomène et les conditions très spécifiques des accidents de fusion du cœur d'un réacteur nucléaire obligent à des simplifications dans les expériences (géométrie, matériaux) ainsi qu'à une instrumentation modeste. Les principales informations récoltées lors d'expériences sont globales (taux de dispersion du corium, pic de pression), présentent de fortes incertitudes (taux d'oxydation du corium et combustion de l'hydrogène) et souvent obtenues par des analyses réalisées après essai (dispersion, granulométrie). Avec les développements récents d'outils de simulation et des capacités de calcul, certains phénomènes peuvent maintenant être appréciés plus finement. Cependant, le couplage complet de tous ces phénomènes dans une modélisation de type CFD, incluant la dispersion, l'oxydation des éléments métalliques, la combustion de l'hydrogène et la présence d'eau, n'est pas réalisé à ce jour et semble difficilement envisageable à courte échéance.

La figure 5.12 présente une vue schématique des phénomènes et des risques associés. À l'instant de sa défaillance, la cuve contient, hors les éléments de structure restant en place, un mélange de vapeur d'eau et d'hydrogène, du corium au fond de la cuve et éventuellement de l'eau, le tout soumis à une pression pouvant aller de la pression de fonctionnement du circuit primaire (environ 160 bars) à une pression voisine de celle de l'enceinte de confinement (quelques bars) si le circuit primaire est totalement dépressurisé. L'éjection sous pression dans le puits de cuve du corium et de la vapeur d'eau, avec éventuellement de l'hydrogène, comporte différentes phases (jet liquide monophasique de corium, puis jet diphasique de corium et de gaz et jet gazeux). Les caractéristiques de l'éjection dépendent bien sûr des dimensions, de la forme et de la localisation de la brèche dans la paroi de la cuve. Les caractéristiques de la brèche restent à ce jour difficiles à prédire et sont donc incertaines (§ 5.1.3).

L'éjection sous pression fragmente le corium en gouttes liquides qui vont s'oxyder rapidement en produisant de l'hydrogène. Par la suite, un écoulement de vapeur d'eau, d'hydrogène et de corium s'établit dans le puits de cuve. Cet écoulement est très complexe, fortement influencé par la géométrie du puits de cuve et est le siège de différents phénomènes : projection de corium sur les parois du puits de cuve et formation d'un film liquide le long de ces parois, entraînement et fragmentation du film liquide par les gaz.

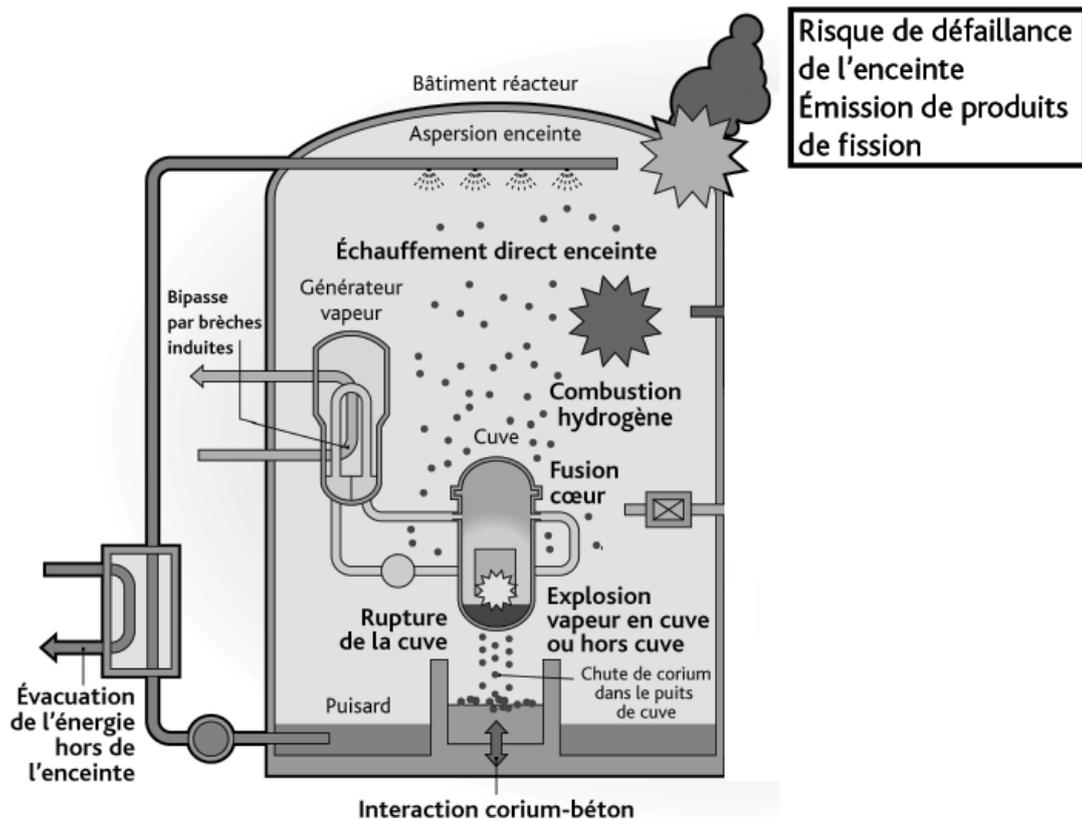


Figure 5.12. Représentation schématique des phénomènes physiques se produisant lors de l'échauffement direct des gaz de l'enceinte.

Ces divers phénomènes conduisent à une montée en pression des gaz dans le puits de cuve par rapport à l'enceinte. Il en résulte qu'une partie du corium est entraînée dans les locaux attenants au puits de cuve et vers le dôme de l'enceinte de confinement alors qu'une autre partie reste piégée dans le puits de cuve. Durant cette phase d'entraînement, le gaz et les gouttes de corium interagissent thermiquement et chimiquement. En conséquence, la température des gaz et leur pression dans le puits de cuve augmentent fortement. Cependant, il ne peut pas se produire de combustion d'hydrogène dans le puits de cuve, l'atmosphère de celui-ci étant pauvre en oxygène (chassé par les gaz sortant de la cuve). L'arrivée dans l'enceinte de gaz chauds et de particules de corium contribue à l'échauffement et à la montée rapide en pression de son atmosphère. Cette montée en pression est d'autant plus importante que la masse de corium dispersée est grande et que sa fragmentation est fine. La répartition du corium dans les différents locaux de l'enceinte et la durée de l'écoulement ont également une influence sur l'ampleur de cette montée en pression. De plus, l'arrivée dans l'enceinte de gaz et de particules de corium très chauds va enflammer tout ou partie de l'hydrogène. Cette combustion est très complexe car elle combine des flammes turbulentes de diffusion (dans la région de l'enceinte où le jet sortant du puits de cuve se propage) et des flammes de prémélange (dans les régions de l'enceinte extérieures au jet). La combustion de l'hydrogène apporte, dans la plupart des situations, la contribution la plus importante à l'échauffement et à la mise en pression des gaz de l'enceinte.

Il est important de noter que le phénomène de DCH, tel qu'il est décrit ci-dessus et couramment modélisé, est cependant simplifié par rapport à la réalité pour différentes raisons ; en particulier :

- la présence d'eau, tant dans la cuve que dans le puits de cuve, affecte le phénomène de diverses manières aux effets opposés. L'eau présente dans la cuve, qui subit une forte dépressurisation lors de l'ouverture de la brèche, se vaporise très rapidement (« flash »). Cela induit, d'une part une dépressurisation plus lente (donc un temps accru pour la dispersion du corium), d'autre part une poussée plus importante sur la cuve. Cette eau ne va cependant pas entièrement se vaporiser et l'eau présente dans le puits de cuve va elle aussi se disperser et donc, d'une part agir comme un puits de chaleur, d'autre part perturber voire inhiber la combustion. Il est donc difficile de savoir si globalement la présence d'eau a un effet bénéfique ou non ;
- sous l'effet de la pression dans le puits de cuve, celle-ci peut se déplacer et modifier ainsi la configuration géométrique, fermer des chemins pour les écoulements ou en ouvrir d'autres.

Techniquement, le problème est donc très difficile à modéliser avec précision.

5.2.1.3. Programmes expérimentaux

La connaissance des phénomènes intervenant lors d'un DCH a été acquise principalement grâce à des programmes d'essais réalisés sur des maquettes reproduisant, à échelle réduite, les principales caractéristiques géométriques des réacteurs. Les différentes géométries étudiées sont présentées dans les paragraphes qui suivent ; les résultats des essais sont discutés ensuite en fonction de la température, des matériaux utilisés pour simuler le corium et de la présence d'eau dans le puits de cuve.

À la fin des années 1980 et au début des années 1990, de nombreux essais ont été réalisés dans des maquettes plus ou moins précises de réacteurs américains à des échelles variant de $1/40^e$ à $1/6^e$ [1-4]. La géométrie la plus étudiée et la plus documentée concerne le réacteur de ZION. Toutefois, dans la maquette du réacteur de ZION construite à cet effet (installation Surtsey, Sandia National Laboratory, États-Unis), la liaison (voie de passage des gaz et du corium) entre le puits de cuve et le dôme de l'enceinte de confinement *via* le passage annulaire autour de la cuve n'était pas représentée (figure 5.13). Un tunnel d'instrumentation représentait les liaisons entre le puits de cuve et les compartiments intermédiaires de l'enceinte de confinement. Le dispositif simulant la cuve était de plus placé à l'extérieur de l'enceinte. Les essais intégraux ont été réalisés à des pressions élevées, de l'ordre de 60 bars.

La deuxième géométrie étudiée a été celle du réacteur de SURRY. Certains des essais correspondants tenaient compte de la liaison directe existant entre le puits de cuve et le dôme de l'enceinte de confinement *via* le passage annulaire autour de la cuve et de la présence du calorifuge autour de la cuve. Le nombre d'expériences réalisées avec cette géométrie a été restreint. Enfin, une troisième géométrie, celle du réacteur de CALVERT CLIFFS, a été étudiée ; dans cette géométrie, il existe un

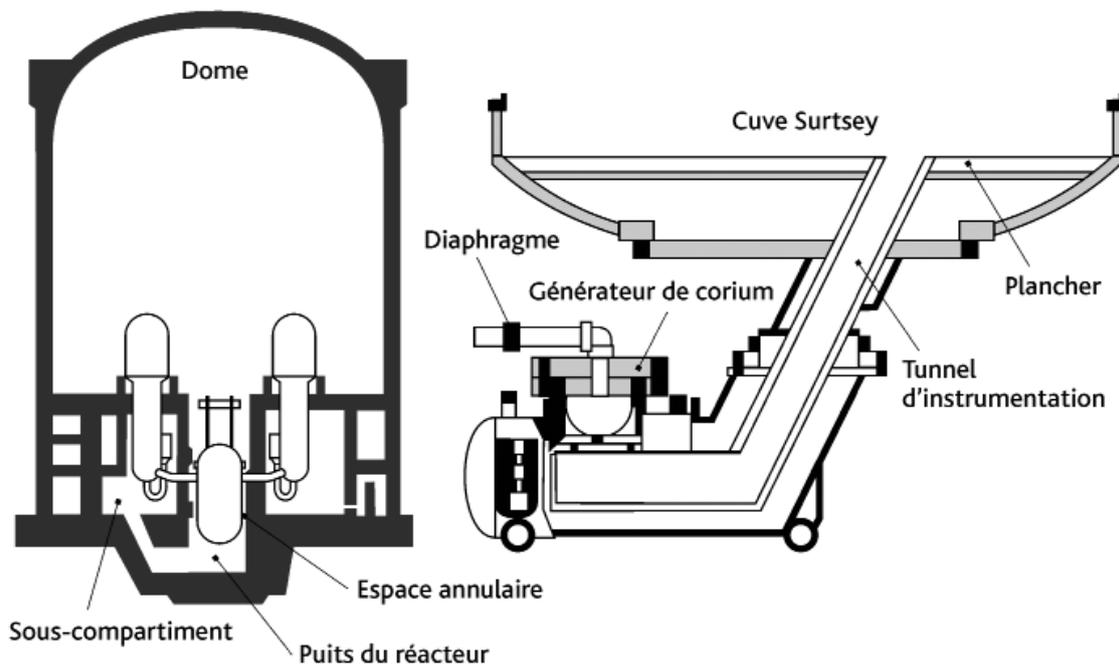


Figure 5.13. Schéma du réacteur de ZION (à gauche) et sa représentation dans les expériences réalisées dans l'installation Surtsey à Sandia National Laboratory (à droite) [1].

passage annulaire plus important autour de la cuve, dont la configuration est plus proche de celle des réacteurs français.

En 1997, une campagne d'essais réalisée par KAERI (Corée du Sud) pour le compte de l'IRSN (IPSN à l'époque) a permis d'étudier pour la première fois, mais partiellement (essais à froid uniquement), le phénomène de DCH dans une géométrie proche de celle d'un réacteur français de 900 MWe à l'échelle 1/20^e.

Plus récemment, des essais ont été menés dans les installations DISCO, à FzK (Forschungszentrum Karlsruhe, maintenant KIT pour Karlsruhe Institut für Technologie) en Allemagne [5, 7]. Une première installation, dite DISCO-C, a permis la réalisation de tests à froid, tandis qu'une autre, DISCO-H, était dédiée à des essais intégraux, permettant de simuler l'ensemble des phénomènes thermiques et chimiques. Initialement construites pour des études relatives au réacteur EPR (échelle 1/18^e), les installations DISCO ont par la suite été modifiées pour permettre l'étude de la géométrie des réacteurs de 1 300 MWe P'4 (en collaboration avec l'IPSN, figure 5.14), pour celle des réacteurs KONVOI (réacteurs allemands présentant une géométrie proche de celle des réacteurs EPR) et pour celle des réacteurs VVER-1000 (un seul test dans DISCO-H). La particularité des géométries EPR et KONVOI est la très petite taille du puits de cuve qui favorise la dispersion de corium hors du puits de cuve, ce d'autant plus qu'il n'y a pas de couloir d'accès ; pour les réacteurs de 900 MWe et de 1 300 MWe français (figure 5.14), le puits de cuve est beaucoup plus profond et il existe trois passages de sortie possible du puits de cuve : vers la partie supérieure de l'enceinte (dôme), vers les compartiments en bas de l'enceinte et vers le couloir d'accès au puits de cuve. Les tests DISCO ont été limités à des pressions dans la cuve inférieures à 25 bars.

► Les essais en matériaux simulants à basse température (aspects dynamiques)

Ces essais visent à établir des corrélations d'entraînement du simulant vers les compartiments adjacents au puits de cuve et vers l'enceinte de confinement en fonction des paramètres de l'expérience, qui sont généralement la taille de la brèche au fond de la cuve, la pression dans la cuve au moment de sa défaillance, les propriétés physiques du matériau simulant le corium et celles du gaz porteur sortant de la cuve. Divers simulants ont été utilisés pour ce type d'essais : de l'eau (figure 5.14), des huiles, du métal de Wood (alliage eutectique composé de bismuth, de plomb, d'étain et de cadmium) et du gallium. Ces deux derniers simulants ont l'avantage de posséder des propriétés (densité, viscosité, tension de surface) proches de celles d'un corium tandis que l'eau est un piètre simulant (propriétés physiques très éloignées de celles d'un corium et existence de changements de phase – évaporation ou gel – non représentatifs).

Avec une géométrie représentative des réacteurs français de 900 MWe, les essais de KAERI ont montré que, lorsque la pression dans la cuve est suffisamment élevée, jusqu'à 80 % du simulant peut être entraîné dans l'espace annulaire autour de la cuve et dans le passage vers le dôme de l'enceinte de confinement, puis relâché dans l'enceinte de confinement. Dans cette géométrie, le passage vers les compartiments intermédiaires de l'enceinte de confinement est en fait très réduit et la majeure partie du combustible est éjectée dans l'enceinte. Pour les réacteurs de 1 300 MWe, la fraction entraînée dans l'espace annulaire est plus faible (60 %), une forte proportion du combustible (~ 30 %) étant piégée dans le couloir d'accès au puits de cuve. Sur les 60 %, environ 20 % sont

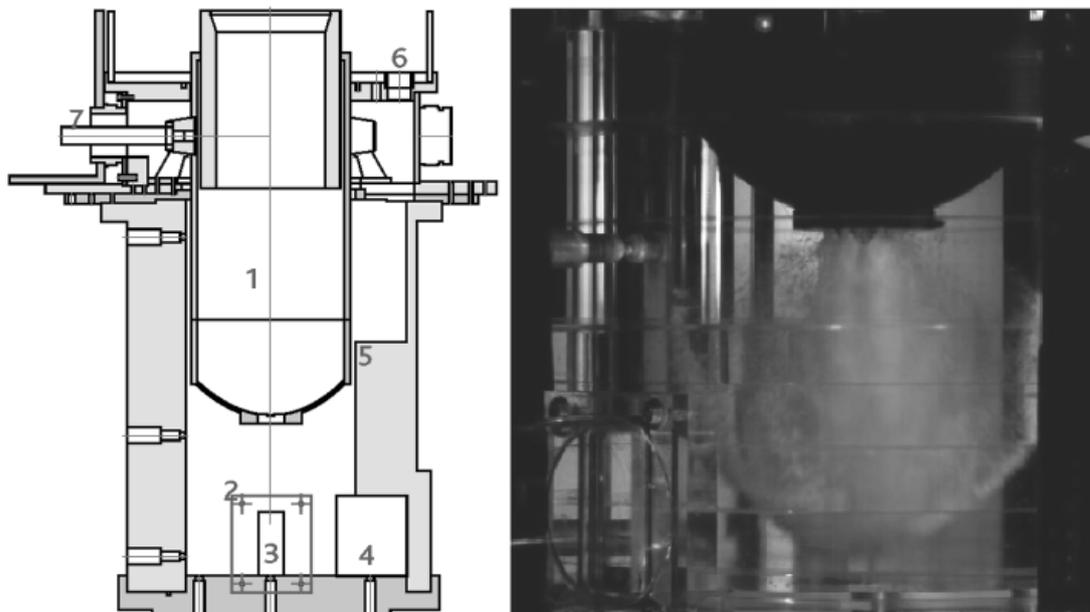


Figure 5.14. Représentation de la géométrie du puits de cuve d'un réacteur P'4 pour les essais DISCO-C : 1-cuve, 2-puits de cuve, 3-couloir d'accès au puits de cuve, 4-niche, 5-passage annulaire, 6-sortie vers le dôme de l'enceinte de confinement, 7-sortie vers les compartiments intermédiaires de l'enceinte de confinement. À droite, photographie d'une éjection d'eau sous pression.

entraînés directement vers le dôme de l'enceinte, le restant étant entraîné dans les compartiments intermédiaires de l'enceinte.

La géométrie du puits de cuve du réacteur EPR est très différente. Du fait du très faible volume du puits de cuve, la quasi-totalité du corium peut être entraînée dans l'enceinte de confinement, et ce pour des pressions très basses dans la cuve, de l'ordre de quelques bars. Depuis la réalisation des essais DISCO consacrés au réacteur EPR, la géométrie du puits de cuve du réacteur EPR a évolué et ne comporte plus de passage direct entre le puits de cuve et l'enceinte ; le corium éjecté se trouverait donc entraîné en grande partie vers les compartiments intermédiaires de l'enceinte abritant les équipements (générateurs de vapeur, pressuriseur). L'effet de divers modes de défaillance du fond de la cuve (brèche au centre du fond de la cuve, brèche latérale ou décalotage partiel du fond de la cuve) sur la dynamique d'éjection du simulant a également été étudié lors des essais relatifs au réacteur EPR [6] ; ces essais ont montré que les masses dispersées sont plus importantes pour les brèches centrées.

► Les essais intégraux à haute température

Ces essais permettent d'étudier, outre les aspects dynamiques, les échanges thermiques et les interactions chimiques. Le tableau 5.3 fournit la liste des tests intégraux réalisés jusqu'en 2010. Le simulant qui a été le plus utilisé pour ce type d'essais est un mélange de fer et d'alumine (Al_2O_3) résultant d'une réaction thermitique⁵, additionné éventuellement de petites quantités de chrome et de zirconium. Quelques essais ont été réalisés également avec une composition plus proche d'un corium réel (contenant un mélange $\text{UO}_2 + \text{ZrO}_2$). Les principales différences entre la thermitite $\text{Fe-Al}_2\text{O}_3$ et le corium sont la densité (environ $4\,000\text{ kg/m}^3$ contre $8\,000\text{ kg/m}^3$) et la composition en métaux oxydables (Fe contre $\text{Zr} + \text{Fe} + \text{Cr}$). Les résultats des essais réalisés avec de la thermitite ne peuvent donc pas être extrapolés de manière directe au cas d'un DCH. Un nombre important d'essais a été réalisé aux États-Unis, principalement par les laboratoires de Sandia (SNL) et d'Argonne (ANL), pour trois types de géométrie (principalement la géométrie du réacteur ZION, celle du réacteur SURRY et celle du réacteur de CALVERT-CLIFFS) et des conditions expérimentales variées [1]. Ces essais ont été réalisés avec des pressions élevées dans la cuve, entre 60 et 120 bars : la dispersion du simulant et la montée en pression dans l'enceinte étaient donc élevées.

Pour la géométrie du réacteur de ZION, les divers essais (réalisés dans la maquette SURTSEY sans liaison directe entre le puits de cuve et le dôme de l'enceinte de confinement⁶) ont montré que les compartiments intermédiaires de l'enceinte de confinement retenaient 90 % du simulant et que la surpression dans l'enceinte était limitée, de l'ordre de 2,5 bars (figure 5.15). Sur la base de ces résultats, l'US NRC a estimé que, pour ce réacteur, le risque de défaillance de l'enceinte de confinement par DCH était nul [8].

5. La mise en présence d'un oxyde de fer et d'aluminium conduit à une réaction chimique très exothermique au cours de laquelle l'aluminium réduit l'oxyde de fer pour produire ce que l'on appelle la thermitite, mélange de fer et d'alumine Al_2O_3 ; l'élévation de température du mélange par la réaction conduit à sa fusion.
6. Il existe en réalité dans le réacteur une liaison entre le puits de cuve et le dôme mais elle a été négligée.

Les divers essais réalisés par la suite, dont ceux réalisés dans l'installation DISCO, suggèrent qu'en l'absence de combustion (atmosphère inerte de l'enceinte), le cloisonnement de l'enceinte par les compartiments jouerait un rôle important et que seule la fraction de simulant dispersée dans le dôme de l'enceinte de confinement participerait efficacement à l'échauffement de son atmosphère. En effet, l'équilibre thermique est atteint plus rapidement dans un petit volume, puisque le rapport volume de corium sur volume de gaz y est plus élevé et les gaz y sont donc plus rapidement chauffés.

Tableau 5.3. Principaux programmes expérimentaux relatifs à l'étude du DCH.

Série	Nombre d'essais	Échelle	Géométrie	ΔP (bars)	Matériau	$D_{\text{brèche}}^{(4)}$ (m)	Liaison directe vers le dôme	Eau
DCH/WC ⁽¹⁾	7	1/10	Zion	26 – 67	Fe-Al ₂ O ₃	0,4 – 1	Non	Puits
TDS/LFP ⁽¹⁾	13	1/10	Surry	25 – 40	Fe-Al ₂ O ₃ -Cr	0,4 – 0,9	Non	Non
IET-Zion ⁽¹⁾	9	1/10	Zion	60 – 70	Fe-Al ₂ O ₃ -Cr	0,4	Non	Puits
IET-Surry ⁽¹⁾	3	1/6	Surry	120	Fe-Al ₂ O ₃ -Cr	0,7 – 1	Selon essai ⁽⁵⁾	Puits
ANL-IET ⁽²⁾	6	1/40	Zion	57 – 67	Fe-Al ₂ O ₃ -Cr	0,4	Non	Puits
U ⁽²⁾	3	1/40	Zion	30 – 60	UO ₂ +ZrO ₂ + Zr-acier inoxydable	0,4	Non	Non
CE-CES ⁽¹⁾	7	1/10	Calvert Cliffs	40 – 80	Fe-Al ₂ O ₃	0,4 – 0,5	Oui	Cuve
DISCO-H ⁽³⁾	6	1/18	EPR	8 – 22	Fe-Al ₂ O ₃	0,5 – 1	Selon essai	Non
DISCO-FH ⁽³⁾	5	1/16	P'4	15 – 25	Fe-Al ₂ O ₃	0,5 – 1	Oui	Non
DISCO-KH ⁽³⁾	2	1/18	KONVOI	20 – 25	Fe-Al ₂ O ₃	1	Non	Non

⁽¹⁾Sandia NL, ⁽²⁾Argonne NL, ⁽³⁾Fzk, ⁽⁴⁾diamètre de la brèche de la cuve rapporté à l'échelle de la cuve des réacteurs étudiés, ⁽⁵⁾étude de l'effet du calorifuge selon qu'il reste en place ou non.

Les phénomènes chimiques d'oxydation et de combustion jouent un rôle fondamental dans le DCH. Les premiers essais étudiant l'effet de ces phénomènes sont les essais IET réalisés pour les géométries des réacteurs de ZION et de SURRY (dans la plupart des cas, sans liaison directe entre le puits de cuve et le dôme de l'enceinte). Lors de ces essais, la concentration initiale d'hydrogène dans l'enceinte était modérée, de l'ordre de 2 à 3 %. L'oxydation des métaux a toujours été très intense. Le taux de combustion de l'hydrogène a été de l'ordre de 70 %, ce qui a conduit à une augmentation de la pression dans l'enceinte d'un facteur 2 à 3 (figure 5.15, gauche).

Les essais DISCO-H ont confirmé ces observations expérimentales [7]. Ils ont de plus montré que l'oxydation ne se fait pas seulement avec la vapeur d'eau initialement présente dans la cuve, mais également avec la vapeur présente dans l'enceinte de confinement (cela n'avait pas pu être observé dans les essais IET réalisés sans liaison directe entre le puits de cuve et le dôme de l'enceinte). Les taux de combustion d'hydrogène observés lors de ces essais sont très importants, de l'ordre de 80 % pour des taux initiaux d'hydrogène de 5 à 6 %. Surtout, ils ont montré qu'il existe une relation

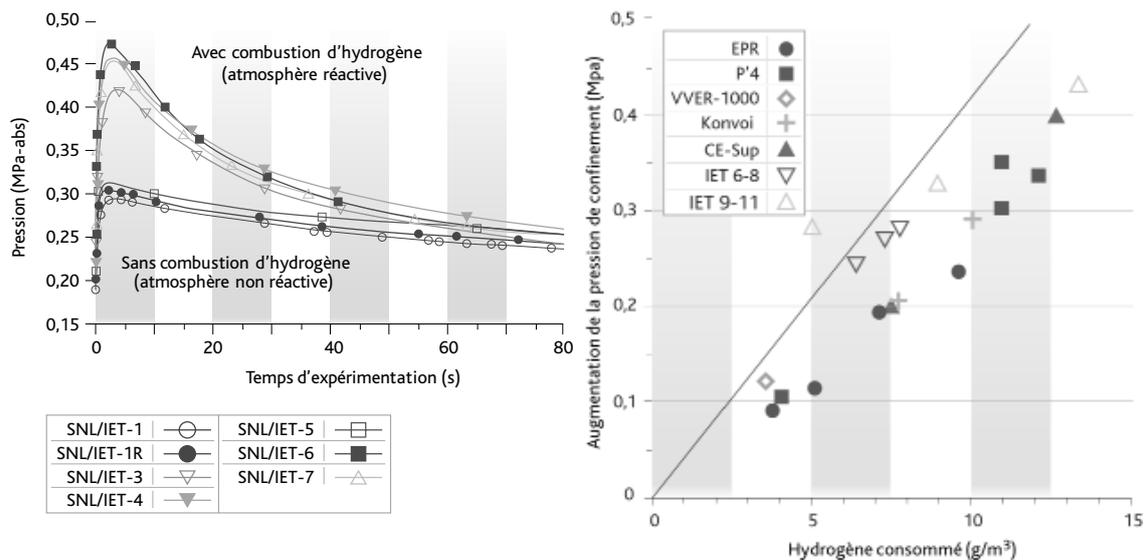


Figure 5.15. Influence de la combustion sur l'augmentation de pression dans l'enceinte de confinement. À gauche : comparaison de la montée en pression observée pour une atmosphère avec et sans combustion d'hydrogène lors des essais IET-ZION (Sandia NL) [1]. À droite : relation entre la montée en pression et la quantité d'hydrogène brûlé estimée (par unité de volume) pour une sélection d'essais DISCO (FzK), CE et IET (Sandia, IET6-8 : géométrie ZION, IET9-11 : géométrie SURRY) [7]. La droite représente les valeurs théoriques enveloppes de l'augmentation de pression liée à la combustion de l'hydrogène.

linéaire entre la montée en pression dans l'enceinte de confinement et la quantité d'hydrogène estimée participant à la combustion (figure 5.15, droite). Aussi, en cas de combustion importante d'hydrogène, les transferts thermiques entre le corium et le gaz jouent un rôle moins important dans le DCH. Ceci s'explique par le fait que le chauffage du gaz dû à la combustion limite les transferts thermiques entre les gouttes de corium et le gaz.

De plus, les essais DISCO réalisés avec les géométries des réacteurs EPR et des réacteurs de 1 300 MWe montrent que, en cas de combustion, l'effet du cloisonnement de l'enceinte de confinement est moins net. La combustion est elle-même moins sensible au cloisonnement pour des concentrations en hydrogène élevées (5 à 6 %). Par contre, lorsque la concentration initiale d'hydrogène est faible (moins de 3 %), la combustion se propage difficilement aux zones dans lesquelles le corium n'est pas entré.

► Les essais avec des matériaux réels

Après les essais IET mettant en œuvre de la thermite, trois essais similaires ont été réalisés avec, cette fois, un mélange d' UO_2 , de Zr, de ZrO_2 , de Fe et de Cr, dans l'installation COREXIT, maquette à l'échelle 1/40^e du réacteur de ZION, en vue de mettre en évidence l'effet de l'utilisation de matériaux réels à la place de la thermite [2]. La base de données relative aux essais avec des matériaux réels est donc très réduite et les conclusions que l'on peut en tirer très partielles.

Deux des essais ont été réalisés avec une atmosphère de l'enceinte quasiment inerte, supprimant ainsi toute combustion d'hydrogène ; l'oxydation du corium était

cependant possible puisque la cuve contenait une teneur élevée en vapeur d'eau. Pour ces deux essais sans combustion, réalisés avec un matériau présentant une plus faible énergie spécifique que la thermitite (environ 1,2 MJ/kg dans le cas du corium réel au lieu de 2,7 MJ/kg pour la thermitite) ; la montée en pression dans le dôme de l'enceinte a été moindre que lors des essais réalisés dans des conditions similaires avec de la thermitite. Cependant, la production d'hydrogène due à l'oxydation des matériaux par la vapeur d'eau a été bien supérieure pour le corium, avec un taux d'oxydation du corium de l'ordre de 70 % contre un taux de seulement 30 à 40 % pour la thermitite. Cette forte oxydation est due principalement à l'oxydation des métaux qui entrent dans la composition du corium. Le dioxyde d'uranium UO_2 peut aussi être « suroxydé » par la vapeur d'eau si elle est présente en quantité suffisante ; cependant cette « suroxydation » est probablement limitée et ne contribue que faiblement à la production d'hydrogène.

Il est par ailleurs probable que, lors de ces deux essais, l'oxydation du corium a été limitée par la quantité de vapeur d'eau contenue dans la cuve, qui était insuffisante pour oxyder la totalité des matériaux oxydables composant le corium. Ces essais montrent donc qu'une oxydation très forte du corium peut se produire pour des coriums de compositions représentatives de celle d'un corium qui se formerait lors d'un accident de fusion du cœur d'un REP. Pour un réacteur de puissance, une approche conservatrice pour traiter le DCH est de supposer que tous les métaux du corium sont complètement oxydés lors de sa dispersion ; l'oxydation du dioxyde d'uranium est, quant à elle, négligée.

► Les effets de la présence d'eau

L'effet de la présence d'eau lors de la défaillance de la cuve, soit dans la cuve, soit dans le puits de cuve, a également été étudié aux États-Unis. Toutefois, le nombre réduit d'essais, associé à l'absence de modèle même simplifié, ne permet que des interprétations qualitatives. Lors des essais CE-CES (géométrie du réacteur de CALVERT CLIFFS [4]), le matériau simulant le corium se trouvait initialement au fond du puits de cuve et de l'eau ou de la vapeur, mise préalablement en pression entre 40 et 80 bars, était éjectée de la cuve par une brèche de 4 cm de diamètre (correspondant à un diamètre de 40 cm rapporté à l'échelle de la cuve du réacteur). Lorsque l'eau était initialement saturée (et donc se vaporisait à la sortie de la cuve sous forme de « flash »), aucune influence importante sur l'augmentation de pression dans l'enceinte n'a été mise en évidence, l'apport de pression dû à la vaporisation de l'eau a donc été compensé par une réduction des effets de la combustion et de l'oxydation (d'environ 30 %). Lorsque l'eau était à une température voisine de la température ambiante (et donc ne se vaporisait pas lors de la dépressurisation), une réduction notable (de l'ordre de 30 %) des chargements de pression a été observée. Dans les essais CE-CES avec présence d'eau dans la cuve, environ 60 % du simulant a été entraîné vers le dôme de l'enceinte via l'espace annulaire.

Plusieurs essais ont été réalisés en ajoutant de l'eau en faible quantité dans le puits de cuve (essais WC, IET). Des essais IET-ZION ont également été réalisés avec des quantités variées d'eau dans le puits de cuve. Lors de ces essais, les augmentations de pression ont été voisines de celles observées lors d'essais sans eau dans le puits de cuve : il ne semble pas y avoir d'effet global de la présence d'eau sur l'augmentation de pression.

Cependant, les mesures de température ont permis d'établir que la combustion d'hydrogène a été deux fois moins importante qu'en l'absence d'eau dans le puits de cuve ; l'augmentation de pression est donc dans ce cas en grande partie due à la vaporisation d'eau. Il en résulte que la présence d'eau a donc un effet très important sur les phénomènes intervenant lors d'un DCH et pourrait donc avoir un effet sur l'augmentation de pression dans des conditions différentes de celles de l'essai. Cependant, les études actuelles sont fondées sur les résultats expérimentaux et, par manque d'une modélisation adéquate, négligent l'effet de la présence d'eau.

Même si cela reste à confirmer par des études plus approfondies, la présence d'eau dans la cuve ou dans le puits de cuve semble assez bénéfique vis-à-vis du DCH, limitant la combustion d'hydrogène. Cependant, en présence d'eau, une explosion de vapeur résultant de l'interaction entre le corium fragmenté et l'eau pourrait se produire. Compte tenu des mesures prises pour limiter les possibilités d'éjection de corium à haute pression en cas d'accident de fusion du cœur d'un réacteur de puissance (dépressurisation volontaire du circuit primaire, voir § 4.3.3.3) et donc les possibilités de DCH, l'étude de l'explosion de vapeur est considérée comme prioritaire en termes de risques.

Des expériences d'éjection en pression d'un corium fondu dans un puits de cuve noyé (échelle 1/10^e) ont été réalisées par les laboratoires Sandia aux États-Unis (expériences SPIT/HIPS) [15]. Ces expériences ont, dans tous les cas, conduit à une destruction par explosion de vapeur du puits de cuve. Les travaux de recherche relatifs à l'explosion de vapeur sont présentés en détail dans le paragraphe 5.2.3.

5.2.1.4. Modélisation

La complexité du DCH ne permet pas de le modéliser de façon fine en couplant l'ensemble des phénomènes importants (éjection et fragmentation du corium, transferts thermiques, oxydation des matériaux composant le corium, combustion d'hydrogène, présence d'eau).

Jusqu'au milieu des années 2000, les seules modélisations existantes étaient construites à partir de modèles simplifiés s'appuyant largement sur des corrélations expérimentales, ces modèles étant eux-mêmes implémentés dans des logiciels « intégraux » permettant de calculer des séquences accidentelles plus ou moins complètes (MELCOR, MAAP, CONTAIN, ASTEC, etc. ; voir le chapitre 8). Ces modèles simplifiés sont essentiellement paramétriques et n'ont pas pour finalité l'étude et la compréhension précise des phénomènes intervenant lors d'un DCH. Ils reflètent le niveau des connaissances sur ces phénomènes et permettent un couplage complet, même approximatif, pour l'étude de la progression d'un accident.

Depuis quelques années, FzK puis l'IRSN se sont engagés dans des études à l'aide de logiciels de simulation multiphasique multidimensionnelle (respectivement les logiciels AFDM et MC3D). Contrairement aux modèles paramétriques évoqués ci-dessus, ces logiciels permettent de représenter plus finement certains aspects importants du DCH, notamment la géométrie et le comportement du corium à différentes échelles, mais ils ne représentent pas le couplage de l'ensemble des phénomènes. Par ailleurs,

la chimie complexe intervenant lors d'un DCH y est traitée de manière très simplifiée. Les logiciels AFDM et MC3D visent en premier lieu à alimenter les modèles paramétriques en corrélations mieux adaptées.

L'attention des modélisateurs se porte actuellement prioritairement sur les questions relatives à la dispersion du corium. Les expériences réalisées montrent en effet que l'oxydation des matériaux composant le corium et la combustion de l'hydrogène sont très fortement liées à la dispersion du corium et que des approches simplifiées conduisant à des estimations enveloppes des effets sur la pression de l'oxydation et de la combustion n'amènent pas à des surestimations exagérées des pressions atteintes.

5.2.1.4.1. Modèles paramétriques

Le module DCH du code américain CONTAIN [9] est de loin le logiciel 0-D le plus évolué ; il offre un nombre important d'options de calcul. Ce module est également révélateur des difficultés de modélisation de la dispersion du corium lors d'un DCH puisqu'une bonne dizaine de modèles ou corrélations peuvent être utilisés pour décrire le transport des débris de corium et les écoulements entre les compartiments de l'enceinte de confinement ainsi que le piégeage de débris par les structures.

Le module DCH du logiciel CONTAIN contient des modélisations relativement mécanistes pour décrire la fragmentation du corium et l'entraînement des débris de corium. Il évalue les transferts de chaleur convectifs et radiatifs entre les débris et l'atmosphère à l'aide de lois d'échanges classiques. Le logiciel traite les réactions chimiques d'oxydation du corium et la combustion d'hydrogène (celui produit lors du DCH et celui préexistant dans l'enceinte). La combustion d'hydrogène est évaluée par une approche simplifiée. Bien que le module DCH du logiciel CONTAIN possède une solide base de qualification [10], celle-ci reste limitée aux réacteurs américains de type ZION ou SURRY et son utilisation par la GRS pour interpréter les essais DISCO dans les géométries EPR et P'4 s'est révélée délicate [11, 12] ; ceci peut être dû à la complexité du logiciel (notamment le grand choix d'options) et donc à la nécessité d'une très bonne expérience de l'utilisateur.

Les autres logiciels intégraux relatifs aux accidents de fusion du cœur utilisent des approches plus simples. Ainsi, le module DCH du logiciel MAAP s'appuie sur des corrélations (fonction de la géométrie) pour l'évaluation de la fraction totale de corium dispersé [12]. Les gouttes de corium sont supposées en équilibre dynamique et thermique avec les gaz. La répartition des gouttes dans les différents exutoires du puits de cuve est alors fonction des débits gazeux calculés par le logiciel pour chacun des exutoires. Si ce type de modélisation permet difficilement un traitement précis de la géométrie (notamment de la géométrie des exutoires) et des écoulements dans les exutoires (qui dépendent de la géométrie), il a le mérite de la simplicité.

Le logiciel ASTEC évalue les chargements de pression dus à un DCH à l'aide des modules RUPUICUV, CORIUM et CPA (voir le chapitre 8). Les phénomènes intervenant dans le puits de cuve sont traités par le module RUPUICUV. Cependant le module de thermohydraulique CPA qui permet de calculer les écoulements de gaz dans l'enceinte

de confinement n'est pas apte à traiter directement les phénomènes particuliers du DCH liés à la présence de particules de corium (transferts thermiques des particules de corium aux gaz de l'enclume, oxydation du corium) et un module intermédiaire, le module CORIUM, sert d'interface et permet de traiter les apports d'énergie liés au corium qui sont ensuite utilisés par le module CPA. La fraction totale de corium dispersée est déterminée par des corrélations. L'IRSN a prévu de réviser la modélisation du DCH en conservant une approche simplifiée. En particulier, de nouvelles corrélations déduites des résultats des essais DISCO et des travaux de modélisation réalisés avec le logiciel MC3D seront introduites.

5.2.1.4.2. Logiciels de simulation

L'IRSN et KIT ont choisi d'utiliser des logiciels de simulation de thermohydraulique multiphasique pour améliorer la compréhension des écoulements dans le cas d'un DCH et faciliter la mise au point de modèles simples [13].

Le logiciel AFDM est utilisé par KIT ; il a été initialement développé pour les études de sûreté des réacteurs à neutrons rapides (RNR). C'est un précurseur du logiciel SIMMER III, auquel des modèles physiques relatifs au DCH ont été ajoutés, par exemple pour simuler les réactions chimiques entre les métaux et la vapeur d'eau ou l'oxygène ou encore la combustion d'hydrogène dans l'enclume (modèle simplifié paramétrique). Le logiciel traite des configurations d'écoulement des gaz et des transferts thermiques entre les gaz et le corium de manière assez complète ; il traite notamment la formation de films de corium et de croûtes sur les parois de la cavité du puits de cuve. Le logiciel est limité à une géométrie 2-D axisymétrique. Des résultats prometteurs ont été obtenus pour l'interprétation des expériences DISCO réalisées avec les géométries des réacteurs EPR et KONVOI ; ils ont notamment permis à l'IRSN de lancer des analyses comparatives avec le logiciel MC3D.

Le logiciel MC3D est développé par l'IRSN et le CEA ; il est principalement utilisé pour l'évaluation des chargements de pression induits par une explosion de vapeur (§ 5.2.3). Le logiciel est cependant apte à traiter de nombreux phénomènes multiphasiques dont, partiellement, le DCH. Une particularité de ce logiciel est la description détaillée du corium : le « champ des gouttes » (corium dispersé) est traité de façon distincte du « champ de jet » (corium continu) (voir la figure 5.33 du § 5.2.3 qui illustre ce point). Un modèle détaillé de fragmentation du corium et de coalescence des gouttes permet de passer d'un champ à l'autre. Un modèle d'oxydation du corium existe. En revanche, la combustion n'est pas traitée dans le logiciel MC3D. La combustion étant le contributeur principal à l'augmentation de pression dans l'enclume de confinement, les études conduites avec le logiciel MC3D sont limitées à la dispersion du corium et visent à développer des modèles simplifiés de la dispersion pour le logiciel ASTEC et les études probabilistes de sûreté (EPS). Le logiciel MC3D permet par ailleurs de réaliser des calculs tridimensionnels pour traiter de façon plus précise les géométries spécifiques des réacteurs français. À titre d'illustration, la figure 5.16 présente une visualisation d'une géométrie traitée avec le logiciel MC3D (géométrie P'4 simplifiée) ainsi que des résultats de calculs de la dispersion du corium dans l'espace annulaire en fonction de la pression dans la cuve.

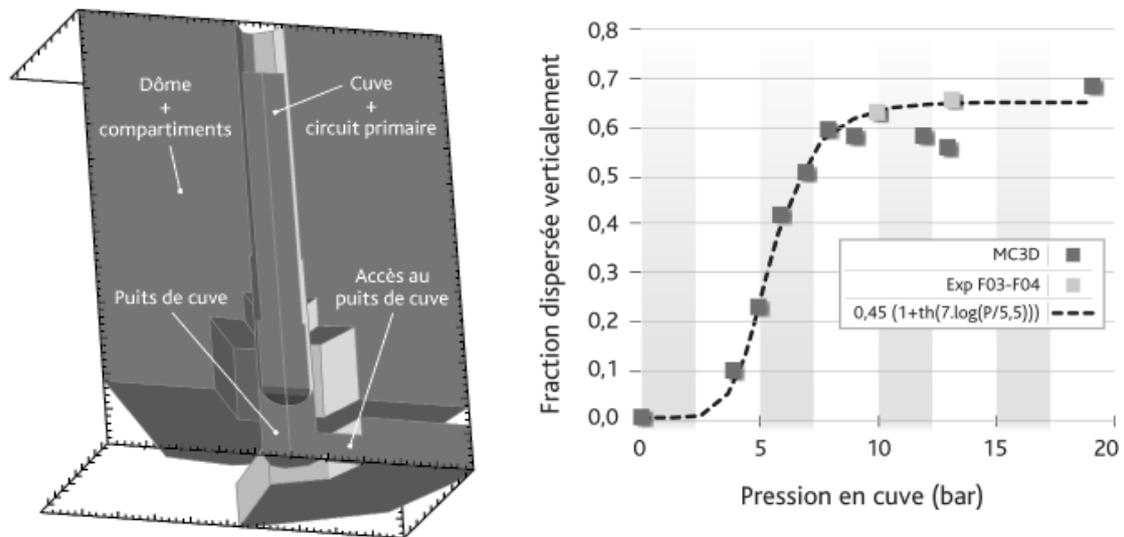


Figure 5.16. À gauche : géométrie 3D utilisée lors de l'interprétation des essais DISCO réalisés avec la géométrie des réacteurs P'4 (géométrie simplifiée) traitée par le logiciel MC3D. À droite : évaluation par le logiciel MC3D de la fraction de combustible dispersée vers le haut du puits de cuve comparés avec les résultats des essais réalisés avec de l'eau comme simulant et avec un diamètre de la brèche dans la cuve de 60 mm.

Au-delà de la comparaison directe des résultats de calcul à quelques points expérimentaux, ce type de logiciel permet d'étudier, par de nombreux calculs et avec des maillages assez grossiers, la sensibilité du phénomène de dispersion du corium à des paramètres tels que la pression dans la cuve, la température des gaz, la taille de la brèche. Une corrélation permettant de traiter la dispersion du corium a ainsi été développée sur la base des résultats des essais DISCO. Cette corrélation prévoit par exemple que, avec de l'eau comme simulant, la pression seuil (minimale) engendrant une dispersion est de l'ordre de 5 bars (voir également la figure 5.16). Dans le cas des réacteurs P'4, les études montrent que, pour une brèche dans la cuve d'un diamètre de l'ordre du mètre, il existe une pression seuil de dispersion du corium voisine de 20 bars et une pression, voisine de 40 bars, au-delà de laquelle la dispersion du corium est maximale. La figure 5.17 illustre ces résultats, en fonction de la pression dans la cuve pour trois diamètres de brèche (la taille de la brèche n'est pas connue avec précision ; elle peut varier de quelques centimètres à 1 m, voir le § 5.1.3).

Il a également été remarqué, toujours pour les réacteurs P'4, que la section du passage d'accès au puits de cuve n'a un effet que sur la quantité maximale de corium dispersée dans l'enceinte, les autres caractéristiques telles que la pression seuil de dispersion étant peu affectées. Ceci a été par la suite confirmé par des expériences DISCO complémentaires.

La grande faiblesse des modélisations existantes concerne la combustion de l'hydrogène. Les logiciels de combustion ne peuvent pas calculer la dispersion et l'oxydation du corium ; inversement, les logiciels MC3D et AFDM ne comportent pas de modèle adéquat de combustion. Une modélisation de la combustion apparaît nécessaire si l'on veut améliorer les capacités prédictives de ces logiciels de calcul. Un travail sur ce point a été engagé en 2009 dans le cadre du réseau européen SARNET, sous l'impulsion de KIT, en vue de déterminer les modélisations les plus adaptées et la façon de les introduire dans les logiciels de simulation multiphasique.

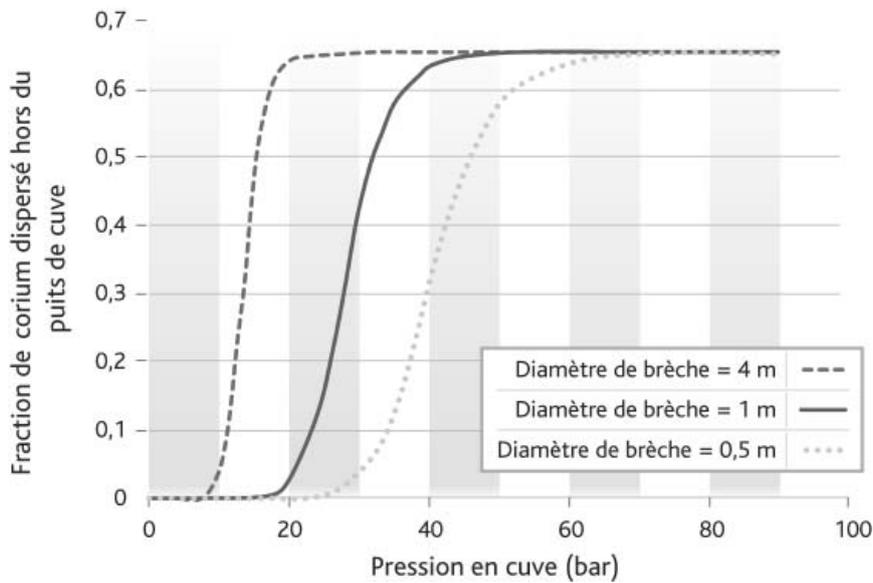


Figure 5.17. Évaluation par l'IRSN, pour les réacteurs P'4, de la dispersion du corium hors du puits de cuve en fonction de la pression dans la cuve pour différents diamètres de brèche. Le diamètre de 4 m correspond à l'arrachement du fond de la cuve.

5.2.1.5. Bilan et perspectives

L'étude du risque de DCH n'est pas aisée. Le risque est différent pour chaque type de réacteur et, pour une géométrie donnée, dépend entre autres de :

- la pression dans le circuit primaire au moment de la défaillance de la cuve ;
- la taille de la brèche dans la cuve ;
- la quantité d'hydrogène non recombinaison encore présente dans l'enceinte de confinement et dans le circuit primaire lors de la défaillance de la cuve ;
- la quantité de métal non oxydé dans le corium.

Le moyen le plus sûr d'éviter ou de limiter l'effet d'un DCH sur l'enceinte de confinement est de dépressuriser volontairement le circuit primaire. Ceci est prévu dès la conception pour les réacteurs EPR et AP1000. La dépressurisation du circuit primaire est considérée d'une manière générale comme une action clé pour la sûreté des réacteurs à eau sous pression en exploitation, en particulier dans les guides d'intervention en accident grave. La figure 5.17 permet d'apprécier le bénéfice d'une dépressurisation du circuit primaire pour les réacteurs P'4 et sans doute plus généralement, en tenant compte des incertitudes évoquées plus haut, pour l'ensemble des réacteurs en exploitation en France. Pour ces réacteurs, un DCH pour une pression dans la cuve inférieure à 10 bars apparaît exclu. Dans une telle situation, la coulée du corium hors de la cuve pourrait conduire, selon la concentration d'hydrogène présente dans l'enceinte de confinement, à une combustion de ce dernier sans DCH. Les chargements de pression sur l'enceinte de confinement ne seraient alors dus qu'à la combustion de l'hydrogène.

Les données expérimentales ont également montré que les conséquences d'un DCH dépendent fortement de la géométrie du puits de cuve et des voies de passage entre celui-ci et le reste de l'enceinte de confinement. En particulier, il apparaît que ces conséquences sont réduites pour les réacteurs qui ne présentent pas de voie de passage directe pour le corium et les gaz entre le puits de cuve et le dôme de l'enceinte ; une telle disposition a été retenue en particulier pour le réacteur EPR.

La combustion de l'hydrogène créé par l'oxydation du corium dispersé par la vapeur d'eau et de celui éventuellement initialement présent dans la cuve et l'atmosphère de l'enceinte de confinement apparaît être le phénomène prépondérant pour l'augmentation de pression dans cette enceinte. Une évaluation précise de cette augmentation de pression nécessite donc une connaissance précise du contenu en éléments métalliques du corium ainsi que des quantités d'hydrogène présentes dans l'enceinte et dans la cuve. Pour les cas de dispersion importante du corium (dispersion de 30 à 50 tonnes de corium liquide ; selon les scénarios d'accident de fusion du cœur envisagés, la masse de corium dispersée peut atteindre 100 tonnes voire plus), des études réalisées par l'IRSN montrent que les limites de tenue mécanique de l'enceinte de confinement pourraient être atteintes lors de la combustion d'hydrogène résultante.

La modélisation du DCH est délicate. En effet, la complexité et la diversité des phénomènes mis en jeu lors d'un DCH, et la forte dépendance de ceux-ci à la géométrie du bâtiment réacteur, se prêtent mal à une modélisation simplifiée. Des modèles paramétriques ont été élaborés ; ils ont permis de réaliser des études visant à estimer l'augmentation de pression dans l'enceinte de confinement lors d'un DCH, mais leur utilisation est très incertaine en dehors de leurs domaines précis de validation (en particulier pour ce qui concerne la géométrie du puits de cuve et des compartiments attenants). L'utilisation de logiciels de simulation multiphasique a permis d'obtenir des résultats importants, notamment pour ce qui concerne la dispersion du corium en fonction de la pression dans la cuve. Mais leur utilisation reste également délicate et ils ne sont pas, en 2013, capables de déterminer l'ensemble des conséquences d'un DCH de façon précise, en particulier à cause des difficultés de modélisation de l'oxydation du corium et surtout de la combustion de l'hydrogène. De plus, les maillages utilisés pour traiter les géométries réelles complexes sont assez grossiers et certains détails géométriques ne peuvent pas être modélisés sans procéder à des simplifications, ce qui conduit à des imprécisions dans le calcul des écoulements.

L'effet de la présence d'eau dans la cuve ou dans le puits de cuve lors d'un DCH n'est pas non plus vraiment déterminé. Une meilleure compréhension de cet effet est nécessaire mais elle ne pourra être obtenue que par le développement de modélisations couplées dans un logiciel de simulation tel que MC3D.

Pour pallier les manques de résultats expérimentaux (notamment avec des matériaux réels) ainsi que les limitations des corrélations développées sur la base des résultats existants et pour permettre l'extrapolation au cas d'un réacteur de puissance, le recours à des logiciels de simulation plus précis apparaît nécessaire : c'est pourquoi, comme indiqué plus haut, des développements visant à améliorer la modélisation d'un DCH pour les réacteurs français ont été engagés par l'IRSN au milieu des années 2000.

5.2.2. Risques associés à l'hydrogène et moyens de limitation des conséquences

5.2.2.1. Introduction

Dans le contexte de l'étude des accidents de fusion du cœur d'un réacteur à eau sous pression (REP), le « risque hydrogène » est défini comme la possibilité d'une perte de l'intégrité de l'enveloppe de confinement du réacteur à la suite d'une combustion d'hydrogène. L'hydrogène est produit principalement par l'oxydation des métaux présents dans le cœur du réacteur (le zirconium des gaines des crayons combustibles essentiellement) lors de la dégradation de celui-ci (§ 5.1.1) et par l'oxydation des métaux présents dans le bain de corium ou dans le radier lors de l'interaction entre le corium et le béton (§ 5.3). L'hydrogène ainsi produit est relâché dans l'enveloppe de confinement. La répartition de l'hydrogène dans l'enveloppe de confinement est plus ou moins homogène suivant l'intensité du brassage de son atmosphère (lié notamment aux boucles de convection résultant de la condensation de la vapeur dans l'enveloppe de confinement). En cas de forte hétérogénéité, il peut exister des concentrations locales importantes d'hydrogène de telle sorte que le seuil d'inflammabilité du mélange gazeux peut être dépassé ; en cas d'inflammation, il peut en résulter des chargements de pression susceptibles de menacer l'intégrité de l'enveloppe de confinement. Par ailleurs, la répartition et les concentrations d'hydrogène dans l'enveloppe de confinement peuvent être modifiées de par l'utilisation du système d'aspersion dans cette enveloppe. En effet, cette utilisation conduit à une homogénéisation des concentrations d'hydrogène dans l'enveloppe de confinement mais elle peut aussi conduire, par condensation de la vapeur d'eau, à rendre le mélange gazeux inflammable par diminution de son taux d'humidité. Des dispositifs tels que des recombineurs et des igniteurs (les REP en exploitation en France ne sont équipés que de recombineurs) peuvent être installés dans l'enveloppe de confinement pour éviter l'accumulation d'hydrogène dans une partie ou dans la totalité de l'enveloppe.

5.2.2.2. Phénomènes physiques mis en jeu

Lors d'un accident de fusion du cœur d'un REP, l'hydrogène relâché du circuit primaire se retrouve dans l'atmosphère de l'enveloppe de confinement, initialement composée essentiellement d'air et de vapeur d'eau. Cette atmosphère est le siège de mouvements de convection induits par la présence de vapeur d'eau et la condensation de cette vapeur d'eau sur les surfaces froides. L'hydrogène va contribuer à renforcer les mouvements de convection naturelle du fait de sa faible densité et à réduire la condensation de vapeur d'eau sur les parois en contrariant la diffusion de la vapeur d'eau. La convection dans l'enveloppe de confinement peut donc être modifiée et une question importante est de savoir si tout le volume confiné est mis en mouvement par cette convection. Dans l'affirmative, l'hydrogène et l'air se mélangent suffisamment rapidement de sorte que, hormis les zones où les gaz sont relâchés et près des parois, une bonne homogénéité de l'atmosphère peut être supposée. Dans le cas contraire, seule une partie du volume confiné – vraisemblablement la partie haute de l'enveloppe de confinement – est brassée et l'homogénéisation de l'atmosphère concerne d'abord cette partie de l'enveloppe ; si son volume est petit, cette partie pourra donc contenir un mélange relativement riche

en hydrogène ; ensuite, l'hydrogène va migrer plus lentement (en plusieurs heures compte tenu des dimensions géométriques de l'enceinte de confinement et de son compartimentage) vers les zones mortes, probablement en partie basse. Dans ces zones, le mélange gazeux va s'enrichir en hydrogène mais cet enrichissement ne dépassera jamais la teneur de la zone homogène.

L'inflammabilité du mélange gazeux contenu dans l'enceinte de confinement dépend de la température, de la pression et de la composition du mélange, ainsi que du mode d'allumage. Il est considéré, en pratique, que la position du point représentatif de la seule composition du mélange (hydrogène, air, vapeur d'eau) dans le diagramme de Shapiro (figure 5.18) permet de déterminer si le mélange est inflammable. Dans ce diagramme, les zones d'inflammation et de détonation sont délimitées par des courbes ; la courbe de limite d'inflammabilité délimite la zone d'inflammation, la courbe de limite de détonabilité délimite la zone de détonation. La zone de détonation, plus réduite, est incluse dans la zone d'inflammation. Les limites d'inflammabilité et de détonabilité dépendent de la température et de la pression ; par ailleurs, la limite de détonation n'est pas une caractéristique intrinsèque du mélange gazeux ; elle n'est valable que pour la géométrie dans laquelle elle a été obtenue.

La combustion peut être amorcée dans un mélange réputé inflammable à l'aide d'une source d'énergie de quelques millijoules. Aussi, il apparaît probable qu'en présence de sources électriques ou de points chauds, l'inflammation se produise assez rapidement après l'entrée du mélange gazeux dans le domaine de combustion. En revanche, il faut une source d'énergie beaucoup plus importante (au moins 100 kilojoules) pour déclencher une détonation stable du mélange : ceci explique que le cas d'une détonation directe du mélange gazeux dans l'enceinte de

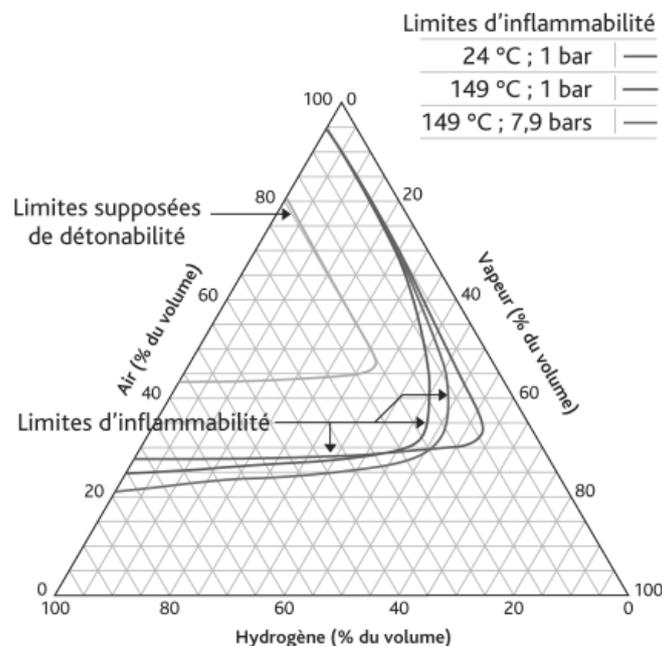


Figure 5.18. Diagramme de Shapiro pour les mélanges hydrogène-air-vapeur d'eau.

confinement puisse être « pratiquement éliminé » et que le seul mécanisme retenu comme pouvant entraîner une détonation est l'accélération de flamme et la transition déflagration-détonation. En effet, du fait des instabilités hydrodynamiques et de la turbulence (induite notamment par la présence d'obstacles sur le parcours de la flamme), une déflagration initialement en régime laminaire (vitesse du front de flamme de l'ordre du mètre par seconde) est susceptible de s'accélérer. Des régimes de combustion rapide peuvent ainsi apparaître : déflagration rapide (vitesse de quelques centaines de mètres par seconde), « transition déflagration détonation » (TDD) et détonation (vitesse de plus de mille mètres par seconde). Ces phénomènes sont les plus menaçants pour la tenue mécanique de l'enceinte de confinement, car ils peuvent occasionner des chargements dynamiques locaux très importants. En effet, plus la vitesse de combustion est importante, plus le pic de pression est élevé mais avec un temps d'application du pic plus court.

Du fait du volume important de l'enceinte de confinement et de sa complexité géométrique (liée notamment à son compartimentage), il n'est pas actuellement possible de réaliser des calculs prédictifs concernant l'accélération de flamme. Néanmoins, la compréhension des mécanismes mis en jeu a permis d'élaborer des critères *a priori* sous forme de conditions nécessaires à l'établissement des différents modes de combustion. Deux types de critères ont ainsi été définis :

- le critère « σ » porte sur l'accélération de flamme ; la grandeur σ est le facteur d'expansion du mélange, rapport des densités des gaz frais et des gaz brûlés à pression constante ; il s'agit donc d'une propriété intrinsèque du mélange considéré, la valeur critique σ^* au-delà de laquelle l'accélération de flamme est possible, dépend de la température initiale des gaz et de la stabilité de la flamme ; elle a été déterminée à l'aide des résultats de nombreuses expériences à différentes échelles et dans différentes géométries ;
- de manière similaire, des conditions nécessaires ont été établies pour apprécier la possibilité d'une transition entre les régimes de déflagration et de détonation (TDD) ; elles reposent sur la comparaison d'une longueur caractéristique de la géométrie du local étudié et de la taille des cellules de détonation (notée λ) qui caractérise la sensibilité du mélange.

Ces critères ont été initialement établis pour des mélanges gazeux homogènes, puis étendus à des mélanges où existent des variations de la concentration d'hydrogène, sur la base des résultats du programme ENACCEF (§ 5.2.2.3.2). Ces critères permettent, à partir de l'étude de la répartition de l'hydrogène dans l'enceinte de confinement (en tenant compte de sa géométrie), de déterminer les situations présentant un risque de défaillance du confinement pour lesquelles un calcul des chargements résultant d'une éventuelle combustion paraît nécessaire. Il convient de noter que l'application des critères cités plus haut suppose que les logiciels utilisés pour le calcul de la répartition d'hydrogène dans l'enceinte de confinement aient été validés pour des situations représentatives des conditions d'un accident de fusion du cœur ; c'est l'objet des programmes expérimentaux sur la répartition de l'hydrogène réalisés ces dernières années.

5.2.2.3. Programmes expérimentaux

5.2.2.3.1. Répartition de l'hydrogène

La répartition de l'hydrogène dans l'enceinte de confinement est régie par divers phénomènes physiques complexes et couplés tels que :

- les écoulements dans la zone de relâchement et le transport des gaz dans l'enceinte de confinement, notamment l'hydrogène et la vapeur d'eau ;
- la convection naturelle induite par les différences de température entre l'atmosphère et les parois de l'enceinte, et par les différences des masses volumiques des différentes espèces gazeuses présentes ;
- la condensation de vapeur d'eau sur les murs et les structures internes de l'enceinte ;
- la stratification thermique et massique des gaz ;
- la diffusion dans les écoulements et la turbulence ;
- l'effet des gouttes de l'aspersion sur les écoulements ou encore la condensation de la vapeur d'eau sur les gouttes de l'aspersion.

De nombreuses expériences analytiques ont permis d'étudier des phénomènes isolés. Pour la condensation, par exemple, les expériences de Dehbi [31] en convection naturelle et de Tagami, Uchida et Huhtiniemi [32] en convection forcée, ont permis de mettre au point des modèles globaux de la condensation de vapeur d'eau. Néanmoins, les corrélations résultant de ces essais dépendent des conditions et de la géométrie des essais. Étant donné le fort couplage qui existe entre les différents phénomènes influant sur la répartition de l'hydrogène, un certain nombre d'expériences globales à grande échelle ont été réalisées en complément des essais analytiques. Un état de l'art sur la thermohydraulique et la distribution de l'hydrogène dans l'enceinte de confinement a été établi en 1999 dans le cadre de l'OCDE par un groupe d'experts internationaux (dont des experts de l'IRSN) [16]. Il présente une description de l'ensemble des expériences (HEDL, HDR, BMC, NUPEC) qui ont été réalisées depuis le début des années 1980. Dans la majorité des cas, il s'agit d'expériences globales à grande échelle dont l'instrumentation limitée et la connaissance imprécise des conditions aux limites ne permettent qu'une validation de logiciels de calculs 0D, et qui s'avèrent inadaptées à la validation de logiciels multidimensionnels.

Afin de pallier le déficit de données, de nouvelles installations mieux instrumentées et dédiées à la validation des outils de calcul multicompartiments et multidimensionnels ont été construites au début des années 2000. On peut citer les installations PANDA, THAI, TOSQAN et MISTRA (figures 5.18, 5.19, 5.20 et 5.21).

► Programme dans l'installation PANDA

L'installation PANDA, située à l'institut Paul Scherrer en Suisse, a été initialement conçue pour l'étude de la thermohydraulique dans les enceintes des réacteurs à eau bouillante. Elle est constituée de quatre compartiments interconnectés d'un volume total égal à 460 m³ [28].

Dans le cadre du projet SETH (SESAR Thermalhydraulics) de l'OCDE entre 2004 et 2006, des essais (en majorité sans condensation) y ont été réalisés en utilisant essentiellement deux compartiments, avec un volume total de 180 m³, et une instrumentation adaptée pour mesurer finement les écoulements afin de valider les logiciels multidimensionnels. La matrice des essais réalisés dans le cadre de ce projet concernait les écoulements avec injection latérale ou centrée de vapeur d'eau ou d'hélium, l'interaction des jets de gaz dans la zone d'injection avec les parois de l'enceinte, l'effet sur la répartition des gaz d'une ouverture des deux compartiments situés en haut de l'enceinte sur ceux du bas. L'installation PANDA offre la possibilité d'étudier des écoulements complexes ; toutefois, le manque de maîtrise de la température des parois de l'installation empêche une caractérisation fine du phénomène de condensation.

Plus récemment, un nouveau programme expérimental, OCDE/SETHII [35], a été réalisé dans les installations PANDA et MISTRA pour obtenir des données supplémentaires sur les écoulements transitoires dans des conditions pouvant entraîner l'homogénéisation d'un milieu initialement stratifié. Ainsi, différentes configurations traitant de l'effet du fonctionnement des recombinants d'hydrogène, de l'aspersion ou de l'injection de vapeur à différents débits sur la disparition d'une stratification préétablie d'hydrogène ont été étudiées.



Figure 5.19. Schéma de l'installation PANDA.

► Programme THAI

L'installation THAI, située en Allemagne (Becker Technology), est dédiée à l'étude de phénomènes concernant le « risque hydrogène », la chimie de l'iode ainsi que le transport et le dépôt d'aérosols dans les enceintes de confinement des REP.

L'enceinte de 60 m³ présente une structure interne multicompartimentée avec des parois externes thermiquement isolées. Pour ce qui concerne le risque hydrogène, l'installation THAI est conçue de manière à permettre l'étude de la répartition de l'hydrogène et de sa combustion ainsi que l'étude du fonctionnement des recombineurs catalytiques. Au cours de la période 1998-2002, l'installation THAI a été utilisée pour la réalisation d'essais de thermohydraulique dont un a servi de base au *International Standard Problem* (ISP) n° 47 de l'OCDE qui s'est achevé en 2007 [18]. Lors de cet essai, une stratification du mélange gazeux utilisé (air, hélium, vapeur d'eau) a été créée en injectant l'hélium et la vapeur d'eau en partie haute de l'enceinte (injection verticale) ; une injection latérale de vapeur d'eau de faible débit en partie basse n'a pas pu mettre en mouvement toute l'atmosphère de l'enceinte compartimentée et n'a donc pas pu homogénéiser le mélange gazeux. Ce résultat inattendu a mis en défaut les logiciels existants qui calculaient une homogénéisation de l'atmosphère de l'enceinte et a mis en évidence la nécessité de modéliser plus finement les écoulements dans les zones d'injection.

L'étude des phénomènes gouvernant la création ou la déstabilisation d'une stratification a donc été poursuivie dans le cadre du projet OCDE/THAI [36] afin d'améliorer la

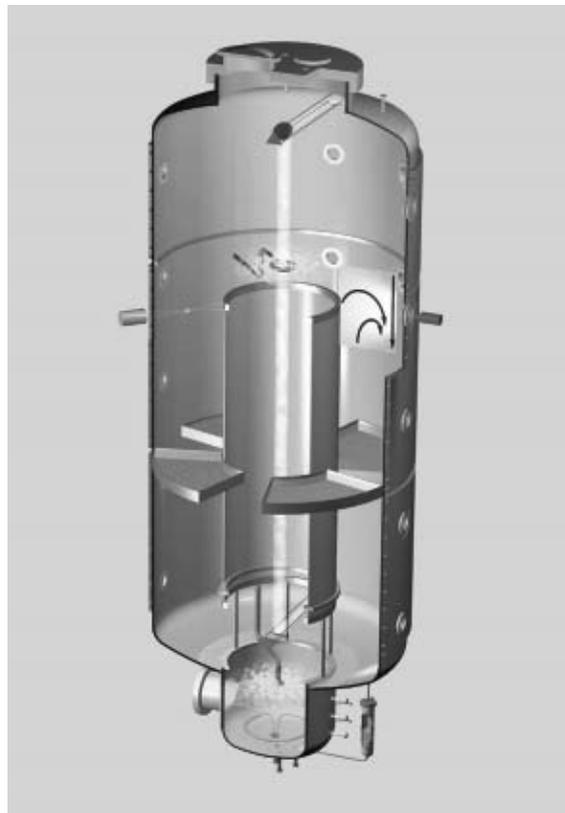


Figure 5.20. Schéma de l'installation THAI [36].

modélisation de la répartition de l'hydrogène dans une enceinte de confinement en cas d'accident de fusion du cœur. Comme nous le verrons plus loin, ce projet avait également pour objectifs l'étude de la combustion d'hydrogène, celle du comportement des recombineurs ainsi que celle de la chimie de l'iode. Par ailleurs, des essais réalisés dans le cadre de ce projet ont permis de confirmer que l'hélium se répartissait de la même manière que l'hydrogène dans l'enceinte, ce qui permet de l'utiliser lors des essais pour étudier la répartition de l'hydrogène.

► Programme TOSQAN

L'installation TOSQAN, réalisée et exploitée à Saclay par l'IRSN, est constituée d'une cuve cylindrique en acier d'un volume interne égal à 7 m^3 (en dehors du puisard, volume situé dans la partie basse de l'enceinte qui contient de l'eau). La température des murs de cette enceinte est régulée permettant ainsi de délimiter la surface froide où la condensation a lieu. L'instrumentation du volume gazeux comprend des mesures de pression, de température, des concentrations des espèces gazeuses (par spectrométrie de masse et diffusion Raman spontanée) et de vitesse (par vélocimétrie laser). Les caractéristiques des gouttelettes d'eau d'aspersion sont déterminées en termes de taille (par imagerie), de vitesse (par vélocimétrie laser) et de température (par réfractométrie). Le programme d'essais concerne l'étude des phénomènes de condensation de la vapeur d'eau, d'aspersion dans l'enceinte, de condensation et d'évaporation à l'interface entre le puisard et l'atmosphère de l'enceinte et ainsi que de rabattement des aérosols par l'aspersion [26].

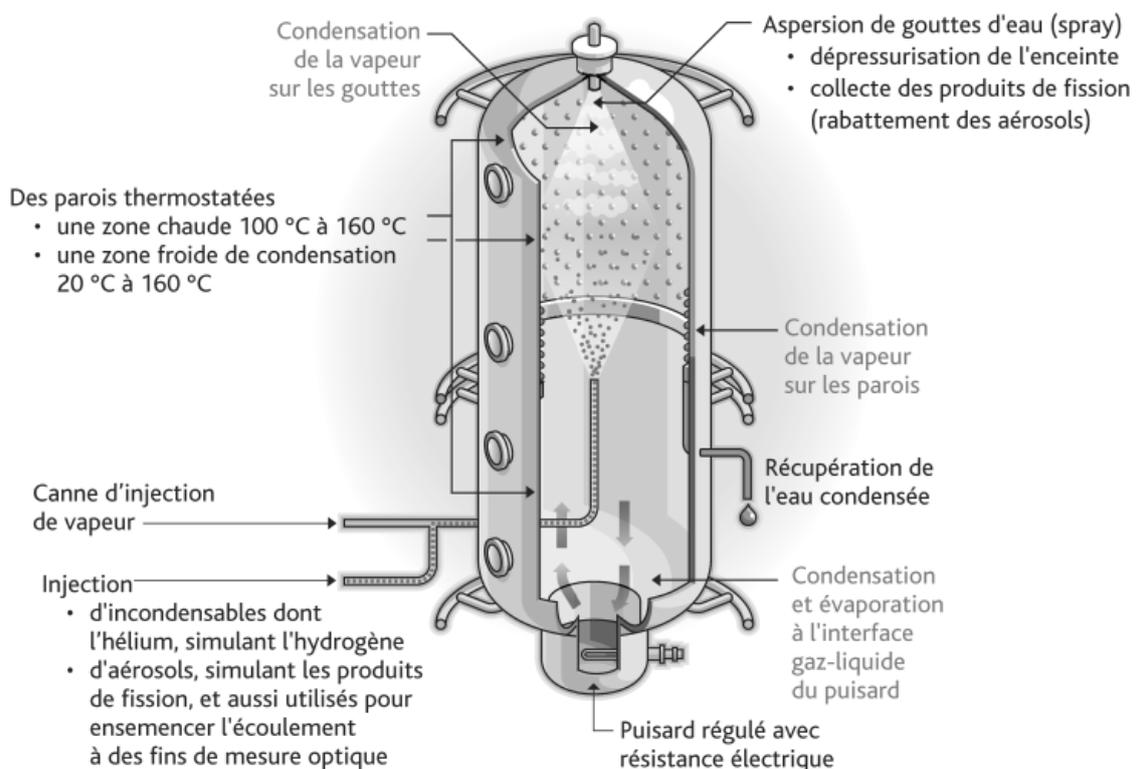


Figure 5.21. Schéma de l'installation TOSQAN.

Les essais relatifs à la condensation, dont un a servi de base à l'ISP47, sont terminés ; ils ont concerné l'étude des régimes stabilisés (débits constants d'injection et de condensation de vapeur d'eau) avec et sans présence d'hélium. Dans l'essai qui a servi de base à l'ISP47, l'hélium ajouté à la vapeur d'eau injectée a commencé par se répartir de façon homogène dans la partie supérieure de l'installation (au-dessus du niveau de l'injection), siège de la principale boucle de convection. Ensuite, la phase d'enrichissement lent en hélium de la partie inférieure de l'atmosphère de l'enceinte a été écourtée par l'apparition d'une instabilité (fluide chauffé par les murs en partie basse de l'enceinte) qui a mis en mouvement toute l'atmosphère de l'enceinte et a ainsi homogénéisé sa composition. En régime stabilisé, l'atmosphère est homogène.

Pour ce qui concerne l'aspersion, des essais avec des buses d'aspersion en position centrée ou en position décentrée ont été réalisés. En outre, un exercice d'intercomparaison international a été organisé sur la base des essais réalisés dans le cadre du réseau européen SARNET. Par ailleurs, les campagnes d'essais concernant les interactions entre l'atmosphère de l'enceinte et le puisard ainsi que le rabattement des aérosols par l'aspersion ont été réalisées et leur analyse achevée.

► Programme MISTRA

Le principal objectif du programme MISTRA réalisé par le CEA est l'étude des phénomènes de condensation sur les murs et sur les gouttes d'eau (aspersion) dans une enceinte plus grande que celle de l'installation TOSQAN et pouvant comporter des compartiments [27]. Plus précisément, l'installation MISTRA se compose d'une enceinte de 100 m³ (diamètre : 4,25 m, hauteur : 7 m), construite en acier inoxydable, isolée thermiquement et équipée de trois surfaces condensantes internes dont les températures sont régulées. L'instrumentation comprend des mesures de pression, de température, de concentrations gazeuses ainsi que de vitesses d'écoulement (par anémométrie laser Doppler). Cette instrumentation est adaptée à la qualification des logiciels de calcul multicompartiments et des logiciels multidimensionnels et à celui de leur couplage.

Les essais de condensation réalisés dans l'installation MISTRA, dont un a servi de base à l'ISP47, ont concerné des régimes stabilisés, permettant d'avoir un équilibre entre les débits d'injection et de condensation de vapeur, avec des injections de vapeur d'eau centrées et décentrées dans l'enceinte libre (pas de compartiment) ou compartimentée. Lors de l'essai utilisé pour l'ISP47, pour lequel de l'hélium a été ajouté au flux d'injection de vapeur d'eau, des résultats similaires à ceux obtenus lors de l'essai TOSQAN utilisé pour le même ISP ont été obtenus en termes de répartition d'hélium. Une atmosphère homogène s'est tout d'abord créée dans la partie haute de l'enceinte sous l'effet de courants de convection ; en dessous du niveau de l'injection d'hélium, la concentration de ce gaz a augmenté lentement jusqu'à l'homogénéisation complète de l'atmosphère de l'enceinte de confinement en environ trois heures. Le mouvement d'ensemble observé lors de l'essai TOSQAN rappelé plus haut ne s'est pas produit car le fond de l'enceinte était plus froid que le reste de celle-ci (configuration stable). Dans les programmes d'essais TOSQAN et MISTRA relatifs à l'aspersion, il a été montré que l'aspersion était efficace pour homogénéiser une atmosphère gazeuse initialement stratifiée. L'enceinte MISTRA est également utilisée dans le cadre du projet OCDE/SETHII pour étudier plus

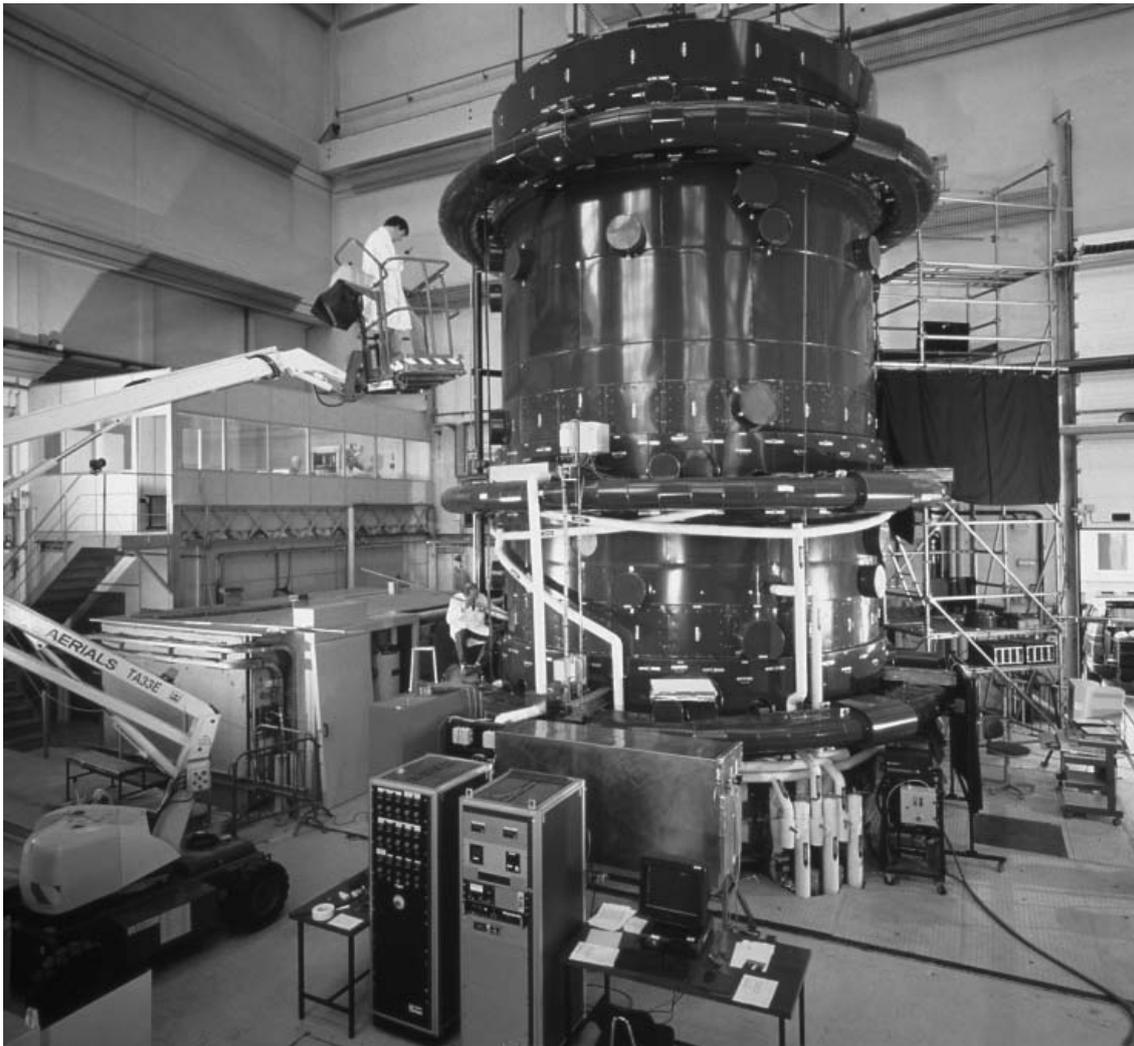


Figure 5.22. Image de l'installation MISTRA. Essais de sismologie sur la table vibrante de l'installation MISTRA (bâtiment 452) [référence PAR-20050629-003, crédit : A. Gonin/CEA].

précisément l'effet d'injections à faible débit de vapeur sur l'homogénéisation d'une atmosphère initialement stratifiée.

Pour apprécier la possibilité d'utiliser les logiciels de calcul existants pour le bâtiment du réacteur d'un REP, une étude de l'effet d'échelle entre les installations TOSQAN et MISTRA a été réalisée par l'IRSN et le CEA. Cette étude s'est appuyée sur des essais pour lesquels les conditions initiales et les conditions aux limites étaient semblables, conduisant à des mélanges homogènes. L'extension de ce travail aux mélanges de gaz hétérogènes est en cours dans le cadre du projet européen ERCOSAM (2011-2015). Dans ce projet, l'étude porte sur des essais, définis à partir des résultats de calcul de scénarios d'accident grave, et réalisés dans les installations TOSQAN, MISTRA, PANDA (située en Suisse, voir plus haut) et KMS (située en Russie) dont les volumes vont de 7 à 1 920 m³ ; ceci permettra d'apprécier la capacité des modèles développés et validés sur la base d'essais à échelle réduite à prédire la répartition de l'hydrogène dans une enceinte de confinement d'un réacteur de puissance [33].

5.2.2.3.2. Combustion de l'hydrogène

De même que la répartition de l'hydrogène dans l'enceinte de confinement, la propagation d'une flamme dans une atmosphère prémélangée contenant de l'hydrogène a fait l'objet de nombreux programmes expérimentaux. L'objectif de ces essais était double ; il s'agissait, d'une part de déterminer les conditions de la transition d'un régime de flamme lente à un régime de flamme rapide puis d'un régime de déflagration à un régime de détonation, d'autre part de produire une base de données permettant de valider des codes de calcul. Deux types d'essais peuvent être distingués :

- les essais analytiques, visant à déterminer les caractéristiques des flammes laminaires et à bâtir une base de données pour qualifier les différents régimes de flamme ;
- les essais dédiés à l'étude des flammes turbulentes, visant à valider des logiciels de calcul et à élaborer des critères permettant de distinguer les régimes de flamme envisageables.

Comme pour la répartition de l'hydrogène dans l'enceinte de confinement, un rapport sur l'état de l'art relatif à l'accélération de flamme et à la transition déflagration-détonation a été rédigé en 2000 par un groupe d'experts internationaux (dont des experts de l'IRSN) dans le cadre de l'OCDE [21]. Une description des principales expériences réalisées dans les installations BMC, NUPEC, VIEW, HTCF, FLAME, RUT, etc. dédiées à l'étude de l'accélération de flamme et à la transition déflagration-détonation y est présentée. Des critères de transition entre les différents régimes de combustion ont été élaborés sur la base des résultats des essais réalisés dans ces installations ; ces critères ont ensuite été affinés dans le cadre du programme européen HYCOM et du programme ENACCEF ; ces deux programmes sont présentés ci-après. Le rapport précité dresse également un état de l'art des modèles de combustion.

► Programme expérimental RUT

L'installation RUT, exploitée par l'Institut Kurchatov en Russie, a permis d'étudier la combustion turbulente de l'hydrogène dans une installation de grande taille. L'IRSN et FzK (Allemagne) ont contribué à la définition et au financement d'un ensemble d'essais dans cette installation. L'installation a un volume total de 480 m³ pour une longueur totale de 62 m. Elle comporte trois parties : un premier canal totalement rectiligne, un « canyon » (ou cavité) situé en partie intermédiaire, et un second canal, plus court que le premier, comprenant une partie incurvée à son extrémité. Ces différentes parties ont une section rectangulaire et peuvent éventuellement être obstruées par des obstacles.

Ces caractéristiques géométriques permettent d'étudier à la fois l'accélération monodirectionnelle dans les canaux d'une flamme produite lors d'une combustion d'hydrogène, et des effets 3D ou interactions plus complexes dans le « canyon ». Il s'agit de la seule installation de taille aussi importante utilisée pour étudier la combustion turbulente de l'hydrogène, permettant d'obtenir des chargements de pression sur des parois, transposables au cas d'un réacteur de puissance. Les mélanges de gaz utilisés lors des essais, contenant de l'hydrogène, de l'air et éventuellement de la vapeur d'eau,



Figure 5.23. Schéma de l'installation RUT.

sont censés être représentatifs des mélanges présents dans une enceinte de confinement lors d'un accident de fusion du cœur. L'instrumentation est bien adaptée à la validation de logiciels de calcul CFD [22].

Les régimes de combustion étudiés lors des différentes campagnes d'essais ont concerné :

- la déflagration lente, pour laquelle la vitesse de flamme est inférieure à la célérité du son dans les gaz frais et les niveaux de pression atteints sont inférieurs à la pression de combustion complète adiabatique et isochore (pression AICC) ;
- la déflagration rapide, pour laquelle la vitesse de flamme est de l'ordre de la célérité du son dans les gaz brûlés et les niveaux de pression atteints sont supérieurs à la pression AICC ;
- les régimes dits « critiques », qui correspondent aux cas où une « transition déflagration détonation » (TDD) se produit mais où la détonation ne se propage pas ou bien ne se transmet pas directement à l'ensemble du mélange ;
- la détonation stable : après une TDD en un point de l'installation, la détonation qui s'est formée, pour laquelle les vitesses et les pics de pression sont voisins des valeurs enveloppes issues de la théorie de Chapman-Jouguet, se propage à l'ensemble du mélange combustible.

Parmi les objectifs des différents programmes menés dans l'installation RUT, ont figuré l'établissement et la validation des critères σ et λ (définis au § 5.2.2.2).

► Programme européen HYCOM

Le programme européen HYCOM a été défini dans la continuité des premiers essais réalisés dans l'installation RUT de l'institut Kurchatov, dans le cadre d'une collaboration entre FzK, l'US NRC, l'IRSN et l'institut Kurchatov ; il avait pour objectif l'étude de l'accélération de la flamme dans les mélanges hydrogène-air, avec comme objectif particulier la validation du critère σ [25]. À cette fin, l'effet de l'expansion des gaz brûlés (effet « piston ») et l'effet du compartimentage sur l'accélération de la flamme ont été étudiés dans l'installation RUT alors que l'effet d'exutoires de pression a été étudié dans les installations DRIVER et TORPEDO, exploitées par FzK, qui sont deux tubes cylindriques de diamètres respectifs 174 mm et 520 mm et de longueurs respectives 12,2 m et 12,4 m.

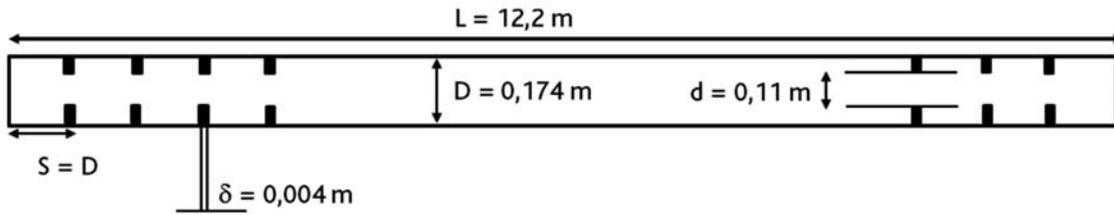


Figure 5.24. Schéma de l'installation DRIVER.

Ce programme, auquel l'IRSN et EDF ont participé, a également permis d'enrichir la base de données sur l'accélération de la flamme et de valider les critères pour des situations particulières pour lesquelles il existe des différences de richesse du mélange gazeux et des différences de géométrie de l'enceinte de confinement.

► Programme ENACCEF

Le programme ENACCEF (Enceinte d'accélération de flamme) réalisé par le CNRS pour le compte de l'IRSN et, pour les premières années, d'EDF, a eu pour objectif premier de valider le critère σ sur des essais réalisés dans une enceinte verticale représentative d'une casemate de générateur de vapeur (GV) ouverte dans le dôme de l'enceinte [17]. L'enceinte ENACCEF comporte un tube d'accélération constituant la partie basse de l'enceinte et un dôme modulable constituant la partie haute de l'enceinte. Le tube d'accélération, d'un diamètre de 168,3 mm et d'une hauteur de 3,2 m, peut être muni d'obstacles de différentes formes conduisant à différents taux de blocage et notamment d'un obstacle simulant un générateur de vapeur d'un volume de 11,12 litres. Le dôme modulable peut avoir un volume de 780,9 litres ou de 957,8 litres.

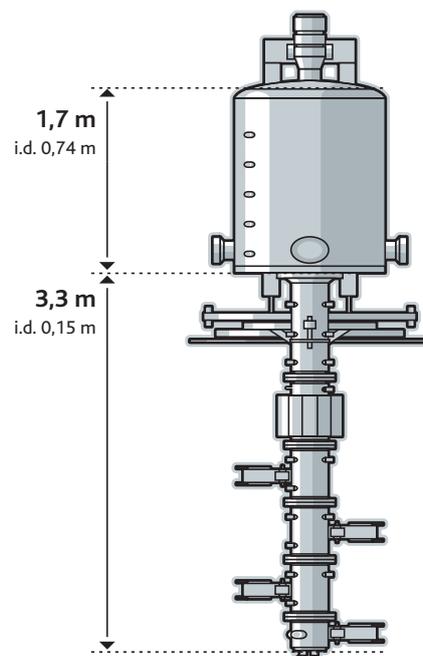


Figure 5.25. Schéma de l'installation ENACCEF [17].

L'instrumentation mise en œuvre comporte des capteurs photomultiplicateurs et des capteurs de pression permettant de mesurer la progression du front de flamme et la pression résultant de la combustion de l'hydrogène. De plus, des points de prélèvement de gaz sont situés le long du tube d'accélération de l'installation pour déterminer la composition du mélange gazeux dans l'enceinte. Enfin, des techniques de mesure LDV (vélocimétrie doppler laser) et PIV (vélocimétrie par image de particules) ont été utilisées pour déterminer le champ des vitesses de l'écoulement gazeux avant l'arrivée de la flamme de combustion. L'enceinte ENACCEF est donc fortement instrumentée et son instrumentation est particulièrement adaptée à la validation des logiciels de calcul CFD. En outre, elle offre la possibilité d'étudier la propagation ascendante et descendante des flammes en considérant des points d'allumage en bas ou en haut de l'installation. En plus des effets dus à la position d'allumage, les effets de la dilution par des gaz simulant la vapeur d'eau, de l'encombrement et de l'hétérogénéité du mélange, ont été étudiés ; cela a permis de confirmer et d'améliorer le critère σ élaboré lors des programmes RUT et HYCOM et de disposer de données pour la validation de logiciels de calcul CFD. Par ailleurs, l'étude de l'effet de la présence de gouttelettes d'eau, issues de l'aspersion, sur la propagation de la flamme a été initiée dans l'installation ENACCEF. Ces résultats montrent que la mise en service de l'aspersion peut, dans certaines conditions, promouvoir l'accélération de flamme. Des essais sont prévus dans le projet OCDE/THAI II (2011-2014) pour compléter ces résultats.

Par ailleurs, certains essais réalisés dans l'installation ENACCEF ont servi et servent de base pour des exercices d'intercomparaison internationaux organisés dans le cadre du réseau européen SARNET et du *International Standard Problem* n° 49 de l'OCDE [34].

5.2.2.3.3. Moyens de réduction du risque hydrogène

Des recombineurs catalytiques (voir la figure 5.26) ont été mis en place dans les enceintes de confinement des REPs français pour réduire la teneur en hydrogène au cours d'un accident avec fusion du cœur. Ils se composent d'un matériau catalytique (platine ou palladium sur un support d'alumine), disposé dans un boîtier métallique dont la fonction est d'assurer la circulation des gaz dans le catalyseur (lit de billes ou rangée de plaques verticales). Au contact des plaques catalytiques, l'hydrogène et l'oxygène présents dans l'atmosphère de l'enceinte réagissent pour produire de la vapeur d'eau.

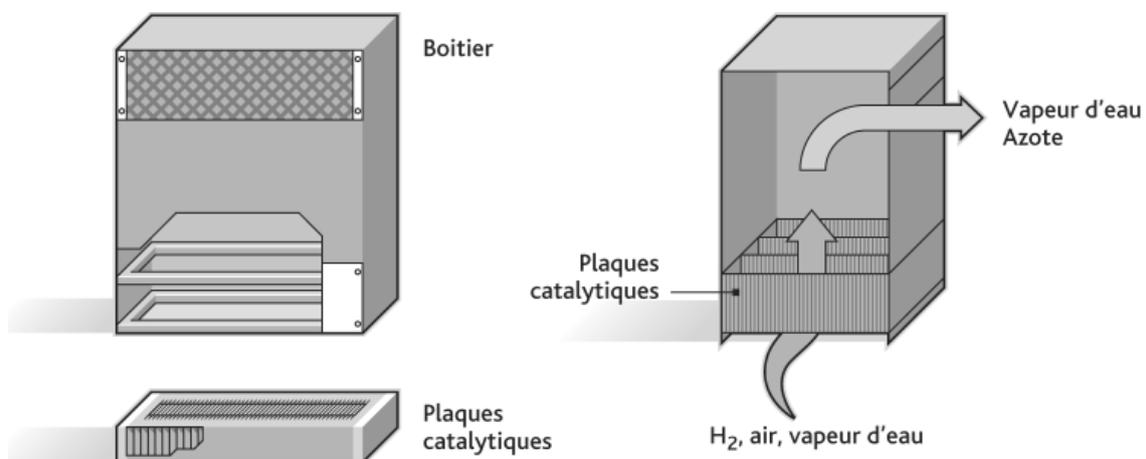


Figure 5.26. Schéma de principe d'un recombineur catalytique passif d'hydrogène.

L'étude du comportement des recombineurs lors d'un accident de fusion du cœur a fait l'objet de nombreux programmes d'essais réalisés notamment par les constructeurs de recombineurs (SIEMENS, AECL, etc.) [20] afin d'apprécier leur capacité de recombinaison.

Les principaux objectifs du programme H2PAR, réalisé par l'IRSN dans ses installations de Cadarache avec le soutien financier d'EDF, ont concerné la vérification du maintien des performances des recombineurs catalytiques d'hydrogène [19] dans une atmosphère représentative de celle qui pourrait être présente dans l'enceinte de confinement lors d'un accident et qui comporterait de nombreux composés chimiques sous forme d'aérosols (créant un risque d'empoisonnement du catalyseur). Il a également permis l'étude du risque d'inflammation du mélange présent dans l'enceinte par le recombineur (qui s'échauffe lors des réactions de recombinaison) et la détermination des seuils à partir desquels une telle inflammation se produirait pour un modèle de recombineur donné. La sensibilité de la recombinaison à différents paramètres géométriques (nombre de plaques catalytiques, hauteur du passage entre les plaques catalytiques appelé « cheminée »), physiques (fraction molaire d'hydrogène) et chimiques (plusieurs plaques catalytiques remplacées par des plaques chimiquement neutres) a également pu être étudiée [29]. Ces essais ont notamment démontré le faible impact des aérosols sur l'efficacité de la recombinaison.

Le programme d'essais KALIH2, réalisé par le CEA avec le soutien financier d'EDF, avait des objectifs complémentaires à ceux du programme H2PAR et a concerné le comportement des recombineurs dans des situations particulières (en l'absence d'empoisonnement par les produits de fission). Les effets sur les performances des recombineurs, de l'humidité, de l'exposition à des fumées de feux de câbles et de la présence de monoxyde de carbone, ont été évalués [23, 24]. En outre, le programme KALIH2 s'est distingué du programme H2PAR par l'étude de l'effet, sur l'efficacité des recombineurs, de la mise en service de l'aspersion, ainsi que de l'effet d'une surpression. Les essais ont ainsi mis en évidence un faible effet de la mise en service de l'aspersion mais un effet important d'une surpression sur l'efficacité des recombineurs.

Plus récemment, le projet OCDE/THAI a permis de conforter et de compléter les résultats des programmes H2PAR et KALIH2 concernant les limites d'inflammation par les recombineurs et les performances de ces derniers dans des conditions d'atmosphère pauvre en oxygène.

Par ailleurs, l'effet des panaches chauds issus des recombineurs sur la distribution de l'hydrogène dans l'enceinte de confinement, sujet qui n'a pas été abordé dans les essais des programmes H2PAR et KALIH2, a été étudié dans le cadre du projet OCDE/SETHII et fait l'objet d'études supplémentaires dans le cadre du projet européen ERCOSAM en utilisant des modèles de recombineurs dans les installations PANDA, MISTRA et KMS. Il est également étudié dans le cadre du projet européen SARNET en réalisant des essais avec des recombineurs dans l'installation REKO 4 exploitée par l'institut Jülich.



Figure 5.27. Image de l'installation REKO 4 (crédit : institut JÜLICH).

5.2.2.4. Modélisation et logiciels de simulation

Les logiciels de calcul utilisés pour déterminer la répartition de l'hydrogène dans l'enclenche de confinement reposent sur une approche multicompartiments. On peut notamment citer les logiciels CONTAIN, MAAAP, GOTHIC, MELCOR, COCOSYS, le module CPA du code ASTEC et le module multicompartiments du code TONUS. Ces logiciels de calcul ont montré leur capacité à calculer la répartition de l'hydrogène pour des expériences à petite et à grande échelle, avec et sans utilisation du système d'aspersion. Cependant, ces logiciels utilisent des modèles trop simplifiés pour décrire finement les écoulements de gaz complexes susceptibles de se produire localement à l'échelle d'un réacteur de puissance, en particulier dans les volumes où des différences de concentration peuvent apparaître (stratification, jets, etc.).

Les logiciels de calcul utilisant une approche multidimensionnelle, comme le module multidimensionnel du logiciel TONUS ou le logiciel GASFLOW développé par

KIT, permettent de modéliser beaucoup plus finement les écoulements complexes ; ils peuvent ainsi être utilisés pour compléter les études réalisées avec les logiciels cités plus haut dans le cas d'écoulements complexes. Leur utilisation peut toutefois être limitée dans certains cas par la complexité géométrique des structures internes de l'enceinte de confinement et par le coût des calculs qui peut s'avérer conséquent.

Les exercices d'intercomparaison de calcul (ECORA et ISP47) organisés sur la base de résultats expérimentaux des quatre programmes mentionnés ci-dessus permettent de faire le point suivant relatif aux logiciels de calcul.

L'exercice ECORA, qui portait sur un transitoire avec injection de gaz sans condensation de vapeur d'eau, réalisé avec des outils CFD, a montré que la principale limitation dans l'utilisation de ce type de logiciel résidait dans le calcul pour des transitoires lents à grande échelle. Les moyens de calcul existants n'ont pas permis de réaliser d'étude de convergence des calculs, ou de sensibilité au maillage et au pas de temps. Néanmoins, les modèles utilisés ont correctement prédit le transport de la vapeur d'eau entre les compartiments de l'installation PANDA, ce qui constituait un des points essentiels d'investigation pour cet exercice.

Lors de l'exercice ISP47, les outils mis en œuvre ont été des logiciels multicompartiments et multidimensionnels. De plus, plusieurs institutions ayant utilisé un même outil, l'effet de l'utilisateur a pu être mieux estimé. Les conclusions finales de cet exercice ont souligné les points suivants :

- les outils CFD n'ont pas montré d'avantage significatif par rapport aux outils multicompartiments, cela pouvant être lié, pour ce qui est des essais TOSQAN et MISTRA, aux structures des écoulements, relativement simples ;
- les résultats obtenus avec des outils multicompartiments se sont avérés fortement variables en fonction des utilisateurs. Ils ont mis ainsi en exergue la nécessité d'établir et de mettre en œuvre des guides de bonnes pratiques (cette recommandation est également valable pour les logiciels CFD qui utilisent des corrélations) ;
- les exercices en aveugle, importants pour apprécier l'aspect prédictif des codes, ont montré une forte dispersion des résultats ;
- la modélisation de la condensation de la vapeur d'eau sur les parois nécessite des études complémentaires, notamment concernant l'effet de la présence d'hélium ;
- le traitement des effets d'échelle dans les logiciels de calcul n'est pas complètement résolu : c'est l'objectif du projet européen ERCOSAM.

Par ailleurs, le calcul des chargements de pression sur l'enceinte de confinement pouvant résulter d'une combustion d'hydrogène peut être effectué à l'aide de logiciels de calcul utilisant des approches multicompartiments ou multidimensionnelles. D'une manière générale, les codes multicompartiments sont utilisés pour le calcul de flammes lentes pour lesquelles les chargements de pression peuvent être considérés comme statiques. Le calcul des chargements dynamiques de pression nécessite en général l'utilisation de logiciels CFD utilisant des approches multidimensionnelles. À cet égard, il convient de rappeler que le projet HYCOM a permis de dresser un bilan très complet

concernant la combustion d'hydrogène dans les enceintes de confinement des réacteurs et sa modélisation. En particulier, ce projet a mis en évidence que :

- les grandeurs globales telles que la pression maximale, sont relativement bien calculées par les logiciels CFD et par les logiciels multicompartiments. Néanmoins les logiciels CFD donnent de meilleurs résultats pour les flammes rapides alors que les logiciels multicompartiments sont plus adaptés aux flammes lentes ;
- des différences existent entre les résultats obtenus avec les différents logiciels de calcul pour ce qui concerne les grandeurs « dynamiques » telles que la vitesse de flamme ou la vitesse de montée en pression ;
- certains phénomènes observés expérimentalement, tels que l'étouffement de la flamme, ne sont pas correctement calculés par les logiciels de calcul ;
- la modélisation de la dissipation de l'énergie de la flamme au cours de son trajet est un point important et doit être améliorée.

Mais surtout, le projet HYCOM a mis en évidence des difficultés de modélisation de la combustion d'hydrogène dans le cas de mélanges hétérogènes, notamment lorsque l'hétérogénéité du mélange conduit à un changement du régime de combustion. Ces situations, pourtant proches de cas vraisemblables, ne sont pas modélisées de façon satisfaisante et nécessitent des données expérimentales supplémentaires, notamment concernant le niveau de turbulence, pour la validation des logiciels de calcul. Ce constat a été aussi effectué à l'issue des exercices d'intercomparaison de codes réalisés dans le cadre de l'*International Standard Problem (ISP49)* de l'OCDE et du projet SARNET.

5.2.2.5. Bilan et perspectives

Les travaux de recherche et développement réalisés sur le risque hydrogène ont permis d'obtenir un certain nombre de résultats qui confortent la décision d'implanter des recombineurs passifs dans l'ensemble des tranches du parc électronucléaire français. Les études réalisées concernant des scénarios d'accident de fusion du cœur à la fois sur les réacteurs existants et sur l'EPR ont toutefois montré qu'il est difficile, malgré l'implantation de recombineurs, de démontrer que la formation d'un mélange hydrogène-oxygène susceptible de conduire à des phénomènes d'accélération locale de flamme peut être exclue en tous points de l'enceinte de confinement et à tout instant.

Par ailleurs, les événements survenus sur les installations de Fukushima Daiichi au Japon ont montré la nécessité de poursuivre les études de R&D pour approfondir la connaissance des phénomènes gouvernant le risque hydrogène.

Aussi, et afin d'améliorer les outils nécessaires à l'évaluation du risque hydrogène, des recherches complémentaires sont en cours ; elles concernent :

- pour la répartition de l'hydrogène, l'étude des écoulements transitoires avec une stratification ; cet aspect a été étudié dans le cadre du projet SETHII et est en cours d'étude dans le cadre du projet européen ERCOSAM par la réalisation de programmes d'essais notamment dans les installations TOSQAN, PANDA et MISTRA ;

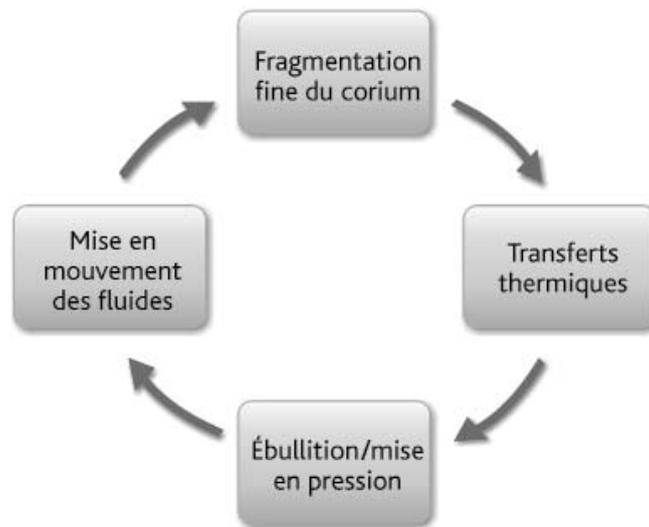
- pour la combustion, l'étude de l'effet de la présence de gouttes d'eau sur l'accélération d'une flamme d'hydrogène ; ce sujet est traité dans le cadre du programme ENACCEF et fait partie du projet OCDE/THAI II en cours ;
- pour les recombineurs, l'étude des effets de la localisation des recombineurs sur le débit de recombinaison et sur l'ignition d'une flamme par les recombineurs. Ces deux sujets sont abordés dans le cadre du réseau européen SARNET et font l'objet d'un programme de travail sur la base des essais réalisés dans les installations REKO3 et REKO4. Les effets de la localisation des recombineurs sur l'atmosphère environnante sont également traités dans le cadre du projet OCDE/SETHII ;
- pour la répartition de l'hydrogène, des développements de modèles de la condensation de la vapeur d'eau en présence de gaz incondensables avec stratification et des mécanismes de « déstratification ». Par ailleurs, l'exercice d'intercomparaison sur l'aspersion organisé par l'IRSN a montré les limites des logiciels de calcul à décrire l'effet de l'aspersion sur la cinétique du mélange de l'atmosphère ;
- pour la combustion d'hydrogène, des travaux supplémentaires d'amélioration et de validation des modèles sont nécessaires pour mieux simuler la propagation de la flamme dans un milieu hétérogène, notamment lorsqu'il existe des différences de concentrations d'hydrogène rendant possible un changement de régime de propagation de la flamme.

En conclusion, les travaux de R&D accomplis ont permis de progresser significativement dans la connaissance des phénomènes gouvernant la répartition des mélanges gazeux et leur combustion dans l'enceinte de confinement lors d'un accident de fusion du cœur. En particulier, l'établissement de critères validés à partir de données expérimentales permet aujourd'hui de mieux déterminer les situations pouvant présenter des risques liés à la combustion de l'hydrogène. Pour ce qui concerne les outils de calcul, s'ils ont atteint un degré de maturité significatif, leur caractère prédictif devrait être encore renforcé par l'établissement de règles de bonne utilisation pour atténuer l'effet « utilisateur », par l'amélioration des modèles, notamment ceux de la combustion, ou encore par l'amélioration des performances numériques des logiciels multidimensionnels CFD et l'accroissement de la puissance des calculateurs permettant de généraliser leur utilisation.

5.2.3. Explosion de vapeur

5.2.3.1. Introduction

L'explosion de vapeur est, depuis les années 1970, un phénomène relativement bien compris. Lorsque deux fluides, dont l'un (le combustible fondu ou le « corium » résultant de la fusion du cœur) est à une température supérieure à la température d'ébullition de l'autre (le réfrigérant), entrent en contact, une interaction explosive peut se produire. Ce phénomène résulte de l'interaction (en chaîne) de trois mécanismes illustrés ci-contre.



La fragmentation très fine du corium en fragments d'un diamètre de l'ordre de la centaine de microns permet un transfert d'énergie des fragments de corium au réfrigérant dans un temps inférieur à celui nécessaire au relâchement de la pression résultant des changements de phase du réfrigérant (évaporation) par le transfert d'énergie. La mise en pression entraîne une mise en mouvement relative des fluides (à cause des différences de densité, l'eau prend plus de vitesse que le combustible). Ceci entraîne une surpression importante suivie d'une détente plus ou moins lente pouvant endommager les structures environnantes (des surpressions allant jusqu'à 1 000 bars ont été mesurées dans les essais KROTOS réalisés au Joint Research Centre (JRC) à Ispra en Italie avec de l'alumine comme matériau simulant le corium [37]).

La condition nécessaire au déclenchement d'une explosion de vapeur est le contact entre les deux fluides, mais les situations dégageant le plus d'énergie sont celles où les deux fluides sont mélangés avant que ne se produise la fragmentation fine (on parle de prémélange). Lors d'un accident de fusion du cœur d'un réacteur de puissance de type REP, de tels mélanges peuvent se former après la fusion du cœur pendant la coulée du corium au fond de la cuve s'il y reste de l'eau (explosion « en cuve »), puis éventuellement, lors de la percée de la cuve, dans un puits de cuve noyé (explosion « hors cuve »).

Cette condition n'est toutefois pas suffisante : lorsque les fluides sont en contact ou mélangés, il peut très bien ne pas se produire d'explosion. Le corium reste alors au stade d'une fragmentation grossière (fragments millimétriques ou centimétriques) avec un transfert d'énergie du corium au réfrigérant relativement lent (de l'ordre de la seconde pour une goutte), entraînant une montée en pression lente du milieu (c'est ce qui s'est produit lors de l'accident de Three Mile Island-2, décrit au paragraphe 7.1). Pour qu'une explosion se produise, il faut un événement déclencheur « interne » (on parle alors d'explosion spontanée) ou « externe » (propagation d'une onde de surpression) qui amorce la fragmentation fine quelque part dans le prémélange, cette fragmentation fine se propageant ensuite à l'ensemble du prémélange. De telles explosions spontanées

ou déclenchées artificiellement ont été obtenues expérimentalement avec des matériaux fondus entrant dans la composition d'un corium de REP (mélange U-O-Zr-Fe essentiellement).

Dans sa forme la plus extrême, une explosion de vapeur est analogue à une détonation due à une réaction chimique, avec propagation d'une onde de choc à la vitesse du son, les transferts thermiques entre le corium fragmenté et l'eau jouant un rôle équivalent au dégagement d'énergie dans les réactions chimiques. L'analogie est cependant limitée et des approximations plus ou moins réalistes sont nécessaires pour bâtir des modèles analytiques (sur la base de modèles de détonation) dont les possibilités d'applications pratiques sont très limitées. C'est pourquoi le recours à des modèles complexes multiphasiques multidimensionnels est nécessaire pour traiter l'explosion de vapeur. Le logiciel le plus couramment utilisé en France est le logiciel MC3D, développé par l'IRSN en collaboration avec le CEA (§ 5.2.3.3.3).

Le programme SERENA de l'OCDE (*Steam Explosion REsolution for Nuclear Applications*) auquel ont participé les principaux spécialistes mondiaux de l'explosion de vapeur, a permis, lors d'une première phase qui s'est déroulée de 2001 à 2005, de faire un point sur la compréhension du phénomène et sur les capacités de calcul des principaux logiciels dédiés [44]. La deuxième phase du programme s'est déroulée de 2008 à 2012 avec la mise en œuvre d'un programme expérimental dédié à l'étude de l'explosion de vapeur avec des coriums de diverses compositions, susceptibles d'être obtenues lors d'un accident de fusion du cœur d'un réacteur de puissance, visant à améliorer les modélisations existantes (§ 5.2.3.3.2).

5.2.3.2. Phénomènes physiques mis en jeu

Lors de la coulée de corium dans l'eau présente au fond de la cuve ou, après défaillance de la cuve, dans le puits de cuve, l'interaction explosive apparaît comme un phénomène de dispersion et de fragmentation en deux étapes comme schématisé sur la figure 5.28. La première étape, le prémélange, peut, selon la manière dont il se déroule, conduire à l'explosion proprement dite (deuxième étape) due aux mécanismes fondamentaux décrits dans l'introduction qui s'auto-entretiennent : fragmentation fine du corium, transfert d'énergie entre le corium fragmenté et l'eau, mise en pression associée et mise en mouvement différenciée des fluides. Les échelles de temps étant très différentes entre le prémélange et l'explosion (secondes contre millisecondes), cette dernière se déroule au sein d'un prémélange quasi statique ; ce prémélange détermine les conditions initiales de l'explosion.

L'explosion dépend donc très fortement du prémélange au moment du déclenchement, à savoir la composition et la distribution des diverses phases en présence (corium, eau, vapeur d'eau), l'aire interfaciale du corium ainsi que sa température et son état de solidification éventuel. Il est donc essentiel de décrire avec précision cette première étape pour obtenir les conditions initiales de l'explosion. De fait, la modélisation précise de la phase d'explosion n'a d'intérêt pratique que si le prémélange est adéquatement décrit. Cette phase a longtemps été négligée, mais les plus importants efforts de R&D de ces dix dernières années lui ont été consacrés.

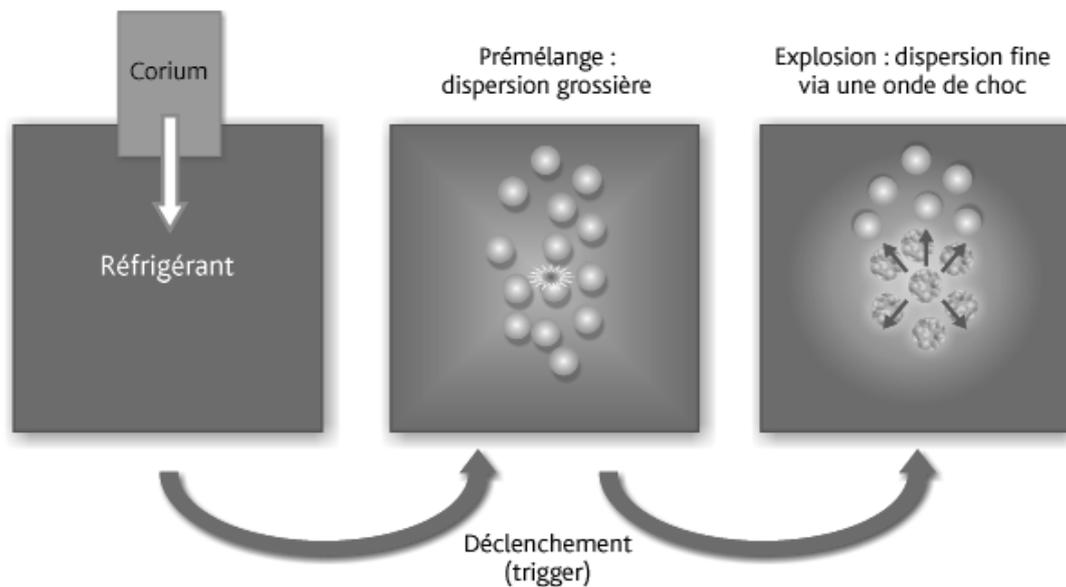


Figure 5.28. Schématisation des étapes du phénomène d'explosion de vapeur.

Entre le prémélange et l'explosion, intervient l'événement déclencheur de la fragmentation fine, communément appelé "*trigger*". L'explosion débute donc par une phase de déclenchement, puis se produit une phase dite d'escalade où l'intensité de l'explosion augmente jusqu'à atteindre un état stationnaire. Ces deux phases ne se différencient pas d'un point de vue phénoménologique et, dans les outils de calcul actuels, elles sont modélisées de la même manière. Dans la suite, on parlera plus généralement de la phase d'explosion pour les décrire. Le prémélange, le déclenchement de l'explosion et l'explosion sont décrits de manière détaillée dans les paragraphes qui suivent.

5.2.3.2.1. Prémélange

L'importance du prémélange a été clairement mise en évidence, en particulier au cours des expériences KROTOS, où les prémélanges très différents observés avec l'alumine et le corium (figure 5.29) ont entraîné des intensités d'explosion très différentes (dix fois plus d'énergie dégagée avec l'alumine qu'avec le corium) [37]. Pour tous les essais réalisés, les informations obtenues sur le prémélange de matériaux à haut point de fusion (supérieur à 2 000 °C) ont été surtout qualitatives, ce qui s'est avéré insuffisant pour expliquer les différences de comportement observées. Des informations plus détaillées sur le prémélange, concernant en particulier les processus de fragmentation et d'ébullition, sont recherchées dans le cadre de la deuxième phase du programme OCDE/SERENA (§ 5.2.3.3.2).

En termes de modélisation, l'évaluation du prémélange est réalisée par des logiciels de thermohydraulique multiphasique multidimensionnels (§ 5.2.3.3.3). Il n'est en effet pas possible de modéliser de manière simple le prémélange tant les interactions dynamiques, thermiques, et chimiques sont nombreuses.

Les trois points essentiels qui font l'objet d'efforts importants de R&D, à savoir la fragmentation du corium, la détermination du taux de vide (fraction du volume occupée par la vapeur d'eau) et la solidification du combustible, sont présentés ci-après. Pour être complet, il faudrait aussi étudier les effets d'oxydation des matériaux du corium qui peuvent modifier fortement chacun de ces trois points.

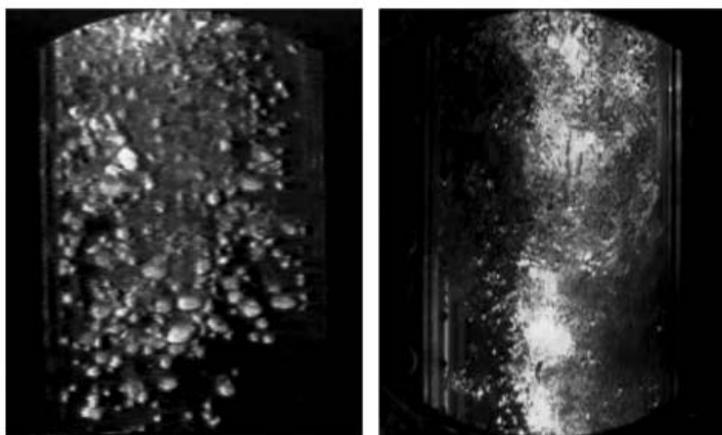


Figure 5.29. Visualisation de prémélanges d'alumine et d'eau (à gauche, expérience KROTOS-57) et de corium et d'eau (à droite, expérience KROTOS-58). Caméra vidéo 24 images/s, fenêtre 10 x 20 cm [37].

► Fragmentation du corium

Dans le prémélange, on distingue la fragmentation, dite primaire, à partir de la phase continue (jet de corium en général), qui produit une première génération de gouttes qui, éventuellement, se fragmenteront elles-mêmes (fragmentation secondaire). En réalité, le phénomène de fragmentation du jet est très complexe et fait intervenir plusieurs processus d'instabilité puis de fragmentation, ainsi qu'en témoigne la figure 5.30.

La fragmentation secondaire se poursuit jusqu'à ce que les gouttes formées atteignent des tailles trop petites pour permettre une fragmentation plus fine (les gouttes sont fragmentées par arrachement de gouttes de plus petite taille par l'écoulement de gaz ; cette fragmentation n'est possible que si la goutte est instable dans les conditions hydrodynamiques de l'écoulement).

La fragmentation primaire des jets de corium a fait l'objet de nombreux travaux de recherche (voir notamment les résultats des travaux de thèse présentés dans les références [42, 43]). Les modèles développés dans le cadre de ces travaux sont essentiellement consacrés à la fragmentation fine (atomisation) directe du jet de corium⁷. Cependant, il a été observé que le jet de corium peut se fragmenter par d'autres mécanismes impliquant des instabilités hydrodynamiques « à grande échelle » à l'origine de la formation de fragments de plus grosse taille et d'une dispersion spatiale plus

7. Ne pas confondre avec le processus de « fragmentation fine » durant l'explosion pour lequel les fragments sont beaucoup plus petits.



Figure 5.30. Illustration de la complexité des processus de fragmentation dans le cas d'un jet liquide dans un flux coaxial d'air [63].

importante des fragments de corium (figure 5.31). Ces mécanismes sont supposés être à l'origine du comportement constaté lors d'essais avec de l'alumine réalisés dans l'installation KROTOS [37], où les fragments occupaient toute la section transversale du tube d'essai (voir la figure 5.29).

De son côté, la fragmentation secondaire a fait l'objet de nombreux travaux jusque dans les années 1980. Ils ont permis de dégager des tendances et des nombres caractéristiques fondamentaux (nombre de Weber : $We = \rho_{amb} V^2 D / \sigma$, temps caractéristique de fragmentation : $(D/V) \times \sqrt{\rho_{comb} / \rho_{am}}$). Il reste que les connaissances acquises ne permettent de décrire que qualitativement le prémélange.

Hormis le fait que les connaissances théoriques restent à améliorer, la modélisation de la fragmentation dans les logiciels de calcul se heurte à deux difficultés. La première concerne l'aspect local des phénomènes, ce qui conduit à la nécessité d'une résolution spatiale fine. La seconde réside dans l'extrême sensibilité des modèles aux conditions locales d'écoulement qui sont assez instables et qui peuvent d'ailleurs conduire à l'explosion elle-même. Une modélisation paramétrique de la dynamique des écoulements est alors souvent préférée à une modélisation plus fine ; ce type d'approche basée sur des modèles simplifiés de chute gravitaire des fragments de corium est cependant de portée limitée car ces modèles simplifiés ne sont pas suffisamment validés pour réaliser des calculs de prémélange corium-eau lors d'un accident de fusion du cœur d'un réacteur de puissance.

► Production du vide

On appelle taux de vide la fraction volumique des gaz dans le mélange corium-eau. L'effet du taux de vide sur l'explosion de vapeur est encore, à ce jour, l'objet de fortes

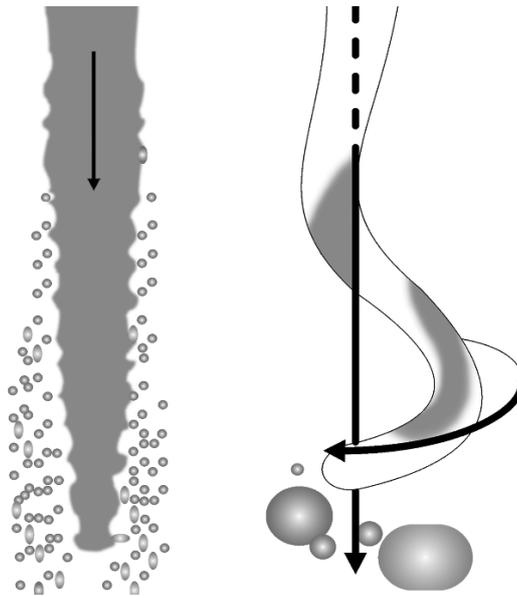


Figure 5.31. Représentation schématique de la fragmentation primaire d'un jet de corium au contact de l'eau : fragmentation du jet liquide par atomisation (à gauche) et fragmentation liée à des instabilités hydrodynamiques « grande échelle » à droite ; ces instabilités conduisent à une déformation du jet de corium (torsion autour de l'axe vertical de la coulée) et donc à une dispersion plus importante des fragments dans l'espace.

incertitudes. Plus le taux de vide est important, plus la compressibilité moyenne du mélange augmente et plus l'explosion devient difficile. La prédiction du taux de vide lors du prémélange (état initial de l'explosion) est complexe, principalement à cause des températures très élevées du corium (notons qu'à 3 000 K, la vapeur d'eau est déjà fortement dissociée). La production de vapeur par ébullition en film est mal maîtrisée. De la même manière, les processus de condensation de la vapeur sont très délicats à modéliser. Les configurations d'écoulement utilisées dans la modélisation sont issues de travaux sur les écoulements diphasiques isothermes dans des canalisations. Leur adéquation pour la description du prémélange est incertaine. La présence de gaz incondensables produits par l'oxydation des phases métalliques du corium modifie les processus d'ébullition et de condensation et rend donc plus complexe encore la modélisation du taux de vide.

Il s'ensuit une certaine disparité des modèles existants, en grande partie responsable de la disparité des résultats des calculs réalisés lors de la phase 1 du programme SERENA. En l'absence de résultats expérimentaux détaillés, en particulier concernant les taux de vide locaux et la configuration du corium, la validité des divers modèles ne peut pas être établie avec suffisamment de certitude. L'évaluation correcte des taux de vide et de leur distribution est un des objectifs majeurs de la phase 2 du programme SERENA décrit au paragraphe 5.2.3.3.2.

► Solidification du corium

Pour les applications aux réacteurs de puissance, un phénomène supplémentaire doit être pris en considération. Il s'agit de la solidification du corium pendant le prémélange qui inhibe le processus de fragmentation fine et donc l'explosion. Ce phénomène est particulièrement difficile à étudier à cause de la complexité des mélanges de matériaux composant le corium et des conditions complexes du prémélange (écoulements des gaz et du corium, fragmentation du corium, températures élevées, etc.). Il existe donc de très fortes incertitudes sur les processus mêmes de la solidification. Les logiciels traitant de ces processus (dont MC3D) font l'hypothèse d'une solidification en situation d'équilibre thermodynamique, avec l'existence d'une croûte superficielle solide et un front de solidification bien défini.

5.2.3.2.2. Déclenchement de l'explosion

Pour l'évaluation du risque lié à l'explosion de vapeur, la phase de déclenchement de l'explosion de vapeur est sans doute la plus délicate à traiter. Il n'existe pas de modèle fiable permettant de prédire le moment et l'endroit du déclenchement d'une explosion. Les paramètres physiques qui déterminent le déclenchement de l'explosion ne sont pas précisément connus. Les connaissances sont fondées principalement sur des résultats d'expériences. Pour le cas du corium, on constate expérimentalement que des explosions spontanées ont eu lieu lors du contact entre le corium et le fond du dispositif d'essai contenant le mélange corium-eau. Cependant, rien n'indique qu'une explosion ne pourrait pas avoir lieu avant ou après ce contact.

D'un point de vue théorique, on sait qu'une goutte de corium chaud peut exploser sous l'influence d'une perturbation de pression faible, de l'ordre de quelques bars (figure 5.32). Le phénomène comporte une fragmentation isotrope, contrairement au cas d'une fragmentation liée à des effets dynamiques (les fragments se retrouvent dans le sillage). Malgré de nombreux travaux de recherche, ce phénomène dit de « fragmentation thermique » reste mal compris. Toutefois, une thèse réalisée de 2005 à 2008 à l'IRSN [45] a permis de progresser dans la compréhension de ce phénomène et de valider l'hypothèse la plus couramment faite selon laquelle le phénomène serait dû à une déstabilisation du film de vapeur entourant la goutte de corium. Cette déstabilisation engendrerait, par des contacts locaux entre corium et réfrigérant, des montées en pression locales qui déstabiliseraient à leur tour la goutte de corium. Ce phénomène de « fragmentation thermique » du corium n'apparaît possible que pour des conditions assez précises de pression ambiante (approximativement 2 à 15 bars) et de sous-refroidissement de l'eau (supérieur à 70 °C d'après les résultats d'expériences conduites aux Sandia National Laboratories [64] et 40 °C d'après le modèle de la thèse précédemment citée). Il devrait participer au déclenchement et à l'escalade de l'explosion mais son importance réelle reste à déterminer. Ainsi, une explosion spontanée a été observée à 50 bars dans un programme du centre nucléaire anglais Winfrith, dans des conditions apparemment peu favorables à une fragmentation thermique [38].

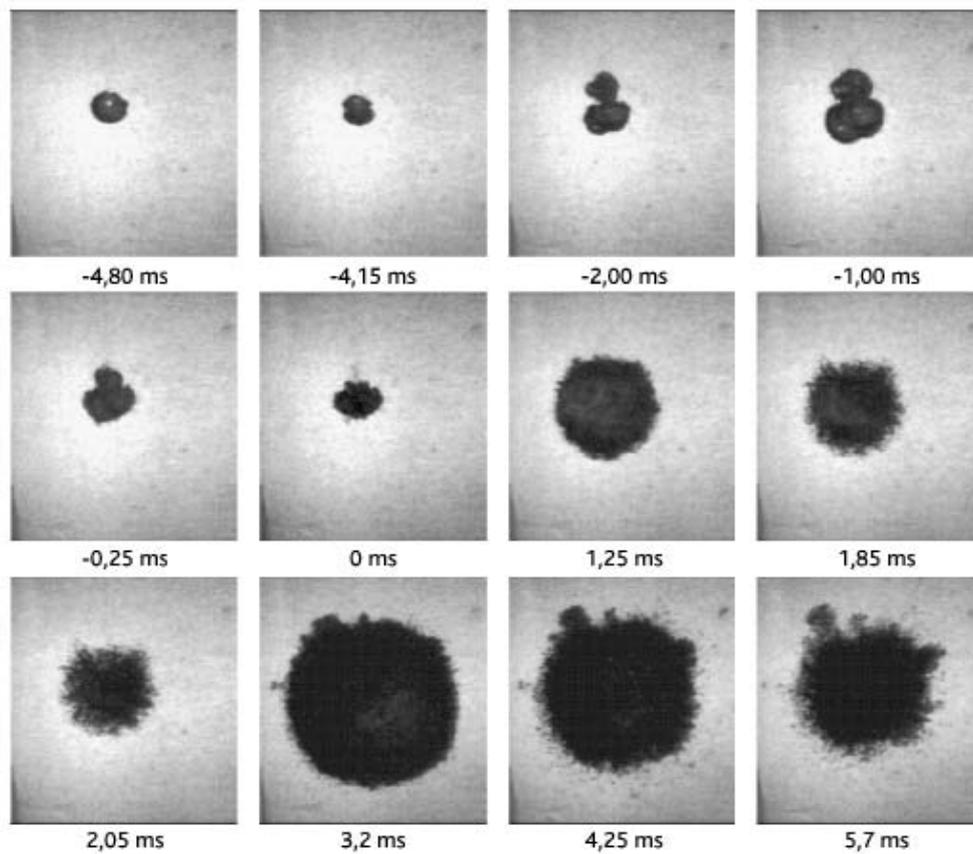


Figure 5.32. Visualisation de l'explosion par « fragmentation thermique » d'une goutte de $\text{WO}_3\text{-CaO}$ ($1\,500\text{ °C}$) dans de l'eau à 25 °C [65].

Le déclenchement peut également avoir lieu par un encapsulage de réfrigérant par du corium lorsque celui-ci se dépose sur le sol (fond de la section d'essai), ce qui expliquerait les explosions spontanées ayant lieu lors du contact entre le corium et le sol. Par ailleurs, les petites échelles ne favorisent pas les explosions spontanées. Ainsi, les expériences présentant des sections d'essais larges (programmes FITS [32–34] ou TROI [62]) sont plus sujettes à des explosions spontanées que les géométries à section d'essai étroite (KROTOS [37]).

Dans les études probabilistes de sûreté, une probabilité de déclenchement est quelquefois utilisée. Il n'existe cependant pas de quantification probabiliste qui soit fondée sur des arguments physiques précis. Les incertitudes sur le déclenchement de l'explosion amènent donc à considérer que le risque d'explosion de vapeur ne peut pas être éliminé et à étudier les conséquences d'une telle explosion. Cependant, il faut noter que le déclenchement imposé par une perturbation de pression ne conduit pas nécessairement à une interaction susceptible de mettre en danger les structures si les conditions de température et de pression ne sont pas réunies. Ainsi, dans les calculs comme dans certaines expériences, certaines situations avec notamment un fort taux de vide ou une forte solidification ne conduisent pas à une explosion mettant en danger les structures (voire à pas d'explosion du tout).

5.2.3.2.3. Explosion

L'explosion résulte de transferts thermiques très intenses entre le corium et le réfrigérant et de la vaporisation du réfrigérant qui s'ensuit⁸. Pour les explosions violentes, telles que celles obtenues dans l'installation KROTOS (géométrie monodimensionnelle) avec de l'alumine (pics de pression de 500 à 1 000 bars), l'explosion peut être décrite de la façon approximative suivante :

- propagation d'une onde de choc (de type détonation) avec transferts thermiques intenses en configuration isochore ;
- détente de la zone de mélange derrière le passage de l'onde de choc.

En raison de limitations évidentes en matière d'instrumentation, les études expérimentales relatives aux mécanismes précis de l'explosion sont extrêmement délicates. On ne dispose donc que de très peu de données, obtenues dans des conditions dont la représentativité est souvent sujette à caution. Les modèles analytiques, s'agissant de phénomènes complexes souvent hors équilibre, arrivent assez rapidement à des limites. Il est cependant intéressant de noter qu'avec l'accroissement des capacités de calcul, il devient envisageable d'étudier ces phénomènes très locaux avec des outils de simulation numérique (par exemple le logiciel MC3D lui-même, voir plus loin).

Mais, paradoxalement, l'explosion est relativement plus « simple » à modéliser que la phase de prémélange, moyennant des approximations pour la fragmentation fine du corium et les transferts thermiques et massiques entre le corium et le réfrigérant, processus qui sont responsables du pic de pression. En effet, d'une part ces processus sont clairement des mécanismes prépondérants, d'autre part de nombreux aspects peuvent être traités de façon simplifiée, voire négligés, à cause de l'échelle de temps de l'explosion (quelques millisecondes). Les études se concentrent alors sur la compréhension des phénomènes prépondérants de fragmentation fine du corium et d'ébullition du réfrigérant, les deux phénomènes clés, rapidement explicités ci-dessous.

► Fragmentation fine

Les mécanismes de fragmentation sont étonnamment complexes (voir par exemple [66]). La fragmentation fine dans l'eau d'une goutte de corium soumise à une onde de choc est illustrée par la figure 5.33, extraite de la référence [46]. Traditionnellement, les phénomènes de fragmentation sont caractérisés en utilisant le nombre de Weber ($We = (\rho V^2 D / \sigma)$ qui exprime le rapport des forces dynamiques déstabilisantes (ρV^2) sur celle de stabilisation par la tension superficielle (σ / D)). Quand le nombre de Weber n'est pas trop grand, il se produit en premier lieu un décollement des couches superficielles de la goutte par les frottements avec l'eau. La fragmentation se fait tardivement à l'arrière du film drainé par les frottements. À fort nombre de Weber, les instabilités se produiraient plus en amont et fragmenteraient directement la goutte.

8. Parler de vaporisation quand la pression dépasse la pression critique peut surprendre. On utilise ici un abus de langage pour décrire le fait que, même en conditions supercritiques, les fluides chauds restent moins denses que les fluides froids, ce qui s'apparente à une évaporation.

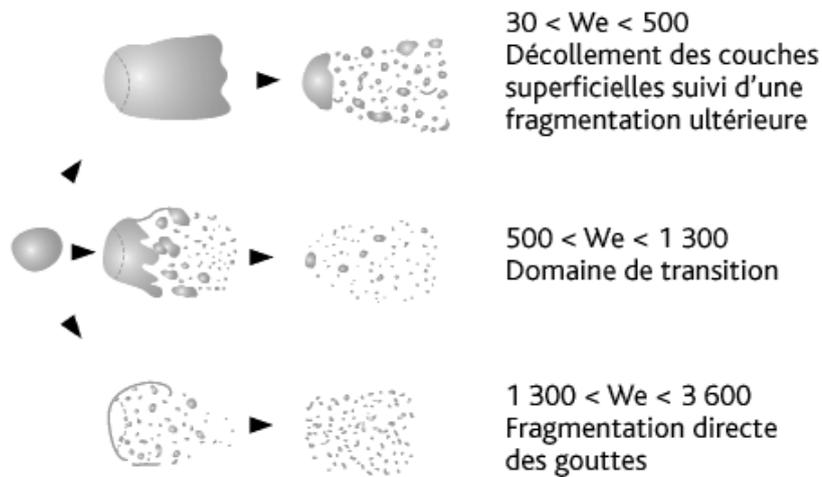


Figure 5.33. Mécanismes de fragmentation fine observés par Bürger *et al.* [46] en fonction du nombre de Weber ($\rho V^2 D / \sigma$).

Lors de la fragmentation fine du corium, la taille des gouttes diminue d'un à deux ordres de grandeur en un temps de l'ordre de la milliseconde. Il existe des divergences d'appréciation sur la façon dont le phénomène se développe. Les études réalisées par l'IRSN avec le logiciel MC3D suggèrent que la fragmentation fine du corium résulte d'instabilités de cisaillement de type Kelvin-Helmholtz (dus à la différence entre les vitesses d'écoulement des gouttes de corium et du réfrigérant). Ces études ont conduit à l'élaboration d'un modèle décrivant l'évolution de la taille des fragments ; ce modèle est intégré dans le logiciel MC3D.

La solidification du corium est bien sûr de nature à modifier voire inhiber le phénomène, ce qui pourrait expliquer la faiblesse (relative) des explosions observées avec du « corium oxyde » ($UO_2 + ZrO_2$). La modélisation de la solidification lors du prémélange s'avère délicate. Son effet sur la fragmentation fine est difficilement quantifié. Pour certains modèles, la croûte a un effet similaire à une coquille élastique. Cependant, les modèles restent fortement paramétriques à cause des nombreuses approximations et incertitudes concernant, par exemple, les propriétés mécaniques des couches de corium solide.

► Mécanismes de mise en pression

Les premiers modèles d'explosion de vapeur [47] supposaient un équilibre instantané entre les fragments de corium produits et le réfrigérant ; dans ces modèles, la montée en température du réfrigérant due au contact direct avec les fragments de corium chauds entraîne directement la montée en pression, soit par ébullition, soit simplement par dilatation thermique. Cette approche a été affinée par Theofanous [48] avec l'approche dite de « micro-interaction » qui considère que seule une fraction de l'eau est chauffée. Le terme de « micro-interaction » traduit le fait

que l'interaction entre le fragment et l'eau est très locale et qu'une partie de l'eau n'intervient pas dans les faits (sauf à transmettre la pressurisation). Les observations montrent qu'en réalité les fragments de corium chauds sont entourés d'un mince film de vapeur qui affecte les transferts thermiques entre les fragments de corium et le réfrigérant et la vaporisation du réfrigérant. Le modèle d'interaction entre les fragments de corium et le réfrigérant introduit dans le logiciel MC3D fait l'hypothèse que la montée en pression résulte de la vaporisation accompagnant les transferts thermiques au travers du film de vapeur entre les fragments de corium chaud et le réfrigérant (modèle dit de « déséquilibre ») ; ce modèle, plus mécaniste *a priori*, suppose cependant la connaissance des transferts massiques associés aux transferts thermiques entre fragments de corium (d'une taille de 100 μm en moyenne dans les expériences KROTOS) et le réfrigérant. Rappelons que ces transferts ont lieu au cours d'un transitoire de pression de quelques centaines de bars en quelques millisecondes, conditions difficilement accessibles à l'expérience.

5.2.3.3. Programmes expérimentaux, modélisations et codes de calcul

5.2.3.3.1. Notion de rendement mécanique

En préalable à l'exposé des principaux programmes expérimentaux, il est important de discuter de la notion de rendement mécanique, souvent utilisée pour caractériser l'intensité d'une explosion dans les expériences (et les premiers modèles thermodynamiques). Cette notion vise à traduire le rendement du transfert de l'énergie thermique contenue dans le combustible, source d'énergie de l'explosion (hors phénomènes chimiques), en énergie mécanique. Cette notion est en réalité assez floue. L'énergie mécanique en question peut en effet être définie de plusieurs manières. Dans les premières estimations, l'énergie considérée était celle liée à la mise en pression globale du système, c'est-à-dire de l'atmosphère gazeuse dans la section d'essai (compression supposée adiabatique). Cette définition a en fait posé de grosses difficultés et l'expression de l'énergie a été revue plusieurs fois. Par la suite, il a été jugé préférable d'utiliser l'énergie cinétique du mélange. Pour éviter les confusions, on parlera dans la suite de rendement cinétique. Cette énergie cinétique est également impossible à mesurer avec précision et est en général obtenue *via* l'évaluation de l'impulsion du chargement (intégrale de la mise en pression, $I = S \int \Delta P dt$, S étant la surface du fond de la section d'essai sur laquelle s'applique le chargement de pression ΔP). En effet, si le mélange est supposé indéformable (tel un bouchon) et est expulsé par l'explosion, l'énergie cinétique du mélange est alors approximée par l'expression $I^2/2M$, M étant la masse du mélange. Cette approximation minimise l'énergie réelle mais donne des ordres de grandeurs acceptables.

La notion de rendement doit donc être utilisée avec précaution et la comparaison d'une expérience à une autre doit être uniquement qualitative.

5.2.3.3.2. Programmes expérimentaux

Le tableau 5.4 indique les principaux programmes qui ont permis d'étudier le prémélange ou l'explosion de vapeur à partir de jets de corium ou de matériaux

simulants, et dont les résultats ont servi de base à l'élaboration et à la qualification de modèles de calcul. Le programme FITS a été le programme « pionnier » en la matière ; il a été réalisé par les laboratoires Sandia aux États-Unis et a comporté de nombreuses expériences, dans des configurations diverses et avec divers matériaux [38–41]. En particulier, des explosions spontanées et violentes ont été obtenues avec un corium constitué d'un mélange $UO_2 + ZrO_2$ -acier (les essais correspondants sont malheureusement très peu documentés) [49]. Le programme s'est terminé par la destruction inattendue de la boucle lors de l'essai RC2. Ces expériences ne sont cependant pas utilisées pour la qualification des logiciels car les conditions expérimentales de mise en contact des fluides sont souvent mal connues et peuvent difficilement être reproduites dans les calculs.

Concernant le prémélange, la base de résultats de référence est celle des expériences FARO (réalisées par le Joint Research Centre de la Commission européenne (JRC) à Ispra en Italie) [54] qui ont mis en œuvre 100 à 200 kg de « corium oxyde » $UO_2 + ZrO_2$. L'analogue du programme FARO pour l'étude de l'explosion a été le programme KROTOS (réalisé également au JRC Ispra) [37], à une échelle plus petite cependant (volume de combustible de l'ordre d'un litre) ; ce programme a mis en évidence une plus faible propension à l'explosion ainsi que des chargements en pression moindres pour un « corium oxyde » $UO_2 + ZrO_2$ comparativement aux cas avec de l'alumine Al_2O_3 . Ce résultat a fait l'objet de nombreuses spéculations sur l'« effet matériau ». Cependant, la différence de densité entre le « corium oxyde » et l'alumine peut expliquer ce résultat ; la plus faible densité de l'alumine a un double effet : une fragmentation des jets en particules plus grosses d'où une moindre vaporisation et une moindre solidification ; une augmentation du volume de combustible dans le mélange à cause d'une moins grande vitesse de dépôt sur le fond de la section d'essai. Les rendements cinétiques (§ 5.2.3.3.1) des explosions les plus fortes ont été évaluées à environ 2 %, valeurs similaires à celles des explosions dans le programme FITS.

Il faut mentionner de plus des programmes dont les résultats ont été peu exploités soit à cause d'une complexité particulière, soit à cause de limitations dans la diffusion des résultats. Dans la première catégorie, se trouvent en particulier les essais ZREX d'Argonne National Laboratory aux États-Unis [50] qui ont mis en évidence une augmentation très importante de l'intensité de l'explosion due à l'oxydation du zirconium contenu dans des mélanges $Zr + ZrO_2$ et Zr -acier.

Le programme TROI, conduit par le Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) en Corée du Sud, a permis de confirmer la possibilité d'explosions spontanées avec du corium [56].

Tableau 5.4. Programmes expérimentaux relatifs à l'étude de l'explosion de vapeur lors d'une interaction entre un jet de corium ou de matériaux simulants et le réfrigérant (eau).

Pro-gramme	Laboratoire	Type d'essais	Matériaux	Conditions et faits marquants
FITS [38 à 41]	Sandia (États-Unis)	Explosion	Thermite Al_2O_3 -Fe ou corium Quelques kilogrammes	<ul style="list-style-type: none"> • 1^{er} programme important. • Nombreux essais. • Série d'essais MDC avec du corium : explosions spontanées de rendement de l'ordre de 2 %. • Série d'essais RC avec de la thermite : expérience RC2 avec le plus haut rendement observé (8-15 %, travail de compression du gaz).
CCM [53]	ANL (États-Unis)	Prémélange	Mélanges $UO_2 + ZrO_2$ -acier à 2 800 °C Quelques kilogrammes	<ul style="list-style-type: none"> • Conditions bien maîtrisées. • 6 essais dans différentes conditions (dont géométrie, diamètres de jet et température de l'eau). • Pas d'explosion spontanée.
FARO [54, 55]	CCR Ispra (Commission européenne)	Prémélange Explosion	$UO_2 + ZrO_2$ à 2 800 °C 100 à 200 kilogrammes	<ul style="list-style-type: none"> • Programme très important. • Référence pour la qualification des modèles de prémélange. • Masses importantes. • Pas d'explosion spontanée. • Un essai d'explosion avec "trigger" (rendement faible).
KROTOS [37]	CCR Ispra (Commission européenne)	Explosion	Sn à 1 000 °C Al_2O_3 à 2 300-2 800 °C $UO_2 + ZrO_2$ à 2 800 °C 1 litre	<ul style="list-style-type: none"> • Programme de référence pour validation des logiciels d'explosion. • Monodimensionnel (section d'essai étroite). • Influence de la composition (alumine ou corium $UO_2 + ZrO_2$). • Pas d'explosion spontanée avec du corium.
ZrEX-ZrSS	Sandia (États-Unis)	Explosion	Mélanges Zr + ZrO_2 Zr-acier Quelques kilogrammes	<ul style="list-style-type: none"> • Explosions initiées ("trigger"). • Très fort impact du taux de Zr sur rendement.
TROI [56]	KAERI (Corée du Sud)	Explosion + Prémélange	Corium $UO_2 + ZrO_2$ Environ 10 kilogrammes	<ul style="list-style-type: none"> • Conditions mal définies. • Explosions spontanées. • Faibles rendements. • Seulement 2 kilogrammes dans le mélange au moment de l'explosion. • Influence de la composition du corium.

En support à la modélisation, des programmes, souvent nationaux, ont été menés dans l'objectif d'étudier des phénomènes particuliers (transferts thermiques, fragmentation, etc.). En particulier, les essais TREPAM (CEA/IRSN) ont permis de préciser les transferts de chaleur associés aux fragments de corium dans des conditions tout à fait représentatives (pressions pouvant aller jusqu'à 240 bars, différences de vitesse entre fragments et eau pouvant aller jusqu'à 46 m/s, températures de l'ordre de 2 200 °C). Concernant la fragmentation fine, les programmes DROPS (réalisés à l'Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE) de Stuttgart en Allemagne puis au CEA) [60] et MISTEE (réalisé au Royal Institute of Technologie (KTH) de Stockholm en Suède) [61] ont été consacrés à l'étude de la fragmentation des gouttes de corium dans l'eau en utilisant des matériaux simulants (métaux liquides en général) à des températures relativement basses.

Pour la validation des codes, divers programmes ont également cherché à représenter les jets de corium par des jets de billes solides, ce qui permet de s'affranchir des difficultés liées à la fragmentation pour se concentrer sur les aspects liés aux transferts thermiques et aux frottements. En particulier le programme QUEOS réalisé par le Forschungszentrum Karlsruhe en Allemagne [51] a permis d'étudier le prémélange de paquets de sphères solides pour des températures allant jusqu'à 2 200 °C.

À l'issue des programmes décrits plus haut, il subsistait au début des années 2000 de nombreuses incertitudes sur les explosions de vapeur pouvant résulter d'interactions entre un corium chaud et le réfrigérant. Ce constat a motivé le lancement du programme international SERENA, décrit plus bas, dans la ligne des conclusions du "*Technical opinion paper on fuel coolant interaction*" de l'OCDE et du rapport de synthèse publié en 2001 par l'OCDE concernant les recherches en sûreté nucléaire conduites dans les pays de l'OCDE qui indiquaient l'intérêt de maintenir un effort de R&D sur l'interaction corium-eau [52].

Le programme international SERENA (OCDE) s'est déroulé de 2001 à 2005, avec pour objectif d'établir un état de l'art relatif à l'explosion de vapeur par interaction entre le corium chaud et le réfrigérant lors d'un accident de fusion du cœur et d'évaluer la capacité des logiciels existants à décrire cette interaction. Il a permis de montrer qu'il existait de nombreuses divergences entre les experts, liées principalement au faible nombre de résultats expérimentaux, d'où la nécessité d'un nouveau programme expérimental.

Ce programme a été mis en œuvre dans le cadre d'une seconde phase du programme, dite SERENA-II qui s'est déroulée de 2008 à 2012 ; elle a eu pour principal objectif d'étudier l'effet de la composition du corium sur l'explosion lors d'essais globaux réalisés avec du corium et d'obtenir des résultats permettant d'accroître la compréhension sur certains points et de qualifier des outils de calcul.

Les études menées lors de la première phase du programme ont permis de conclure que le risque de défaillance de l'enceinte de confinement du fait d'une explosion de vapeur dans la cuve du réacteur (mode « ALPHA ») était faible et que les études lors

de la deuxième phase du programme devaient porter en priorité sur les explosions de vapeur qui pourraient survenir dans le puits de cuve après une défaillance de la cuve. Du point de vue des phénomènes mis en jeu, il n'y a pas de différences fondamentales entre les deux cas d'interaction en cuve et hors cuve (dans le puits de cuve). La différence se situe dans les conditions de mises en contact entre les fluides. En particulier, le mode de transfert du corium dans l'eau est différent : dans le cas hors cuve, il dépend des conditions de percée de la cuve et a lieu plutôt sous la forme d'un jet large, non central, éjecté éventuellement sous pression. La nature du corium peut également être différente, avec en particulier une forte probabilité de séparation (dans le corium en fond de cuve) des phases métalliques (oxydables) et des phases oxydées. La pression dans l'enceinte est bien sûr beaucoup plus basse en général que dans la cuve, et la température de l'eau est supposée plus froide. Les études menées dans ce cadre ont également permis de déduire que les principales incertitudes relatives à l'explosion de vapeur provenaient d'un manque de résultats détaillés sur la zone de prémélange et sur les différences de comportement entre le corium et les matériaux simulants comme l'alumine (effet du matériau) lors de l'interaction avec le réfrigérant. Le caractère moins énergétique de l'interaction entre le corium et l'eau par rapport à l'interaction entre l'alumine et l'eau a été mis en évidence lors d'un nombre réduit d'expérimentations. Cette constatation méritait d'être confirmée et expliquée.

La seconde phase du programme SERENA a été proposée par le CEA (appuyé par l'IRSN et EDF) et les deux instituts sud-coréens KAERI et KINS (Korea Institute of Nuclear Safety) dans le but d'obtenir les informations supplémentaires sur la configuration d'écoulement du prémélange, ainsi que sur les effets des matériaux et de la géométrie. Quatorze organisations y participent : le CEA, l'IRSN et EDF pour la France, les instituts KAERI et KINS pour la Corée du Sud, IKE-Stuttgart (Institut für Kernenergetik und Energiesysteme) et GRS (Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit) pour l'Allemagne, le JNES (Japan Nuclear Energy Safety) pour le Japon, l'AECL (Atomic Energy of Canada Limited) pour le Canada, l'US NRC (US Nuclear Regulatory Commission) et l'université de Washington pour les États-Unis, le JSI (Jozef Stefan Institute) pour la Slovénie, le SKI (Swedish Nuclear Power Inspectorate) et le KTH pour la Suède, le PSI (Paul Scherrer Institute) pour la Suisse, le VTT (Technical Research Centre) pour la Finlande et SUEZ/TRACTEBEL pour la Belgique. Cette phase comporte des expérimentations dans l'installation KROTOS du CEA et l'installation TROI de KAERI [62] :

- l'installation KROTOS est composée d'une section d'essai de petites dimensions (20 cm de diamètre, 1 m de hauteur d'eau) qui permet de mettre en œuvre de 3 à 5 kg de corium ou de matériau simulant. L'installation a été transférée du JRC ISPRA à Cadarache et a été améliorée. Elle est maintenant équipée en particulier d'un dispositif de radioscopie qui permet d'obtenir des informations plus détaillées sur le prémélange et sur l'état initial de l'explosion. Cependant, l'installation KROTOS reste essentiellement dédiée à l'étude de l'explosion car la faible masse de corium permet *a priori* difficilement de valider les modèles développés pour le prémélange (certains aspects du prémélange, tels que la fragmentation du jet de corium sont sensibles aux effets d'échelle) ;

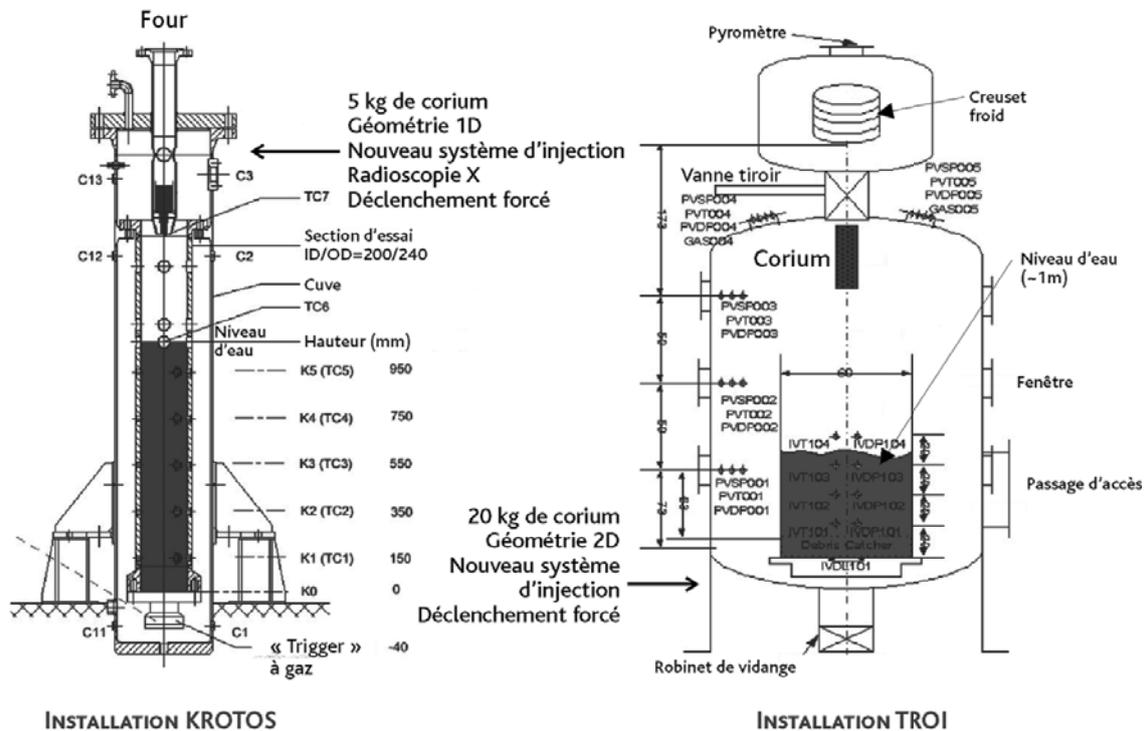


Figure 5.34. Installations expérimentales KROTOS (CEA, France) [37] et TROI (KAERI, Corée du Sud) [62] – Principales caractéristiques et instrumentations.

- l'installation TROI a été améliorée pour les besoins du programme et permet d'injecter jusqu'à 30 kg de corium ou de matériau simulant dans un bac de dimensions plus importantes que celles de l'installation KROTOS ; elle permet notamment l'étude du développement de l'explosion en géométrie tridimensionnelle.

La deuxième phase du programme SERENA prévoit la mise en œuvre de mélanges de coriums de diverses compositions, typiques de celles attendues lors d'un accident de fusion du cœur d'un réacteur de puissance. Ses objectifs principaux sont :

- de fournir des informations sur la distribution des fragments de corium lors du prémélange en vue de valider les logiciels ;
- d'étudier l'effet des matériaux et de comprendre le comportement faiblement énergétique des interactions corium-eau observées jusqu'ici en appréciant en particulier si ce comportement peut être transposé au cas d'un réacteur de puissance ou s'il est lié à certaines spécificités expérimentales.

5.2.3.3.3. Les logiciels

Le logiciel MC3D est développé et utilisé en France pour la simulation numérique, en particulier des deux phases de prémélange et d'explosion [58, 59]. Son développement par le CEA pour simuler l'explosion de vapeur a été largement financé par l'IRSN et en partie par EDF. EDF a interrompu son soutien au développement de ce code en 2002, puis l'a repris en 2009 en même temps que sa décision de participer à la phase 2 du programme SERENA. Depuis 2003, l'IRSN gère et développe le logiciel avec une

collaboration du CEA. Depuis 2006, participent également au développement ou à la qualification du logiciel l'institut slovène JSI (thèse sur la solidification) et l'université allemande IKE de Stuttgart (analyse des modèles et des résultats fournis par le code). Le logiciel MC3D est maintenant considéré comme un des outils les plus évolués pour la simulation de l'explosion de vapeur (avec principalement JEMI/IDEMO [Allemagne, GRS/IKE], PM-ALPHA/ESPROSE [États-Unis, UCSB], et JASMINE [Japon]) [59]. MC3D dispose d'un grand nombre de fonctionnalités décrites plus loin. Il est distribué à divers organismes internationaux pour l'étude de l'interaction combustible-réfrigérant (également de l'échauffement direct de l'enveloppe (DCH)) dans les réacteurs nucléaires.

Un logiciel de calcul de l'explosion de vapeur doit traiter les nombreuses interactions entre les différentes phases du corium et du réfrigérant. Ceci implique une modélisation très complexe avec des schémas numériques précis, en particulier pour en assurer la robustesse. En outre, certains logiciels tels que MC3D sont conçus avec le double objectif de fournir des résultats utilisables pour l'appréciation de la sûreté des installations nucléaires et pour aider à la compréhension des phénomènes. Cette double finalité (études/recherche) implique des contraintes souvent difficiles à concilier (robustesse contre précision, nombre de paramètres laissés au choix de l'utilisateur).

Dans l'application PREMELANGE du logiciel MC3D, le corium peut être modélisé de trois manières différentes selon qu'il se trouve dans le jet, sous forme de gouttes ou sous forme de fragments fins :

- le jet de corium est modélisé par un champ continu en utilisant une méthode de suivi de volume (VOF-PLIC, voir la figure 5.35) ; cette particularité numérique est difficile à gérer mais sa prise en compte est une spécificité du logiciel MC3D qui permet un domaine d'investigation plus large que celui des autres logiciels de calcul ;
- les gouttes de corium sont modélisées par un champ de gouttes en utilisant une méthode eulérienne ; les gouttes sont issues de la fragmentation du champ continu ;
- les fragments fins peuvent être modélisés par un champ de fragments fins qui est optionnel.

Autre spécificité, le logiciel MC3D permet de prendre en compte un grand nombre de gaz incondensables et l'oxydation du corium en utilisant un modèle paramétrique. On rappelle en effet que l'oxydation pendant l'explosion peut induire une augmentation considérable de l'énergie de l'explosion. Malheureusement, l'oxydation, dans les conditions de l'explosion de vapeur, est un phénomène mal caractérisé (voire mal compris) et pour l'heure, le modèle n'est pas suffisamment prédictif.

Pour la modélisation de l'explosion, il existe moins de différences de fonctionnalités entre les logiciels et la plupart utilisent deux champs pour le combustible, à savoir un champ de gouttes et un champ de fragments issus de la fragmentation des gouttes [59].

Un certain nombre de logiciels tels que PM-ALPHA et IDEMO utilisent l'approche dite de « micro-interaction » où le chauffage d'une fraction de l'eau conduit à la montée

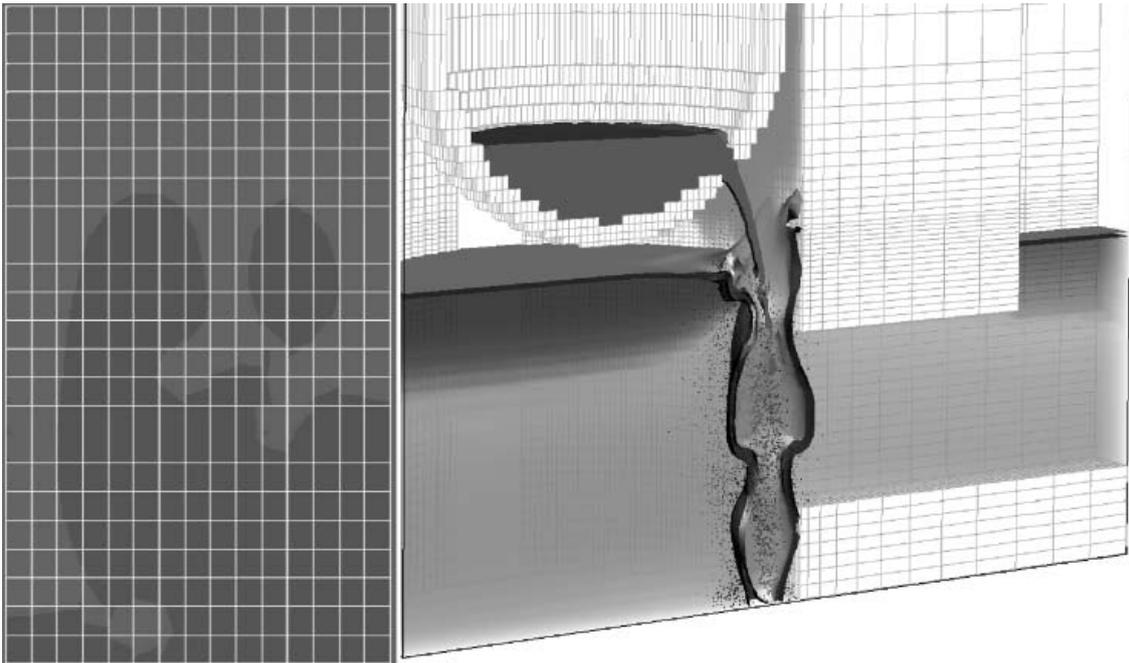


Figure 5.35. Illustrations de la méthode de suivi de volume de type VOF-PLIC du logiciel MC3D pour un jet continu de corium (champ continu en rouge à droite ou marron à gauche, champ de gouttes représenté par les points). De gauche à droite : instabilités de Rayleigh-Taylor, éjection de corium d'une cuve sous pression (passage à un écoulement diphasique à la brèche), calcul 3D d'une situation d'interaction hors de la cuve avec visualisation de l'éjection du combustible hors de la cuve [58] et interaction avec l'eau (en bleu) dans le puits de cuve..

en pression. Les modèles des logiciels MC3D et JASMINE supposent, comme pour le pré-mélange, que la montée en pression est obtenue par la vaporisation en film autour des fragments produits lors de l'explosion. La différence entre les deux approches fait l'objet d'analyses conjointes de l'IRSN et de IKE (logiciel IDEMO) afin de mieux comprendre les implications des diverses approximations et hypothèses.

Bien que les capacités de prédiction de ces différents outils restent encore limitées (c'est-à-dire qu'ils présentent des incertitudes importantes), ils ont permis de réelles avancées dans la compréhension globale des phénomènes et des multiples interactions. Le logiciel MC3D, malgré des efforts constants pour l'amélioration de l'interface avec l'utilisateur, reste difficile à utiliser par sa complexité due elle-même à la complexité des phénomènes mis en jeu.

5.2.3.4. Bilan et perspectives

Le bilan des recherches sur l'explosion de vapeur peut paraître mitigé compte tenu des problèmes qui restent à résoudre. Cela est dû d'une part à la complexité des phénomènes mis en jeu lors des interactions entre le corium chaud et le réfrigérant, d'autre part à la difficulté d'obtenir des données expérimentales relatives à ces interactions pour des matériaux avec une composition typique d'un corium formé lors d'un accident de fusion du cœur d'un réacteur de puissance.

Sur le plan expérimental, la complexité et le coût élevé des essais d'interaction mettant en œuvre des coriums contenant de l'uranium, ont conduit à une mutualisation internationale des efforts qui s'est traduite, en particulier, par le programme SERENA de l'OCDE. Ce programme vise à combler le manque de données expérimentales pour des coriums représentatifs d'un accident d'un réacteur de puissance.

Sur le plan de la modélisation, les outils de calcul intègrent une description de plus en plus précise de la phase de prémélange et de la phase d'explosion. Dans ce domaine également, une mutualisation des efforts est nécessaire ; elle se fait *via* des partenariats ou *via* des échanges, en particulier dans le cadre du réseau d'excellence européen SARNET (§ 1.3.2). Les points-clés les plus délicats à décrire sont la fragmentation du jet lors du prémélange, la solidification du corium et son impact sur l'explosion. Une meilleure description des processus de mise en pression pendant l'explosion est également nécessaire.

Sur le plan de la sûreté des réacteurs de puissance, il existe un large consensus pour penser que le risque de défaillance directe d'une enceinte de confinement dû à une explosion de vapeur dans la cuve est faible (au moins pour les réacteurs avec une large enceinte comme les REP français). En revanche, dès lors que le noyage du puits de cuve lors d'un accident de fusion du cœur est une des mesures de limitation des conséquences de ce type d'accident qui est mise en place ou envisagée pour les réacteurs en exploitation (en vue de refroidir le corium dans le puits de cuve et de ralentir l'interaction entre le corium et le béton du puits de cuve, voir le paragraphe 5.3), le risque de défaillance de l'enceinte de confinement du fait d'une explosion de vapeur dans le puits de cuve doit être apprécié. Les questions à résoudre concernent également la tenue des structures en béton de l'enceinte de confinement, du fait des chargements de pression induits par une explosion de vapeur.

Il est à noter que, dans le cas du réacteur EPR, le risque d'explosion de vapeur dans le puits de cuve doit être « pratiquement éliminé » par la mise en place de dispositions visant à garantir que le puits de cuve ne contienne pas d'eau au moment de la coulée du corium.

Références

- [1] *Nuclear Engineering and Design*. Special issue on DCH, Vol. 164, 1996.
- [2] J.L. Binder, L.M. McUumber, B.W. Spencer, Direct Containment Heating Integral Effects Tests at 1/40 Scale in Zion Nuclear Power Plant Geometry, NUREG/CR-6168, ANL-94/18, 1994.
- [3] T.K. Blanchat, M.D. Allen, M.M. Pilch, R.T. Nichols, Experiments to Investigate Direct Containment Heating Phenomena with Scaled Models of the Surry Nuclear Power Plant, NUREG/CR-6152, SAND93-2519, 1994.
- [4] T.K. Blanchat, M.M. Pilch, M.D. Allen, Experiments to Investigate Direct Containment Heating Phenomena with Scaled Models of the Calvert Cliffs Nuclear Power Plant, NUREG/CR-6469, SAND96-2289, 1997.

- [5] L. Meyer, G. Albrecht, M. Kirstahler, M. Schwall, E. Wachter, G. Wörner, Melt Dispersion and Direct Containment Heating (DCH) Experiments in the DISCO-H Test Facility, FZKA 6988, 2004.
- [6] L. Meyer, M. Gargallo, M. Kirstahler, M. Schwall, E. Wachter, G. Wörner, Low Pressure Corium Dispersion Experiments in the DISCO Test Facility with Cold Simulant Fluids, FZKA 6591, 2002.
- [7] L. Meyer, G. Albrecht, C. Caroli, I. Ivanov, Direct containment heating integral effects tests in geometries of European nuclear power plants, *Nuclear Engineering and Design* **239** (10), 2070-2084, 2009.
- [8] M.M. Pilch, M.D. Allen, Closure of the direct containment heating issue for Zion, *Nuclear Engineering and Design* **164**, 37-60, 1996.
- [9] K.K. Murata, D.C. Williams, J. Tills, R.O. Griffith, R.G. Gido, L.G. Tagios, F.J. Davis, G.M. Martinez, K.E. Washington, Code Manual for CONTAIN 2.0: A Computer Code for Nuclear Reactor Containment Analysis, NUREG/CR-6533, SAND97-1735, 1997.
- [10] D.C. Williams, R.O. Griffith, Assessment of cavity dispersal correlations for possible implementation in the CONTAIN code, SAND94-0015, 1996.
- [11] R. Meignen, S. Mikasser, C. Spengler, A. Bretault, Synthesis of analytical activities on Direct Containment Heating, ERMSAR-2007, FzK GmbH, Germany, 12-14 June 2007, session-3, 2007.
- [12] R. Meignen, S. Mikasser, C. Spengler, A. Bretault, D. Plassart, L. Meyer, Direct Containment Heating: Comparison and Analysis of ASTEC, CONTAIN and MAAP, Calculations of the LACOMERA L-1 Test, SARNET-CONT-P09, 2004.
- [13] R. Meignen, D. Plassart, C. Caroli, L. Meyer, D. Wilhelm, Direct Containment Heating at Low Primary Pressure: Experimental Investigation and Multi-dimensional Modeling, NURETH-11, Avignon, France, 2005.
- [14] S. Mikasser, R. Meignen, Computation and analysis of the Direct Containment Heating dispersion process with the multiphase flow software MC3D, *Proceedings of ICAPP 2007*, Nice, France, May 13-18, 2007.
- [15] W.W. Tarbell, M. Pilch, Pressurized melt ejection into water pools, Sandia National Laboratories, NUREG/CR-3916, 1991.
- [16] D. Karwat *et al.*, State-of-the-Art Report on containment thermalhydraulics and hydrogen distribution, rapport NEA/CSNI/R(1999)16.
- [17] H. Cheikhravat, Étude expérimentale de la combustion de l'hydrogène dans une atmosphère inflammable en présence de gouttes d'eau, Thèse de l'université d'Orléans, septembre 2009.
- [18] H. J. Allelein, K. Fischer, J. Vendel, J. Malet, E. Studer, S. Schwarz, M. Houkema, H. Paillère, A. Bentaib, International Standard Problem ISP-47 on containment thermalhydraulics, Rapport Final, rapport NEA/CSNI/R(2007)10.

- [19] (a) D. Leteinturier *et al.*, Essais H2PAR : période mi-98 à fin 2000 synthèse des essais conclusions du programme, Rapport IRSN/DPEA/DIR/02/01 – Référence non publique.
- (b) E. Studer, M. Durin, M. Petit, P. Rongier, J. Vendel, D. Leteinturier, S. Dorofeev, Eurosafe Forum, <http://www.eurosafe-forum.org/files/b4.pdf>
- [20] J. Loesel-Sitar *et al.*, Environmental Qualification of Hydrogen Recombiners, Test Report, Rapport AECL 00-68460-TR-001 – Référence non publique.
- [21] W. Breitung *et al.*, OECD State-of-the-Art Report on Flame Acceleration and Deflagration-to-Detonation Transition In Nuclear Safety, NEA/CSNI/R(2000)7.
- [22] S. Dorofeev *et al.*, Large scale experiments for validation of hydrogen combustion models and criteria, article présenté au Jahrestagung Kerntechnik, Stuttgart, mai 2002.
- [23] E. Bachellerie *et al.*, Generic approach for designing and implementing a passive autocatalytic recombiner PAR-system in nuclear power plant containments, *Nuclear Engineering and Design* **221** (1-3), 151-165, 2003.
- [24] E. Bachellerie *et al.*, EC PARSOAR project - State-of-the-art report on passive autocatalytic recombiners - Handbook guide for implementing catalytic recombiners, Report EUR, juin 2002.
- [25] W. Breitung *et al.*, Integral large scale experiments on hydrogen combustion for severe accident code validation HYCOM, *Nuclear Engineering and Design* **235** (2-4), 253-270, 2005.
- [26] J. Malet *et al.*, OECD International Standard Problem ISP-47 on containment thermal-hydraulics - Conclusions of the TOSQAN part, *Nuclear Engineering and Design* **240** (10), 3209-3220, 2010.
- [27] E. Studer, J.-P. Magnaud, F. Dabbene, I. Tkatchenko, International Standard Problem on containment thermal-hydraulics ISP47, step 1 – Results from the MISTRA exercise, *Nuclear Engineering and Design* **237** (5), 536-551, 2007.
- [28] D. Paladino, J. Dreier, PANDA: a multipurpose integral test facility for LWR safety investigations, *Science and Technology of Nuclear Installations*, vol. 2012, Article ID 239319, 9 pages.
- [29] P. Rongier, T. Bonhomme, C. Perez, 1^{er} Synthèse H2PAR – Résultats expérimentaux : Fiches d'expériences, expériences E1 à E19 et PHEB 02, Rapport IPSN/DPRE/SERE n° 98/014 (I) – Référence non publique.
- [30] P. Rongier, T. Bonhomme, C. Perez, 2^e Synthèse expérimentale H2PAR - Détermination des conditions d'inflammation d'un mélange Air/H₂/H₂O par les recombinateurs Siemens et AECL – Fiches d'expériences, Rapport IPSN/DPRE/SERLAB n° 99/004 (I) – Référence non publique.

- [31] A.A. Dehbi, The effects of noncondensable gases on steam condensation under turbulent natural convection conditions, Ph.D. Thesis, MIT, USA, 1991.
- [32] W. Ambrosini, N. Forgiome, A. Manfredini, F. Oriolo, On various forms of the heat and mass transfer analogy: discussion and application to condensation experiments, *Nuclear Engineering and Design* **236**, 1013–102, 2006.
- [33] ERCOSAM: containment thermal-hydraulics of current and future LWRs for severe accident management, SP5-Euratom, collaborative project, small or medium-scale focused research project, FP7-Fission-2009, Grant agreement n° 249691, 2010.
- [34] ISP-49 on hydrogen combustion, Rapport NEA/CSNI/R(2011)9.
- [35] OECD/NEA SETH-2 project PANDA and MISTRA experiments, final summary report, Rapport NEA/CSNI/R(2012)5.
- [36] OECD/NEA THAI project final report – Hydrogen and fission product issues relevant for containment safety assessment under severe accident conditions, Rapport NEA/CSNI/R(2010)3.
- [37] I. Huhtiniemi, D. Magallon, H. Hohmann, Insight into steam explosions with corium melts in KROTOS, *Nuclear Engineering and Design* **204**, 391-400, 2001.
- [38] G. Berthoud, L'interaction corium-eau, synthèse et analyse des résultats expérimentaux, Note STT/LPML/87/28/C, 1987. Référence non publique.
- [39] D.E. Mitchell, M.L. Corradini, W.W. Tarbell, Intermediate Scale Steam Explosion Phenomena: Experiments and Analysis, NUREG/CR-2145, SAND81-0124, 1981.
- [40] D.E. Mitchell, N.A. Evans, Steam Explosion Experiments on Intermediate Scale: FITSB Series, NUREG/CR-3983, SAND83-1057, 1986.
- [41] B.W. Marshall Jr., Recent Fuel-Coolant Interaction Experiments Conducted In The FITS Vessel, SAND87-2467C, 1988.
- [42] R. Meignen, G. Berthoud, Fragmentation of molten fuel jets, *Proceedings of the International Seminar of Vapor Explosions and Explosive Eruptions*, pp. 83–89, 1997.
- [43] J. Namiech, G. Berthoud, N. Coutris, Fragmentation of a molten corium jet falling into water, *Nuclear Engineering and Design* **229** (2-3), 265-287, 2004.
- [44] SERENA – Steam Explosion Resolution for Nuclear applications, final report, December 2006. NEA/CSNI/R(2007)11. <http://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2007/csni-r2007-11.pdf>.
- [45] J. Lamome, R. Meignen, On the explosivity of a molten drop submitted to a small pressure perturbation, *Nuclear Engineering and Design* **238** (12), 3445-3456, 2008.

- [46] M. Bürger, S.H. Cho, E.V. Berg, A. Schatz, Modelling of drop fragmentation in thermal detonation waves and experimental verification, *Specialists Meeting on FCI*, Santa Barbara, California, USA, Jan 5-8, 1993.
- [47] S.J. Board, R.W. Hall, R.S. Hall, Detonation of fuel coolant explosions, *Nature* **254** (3), 319–321, 1975.
- [48] W.W. Yuen, T.G. Theofanous, On the existence of multiphase thermal detonations, *International Journal of Multiphase Flow* **25** (6-7), 1505-1519, 1999.
- [49] M. Berman, Light water reactor safety research program, quaterly report, Janvier-mars 1981, NUREG CR-2163/lof4, SAND81-1216/lof4, 1981.
- [50] D.H. Cho, D.R. Armstrong, W.H. Gunther, Experiments on Interactions Between Zirconium-Containing Melt and Water, NUREG/CR-5372, 1998.
- [51] L. Meyer, QUEOS, An Experimental Investigation of Pre-mixing Phase with hot spheres, *Proc. OECD/CSNI Specialist Meeting on FCI*, Tokai-Mura, Japan, 19-21 mai 1997, p 155-166.
- [52] (a) Technical opinion paper on fuel coolant interaction. Rapport NEA/CSNI/R(99)24, 1999.
- (b) Nuclear Safety Research in OECD Countries, Major Facilities and Programmes at Risk. Rapport NEA#03145, ISBN: 92-64-18468-6, 2001.
- [53] S.K. Wang, C.A. Blomquist, B.W. Spencer, L.M. Mc UMBER, J.P. Schneider, Experimental Study of the Fragmentation and Quench Behaviour of Corium Melts in Water, *Proc. 5th Nuclear Thermal Hydraulics*, San Francisco, 1989, pp. 120-135.
- [54] D. Magallon, H. Hohmann and I. Huhtiniemi, Lessons Learnt from FARO/TERMOS Corium Melt Quenching experiments, *Nuclear Engineering and Design* **189**, 223-238, 1999.
- [55] D. Magallon, I. Huhtiniemi, Energetic event in fuel-coolant interaction test FARO L-33, *ICONE-9 Conference*, Nice, France, 8-12 avril 2001.
- [56] J.H. Song, J.H. Kim, S.W. Hong, B.T. Min, H.D. Kim, The effect of corium composition and interaction vessel geometry on the prototypic steam explosion, *Annals of Nuclear Energy* **33** (17-18), 1437-1451, 2006.
- [57] Characterization of Molten-Fuel Coolant Interaction Processes, EUR 19567 EN, 4th EC Framework Program, 1999.
- [58] R. Meignen, Status of the Qualification Program of the Multiphase Flow Code MC3D, *Proceedings of ICAPP '05*, Seoul, KOREA, 15-19 mai 2005, papier 5081.
- [59] R. Meignen *et al.*, Comparative Review of FCI Computer Models Used in the OECD-SERENA Program, *Proceedings of ICAPP '05*, Seoul, KOREA, 15-19 mai 2005, papier 5087.

- [60] M. Bürger, Comparison and Theoretical Interpretation of Experiments on Hydrodynamic Drop Fragmentation, IKE 2-FB-16, (CEC-RCAMFCI Project, Report INV-MFC(98)-D014), Universität Stuttgart, juillet 1998 – Référence non publique.
- [61] H.S. Park, R.C. Hansson, B.R. Sehgal, Fine fragmentation of molten droplet in highly subcooled water due to vapor explosion observed by X-ray radiography, *Experimental Thermal and Fluid Science* **29** (3), 351-361, 2005.
- [62] J.H. Song, I.K. Park, Y.S. Shin, J.H. Kim, S.W. Hong, B.T. Min, HD Kim, Fuel coolant interaction experiments in TROI using a UO_2 - ZrO_2 mixture, *Nuclear Engineering and Design* **222** (1), 1-15, 2003.
- [63] P. Marmottant, E. Villermaux, On spray formation, *Journal of Fluids Mechanics* **498**, 73-111, January 2004.
- [64] L.S. Nelson, P.M. Duda, Steam explosion experiments with single drops of iron oxide melted with a CO_2 laser, NUREG/CR-2295, SAND81-1346, 1981.
- [65] R.C. Hanson, An experimental study on the dynamics of a single droplet vapor explosion, Doctoral thesis, School of Engineering Science, KTH, Sweden, 2010.
- [66] E. Villermaux, Fragmentation, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 419-446, 2007.