

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

INSTITUT DE PROTECTION ET DE SURETE NUCLEAIRE

**DEPARTEMENT D'ANALYSE DE SURETE**



CEA - DAS - 473

**RAPPORT DAS N° 473 e**

CHARACTERISTICS OF THE AEROSOLS RELEASED  
TO THE ENVIRONMENT AFTER A SEVERE PWR ACCIDENT

CHIAUBET G., MANESSE D. \*

IVe symposium international de radioécologie.  
(Cadarache, 14-18 mars 1988)

CEA - DAS - 473

**RAPPORT DAS N° 473 e**

CHARACTERISTICS OF THE AEROSOLS RELEASED  
TO THE ENVIRONMENT AFTER A SEVERE PWR ACCIDENT

LHIAUBET G., MANESSE D. \*

IVe symposium international de radioécologie.  
(Cadarache, 14-18 mars 1988)

\* DAS/SASC

Mai 1988

CHARACTERISTICS OF THE AEROSOLS RELEASED  
TO THE ENVIRONMENT AFTER A SEVERE PWR ACCIDENT

-----

G. LHIAUBET, D. MANESSE

IPSN / DAS / SASC, BP N° 6 - 92265 FONTENAY AUX ROSES CEDEX

ABSTRACT

In the event of a postulated severe accident on a pressurized water reactor (PWR) involving fuel degradation, gases and aerosols containing radioactive products could be released, with short, medium and long term consequences for the population and the environment.

In the medium and long term, radiological consequences are related to deposition on the ground and vegetation of aerosols containing radioactive fission products. In order to assess the impact of these deposits and prepare post-accident corrective actions accordingly (especially ground rehabilitation), the activity and mass of the aerosols deposited must be known, together with the size distribution spectrum, the solubility and if possible the chemical forms.

Under such accident conditions, the ESCADRE code system, developed at IPSN (Institute for Nuclear Safety and Protection) can be used to calculate the properties of the substances released and, especially with the AEROSOLS/B2 code, the main characteristics of the aerosols (concentration, size distribution, composition). For conditions representative of severe PWR accidents, by varying different main parameters (structural material aerosols, steam condensation in the containment, etc...), indications are given on the range of

characteristics of the aerosols (containing notably Cs, Te, Sr, Ru, etc...) released to the atmosphere. Information is also given on how more accurate data (especially on the chemical forms) will be obtainable in the framework of current or planned experimental programs (HEVA, PITEAS, PHEBUS PF, etc...).

Assuming these characteristics to vary little during atmospheric transfer, the atmospheric dispersion and deposition codes can then be used to obtain the aerosol activities and masses deposited per unit of surface area versus weather conditions and distance.

## I - INTRODUCTION

Reactor safety is based on good design, reliable construction and appropriate operating rules. As regards design, the successive barriers and defense-in-depth concepts have resulted in the definition of redundant engineered safeguard systems. But the possibility of a severe or beyond design basis accident cannot be entirely dismissed and, since the issue of the WASH 1 400 report in 1975, many deterministic or probabilistic accident studies have been carried out for light water power reactors. These studies, in turn, have given rise to the development of additional procedures, aimed at coping with potentially serious situations, by reducing either their probability or their consequences /1,2/. Notwithstanding all these provisions, severe accidents and their consequences remain a subject of investigation in the framework of probabilistic risk assessment, siting criteria and the definition of emergency plans. In the case of a pressurized water reactor (PWR), a severe accident, involving loss of coolant (LOCA), core uncovering and fuel meltdown, liberates in the containment considerable quantities of fission products. In the event of loss of integrity of the containment system, which is the ultimate barrier, release to the environment (mainly via the atmosphere) may be such as to require the implementation of emergency plans in the short or medium term. The purpose of these plans is to reduce consequences for the public and the environment (ground, water, plants) to the lowest possible level.

Fission product (FP) quantities released vary according to their volatility and the degree of core degradation. Study of the FP emission and behaviour inside the containment is essential to definition of the release which would occur in the event of containment failure. In France, the ESCADRE code system /3/ has been gradually developed to assess the composition, quantities and kinetics of FP release outside the containment during a severe accident. Until recently, efforts were focussed on assessment, for the different FP categories, of the fractions of core inventory discharged and the radiological consequences were calculated using standard values for a certain number of

parameters, such as dry deposition velocity, wash-out coefficient, fraction intercepted by vegetation, transfer factors, whilst disregarding physical and chemical forms.

If we focus our attention on the medium and long term effects of the deposition, we shall see that almost all the FP concerned are emitted as aerosols. By steam condensation on particles and then agglomeration of these particles after a certain residence time in the containment, different FP will be grouped, possibly associated with core structural materials (clads, control rods, support plates, etc...). The physical and chemical properties of these FP and the aerosol size distribution then become crucial factors, first of all in atmospheric transfer and deposition phenomena and then in all transfers in natural media (water, ground, plants, etc...). This fact has been confirmed in a certain number of recent publications /4,5/ and has been taken into account in the experimental program RESSAC presently implemented by IPSN at the Cadarache nuclear study center.

## II - AEROSOL EMISSION DURING A SEVERE PWR ACCIDENT

During a severe accident, there are two aerosol emission periods in the containment: that occurring at meltdown and that corresponding to the reaction between the corium (molten core with structural materials) and the concrete basemat of the reactor building.

Apart from the noble gases, almost all the FP will be emitted as aerosols. The only exception will concern a small fraction of the iodine which is an extremely reactive element, the various chemical forms of which are the subject of intensive investigation. In this context, for medium and long term effects in the environment, the FP having a relatively short radioactive half-life (<8 days), which includes iodine isotopes, will not be discussed in the present paper.

The FP and structural materials are emitted from the core or the corium as vapours. The formation of aerosols by nucleation takes place in the primary system during core meltdown and on the corium during interaction with the concrete. For temperatures below 800°C, practically the entire mass emitted consists of aerosols. The containment atmosphere temperature point is between 140°C and 200°C.

Assuming a constant emitted mass, the emission rate is a prevailing factor in the evolution of aerosols in the containment prior to their release. The emission rate depends on temperature, on the mass of the elements contained in the core or in the corium and on their vaporization capacity.

## II.1. Core meltdown aerosol sources

Table 1 lists the stable and unstable FP and structural material masses liable to vaporize and form aerosols during an accident sequence deemed representative of those which could occur on a French 900 MWe PWR. It will be observed that the FP, the largest mass fraction of which consists of stable isotopes, may be in minority as regards mass, if we consider the simultaneous or delayed emission of structural materials.

During core meltdown, a gas stream consisting of steam and hydrogen (from clad oxidation) entrains the aerosols into the containment through the primary pipe break, except in the case of containment bypass sequences. Current investigations would appear to indicate that aerosol retention in the primary system is slight and, in particular, that there is no selective retention based on the aerosol components. Depending on the accident sequence considered, FP and structural material emission times may vary between several tens and several hundreds of minutes.

Two thirds of the FP mass emitted as aerosols are constituted by the extremely volatile iodines and cesiums, which, according to present estimates, combine to form cesium iodide (CsI) and cesium hydroxide (CsOH), both of which are soluble in water.

The chemical forms of the other FP are very difficult to define, since they will depend largely on the initial chemical forms in the fuel, on interaction with other FP and structural materials (Zn, Ag, etc...) and on the specific accident conditions (pressures, temperatures, degree of clad oxidation, reduction/oxidation potential, location of the primary pipe break, etc...).

According to the literature, with the exception of strontium which may occur as a soluble hydroxide, the other main FP (Te, Ru, Mo, La, Ce, etc...) could be in either metal or oxide form, generally insoluble.

## II.2. Corium-concrete interaction aerosol sources

This interaction, involving the thermal decomposition of the concrete, should give rise to slight emission of FP remaining in the corium and extensive emission of aerosols and gases (carbon oxides, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>) from the concrete. According to the specialist conclusions /6/ and with particular reference to the German BETA experiments, there are two aerosol emission phases:

- a short phase (~10 mn) at high temperature (T > 2 000°C) during which the mass of aerosols emitted from the concrete attains several tens of kg.
- an extended phase (up to penetration of the basemat, i.e.

several days) at a lower temperature ( $T \sim 1500^{\circ}\text{C}$ ) and the mass emitted can be of several hundreds of kg.

The masses emitted depend on the nature of the concrete (siliceous or silico-calcareous) and will be far larger in the latter case. The addition of these  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  - base aerosol to those (emitted at core meltdown) already in suspension in the containment will necessarily reduce, by sedimentation, activated by agglomeration, the total mass of aerosols in suspension.

On the other hand, even slight FP emission over a period of several days could raise problems due to the FP enrichment of the aerosols. At the present time, little data is available on FP release rates from corium interacting with concrete and experiments are planned to improve our knowledge in this area.

### III - DESCRIPTION OF THE CODE CALCULATING AEROSOL EVOLUTION IN THE CONTAINMENT

In the ESCADRE code system, the AEROSOL/B2 code /7/ is used to compute the physical behaviour of aerosols in a circuit or containment (whether divided into compartments or not). The solid or liquid aerosols in suspension in a gas are basically defined by particle size distribution (median radius and standard deviation) and concentration (mass or number).

Distribution changes are governed by the mechanisms of agglomeration, sedimentation, deposition on walls and growth of droplets by steam condensation on soluble or insoluble particles.

The characteristics of aerosols from core component meltdown (fission products, fuel, structural materials) may differ, depending on origin and time of emission. With the AEROSOLS/B2 code, it is possible to manage the behaviour of several populations of aerosols, differing initially in particle size distribution, density and solubility. The specific proportion of the different elements, especially the FP, can be obtained for any given moment. These FP are the potential source of radioactive release in the event of containment leakage or failure.

## IV - AEROSOL BEHAVIOUR IN THE CONTAINMENT

### IV.1. Description of the phenomena

In the initial phase, the number of aerosols will increase until a concentration is reached where particle agglomeration can develop. Meanwhile, the thermal hydraulic conditions prevailing in the containment can cause steam condensation on the aerosols, especially on the soluble ones. The size of the aerosols will then rapidly increase, thereby accelerating the rate of sedimentation. For a constant source and a given volume, providing the flowrate is sufficient, an equilibrium will then be obtained, with a constant median radius of the spectrum in suspension and a constant mass concentration. The phenomenon whereby aerosols are removed from the atmosphere by sedimentation may now be superseded by phenomena involving deposition on containment walls. Deposits by brownian movement and thermophoresis, related to the difference in temperature between the gas and the wall, only trap 10% at the most of the mass emitted. Diffusiophoresis, due to steam condensation onto the walls, on the other hand, can result in deposits similar in mass to those due to sedimentation.

Emission of aerosols from corium-concrete interaction can increase the concentration of aerosols in suspension, leading to a repetition of the sequences described above.

When the source stops, the atmosphere will no longer be supplied with small particles, which momentarily accelerates aerosol growth and consequently the rate of sedimentation. During this period, we observe a rapid drop in the concentration of aerosols in suspension. This will continue until a concentration in number below  $10^5$  particles/cm<sup>3</sup> is reached, which is not compatible with agglomeration. If, at the same time, the thermal hydraulic conditions do not allow steam condensation on the particles, the size of the aerosols can develop no further. The sedimentation rates will lead to a far more gradual reduction in the mass of aerosols in suspension.

However, certain events could give rise to partial re-emission of deposited FP. For instance, it is always possible that, during core meltdown in the vessel, a large amount of molten metal could fall into the water at the bottom of the lower plenum, producing a burst of steam which could cause resuspension of the aerosols deposited in the primary system. Further investigations of this phenomenon show that, even for large masses of resuspended aerosols, after a few hours, the same concentration of aerosols is found as before the re-emission.



#### IV.2. Computations relating to aerosol evolution in the containment

Using the AEROSOLS/B2 code and realistic data on the containment thermal hydraulic conditions, aerosol evolution in the containment can be calculated and the atmospheric release characteristics plotted (disregarding filtered venting possibilities). Similar calculations, already presented /8/, involving varying the distribution median radius of the aerosol source at the primary pipe break, showed that a variation of a factor of 20 had no influence 7 hours after aerosol emission had ceased. We shall not rediscuss in the present paper the variation of this parameter. Aerosol emission following corium-concrete interaction is disregarded.

The computation data are presented in Table 2. In Table 3, we show the physical phenomena involved for each case considered. From the calculation results on evolution of concentration versus time (up to 24 hours), plotted on Figure 1, we see that beyond 8 hours, attenuation of results for all cases is identical and the median radius obtained is the same. After 24 hours (see Table 3), the retention factor of case 1 is below that of case 2 by a factor of 10. We also observe, which is essential for characterization of atmospheric release, that the median radius and the standard deviation for the suspended particles are identical for all the cases calculated.

These results highlight the influence of the steam present in the containment on aerosol retention, especially when they contain soluble forms.

On the basis of the case 1 result compared with the other results, we note the influence of a low mass flowrate from the aerosol emission source on the concentration of aerosols in suspension in the containment.

The total mass in suspension after 24 hours is included between 7.2 and 2.6 kg, with the mass of soluble FP included between 3 and 1.3 kg, compared with the initially emitted 140 kg. The maximum value calculated in case 1 is obtained with an unrealistic source at the primary pipe break, where aerosol emission due to core meltdown could not be limited to volatile FP.

#### IV.3. Atmospheric release filtration

With a view to preventing containment overpressure and thereby loss of containment integrity, provision is to be made for controlled release, after 24 h, through a sand bed filter (efficiency > 10), as specified in the French PWR emergency procedure (U5). This filtration would alter the characteristics of the released source by reducing the mass, but

would also change the spectrum of the aerosols in suspension in the containment. Since mainly the larger particles would be trapped in the filter, the spectrum of the particles released to the atmosphere, after 24 hours, would be characterized by an aerodynamic median diameter after filtration close to or slightly below 1  $\mu$ m.

V - CURRENT OR PLANNED EXPERIMENTS AIMED AT IMPROVING KNOWLEDGE ON FP AND AEROSOL EMISSION AND BEHAVIOUR IN THE EVENT OF SEVERE ACCIDENTS

Knowledge in these areas is still basically inadequate and a certain number of international experiments have been performed on the subject, such as MARVIKEN, LACE, DEMONA, etc..., or are planned.

In France, IPSN intends to proceed with or undertake a certain number of experiments.

These include, as regards aerosol behaviour:

- PITEAS "aerosol physics", aimed at studying the behaviour of soluble and insoluble aerosols in presence of water vapour under PWR containment conditions,
- TUBA, study of aerosol behaviour in a circuit,
- PITEAS-FILTRATION, behaviour analysis and efficiency measurement of a sand bed filter designed to reduce release to the atmosphere.

Experiments on emission from a molten core include:

- HEVA which, on the basis of irradiated fuel heated to predefined temperatures, determines emission kinetics for the main FP and structural products, together with the spectrum characteristics of the aerosols emitted, and attempts identification of the main FP chemical forms.
- PHEBUS-PF, overall experiment, aimed at representing general fuel-primary system-containment conditions, with a view to identifying FP physical and chemical forms and characterizing the aerosols (in suspension, deposited, in the condensates).

Finally, as regards emissions from corium interacting with concrete, experiments are being defined with a view to attempting quantification of FP emission in these circumstances.

## VI - CONCLUSION

During a postulated severe accident on a pressurized water reactor (PWR), most of the fission products (FP) (except rare gases and a small fraction of the iodines) and all structural materials released at core meltdown will form aerosols at the primary break.

The chemical forms of these aerosols are extremely difficult to define, since they will largely depend on the accident scenarios (pressure, temperature, extent of clad oxidation, reduction/oxidation potential, location of the primary break, etc...).

Considering the emission rates for the different FP families, the cesiums will be prevalent in mass, in soluble CsOH and CsI forms. The other most widely accepted forms for the main FP are soluble  $\text{Sr}(\text{OH})_2$  for the strontiums and for the Te, Ru, La, Ce elements, metal or oxide forms, almost all of which are insoluble.

As regards the spectral physical characteristics of the aerosols remaining in suspension in the containment, resulting from primary aerosol agglomeration, these aerosols are assumed to comprise all emitted materials. Sensitivity studies performed with the AEROSOL/B2 code and applied to the French PWR case show that, 24 h after meltdown and disregarding aerosols from corium-concrete interaction and resuspension phenomena, the characteristics of aerosols are as follows:

- mass aerodynamic median diameter comprised between 5 or 6  $\mu\text{m}$ ,
- distribution standard deviation of the order of 1.6,
- mass in suspension below 5 kg (i.e. 0.1  $\text{gm}^{-3}$ ) for all aerosols, which is less than 3.3 kg of FP (equivalent to less than 1.5% of the initially emitted FP).

After filtering (through a device of the type provided for in procedure U5 aimed at avoiding containment overpressure), the median diameter would be reduced ( 1  $\mu\text{m}$ ) and the mass of aerosols released to the atmosphere would be divided at least by 10.

The physical characteristics of the aerosols affect the dry deposition rate (conditioning ground activity on the plume trajectory), the wash-out coefficient, the vegetation interception factor, etc... .

For the type of average accident scenario studied, the FP would appear to be contained in small diameter aerosols (1  $\mu\text{m}$ , after filtering), with about half the total mass consisting of soluble FP (mainly cesium), the rest being essentially structural materials.

As regards the environment, FP bio-availability (fraction of the initial deposit transferable to plants, for example) is generally

related to their solubility. The present survey enables us to conclude that, before any changes in initial chemistry produced by contact with the atmosphere, water or the ground, cesium, which is the prevailing element for long term consequences, would be in soluble form and consequently bio-available. The other main FP (Sr, Ru, Te, etc...) would be in insoluble metal or oxide forms.

## VII - REFERENCES

- /1/ J. BRIBOIS, A. L'HOMME, N. SCHEKTMAN, "Taking into account severe accidents in the design and the control of French PWR's" 4th European Conference and 9th Foratom Congress on Nuclear Energy of today and tomorrow, Geneva, June 1-6, 1986.
- /2/ J. BUSSAC, F. COGNE, J. PELCE, "The severe accidents and source term problems approach in France", International Topical Meeting on Thermal Reactor Safety, San Diego, February 2-6, 1986.
- /3/ J. DUFRESNE et al, "Présentation du système ESCADRE et applications".  
International Symposium on Severe Accidents in Nuclear Power Plants, Sorrente, March 1988, IAEA - SM - 296/13.
- /4/ Termes sources en cas d'accident de réacteur nucléaire, rapport d'un groupe d'experts de l'AEN, OCDE, Mars 1986.
- /5/ P.J. COOPER, B.Y. UNDERWOOD, "The impact of source term characteristics and the processes that modify them post release - on dry and wet deposition rates", final report on task 1 of extension to contract SR011 - 8 ou k (b), Commission des Communautés Européennes.
- /6/ Proceedings of the CSNI Specialists' Meeting on Core Debris - Concrete Interaction, Report EPRI NP-5054-SR-February 1987.
- /7/ J. GAUVAIN, G. LHIAUBET, "AEROSOL/B2 - version 2, code aérosols à spectre multicomposant discrétisé avec condensation en pluie de vapeur d'eau, présentation du formalisme", Rapport technique DAS/SASC/87/54, Octobre 1987.
- /8/ J. GAUVAIN, G. LHIAUBET, "Influence of structural insoluble aerosols in severe accident scenarios with and without steam condensation onto soluble aerosol fission products", OECD workshop on water-cooled reactor aerosol code evaluation and uncertainty assessment, Brussels, 9-11 September, 1987.

**TABLE 1****French 900 MWe PWR**

FP and structural materials involved ; fraction and masses  
which could be emitted in the event of a severe accident

	Mass (kg) of stable and unstable isotopes	Fraction emitted at core meltdown	Mass emitted in the con- tainment (kg)
FP and actinides			
I, Br	12	1	12
Cs, Rb	148	1	148
Te, Sb, Ag, Sn	28	1	28
Sr, Ba	116	0,1	11,6
As, In, Cd	55	0,1	5,5
Ru, Rh, Mo, Tc	328	0,1	32,8
Zr, Nb	180	0,001	0,2
La, Ce, Y ...	498	0,001	0,5
Actinides	641	0,001	0,6
<b>Total (apart from noble gases)</b>	<b>2006</b>		<b>239</b>
Fuel and structural materials			
UO <sub>2</sub>	80 000	0,001	80
Fe (not including primary vessel)	20 600	0,001	20,6
Zr	18 150	0,001	18,2
Cr	6 200	0,001	6
Ni	4 100	0,001	4,1
Ag	1 900	0,1	190
In	360	0,1	36
Sn	200	1	200
Cd	120	0,5	60
<b>Total</b>	<b>131 630</b>		<b>615</b>

**TABLE 2**

Aerosol sources

Nature of aerosols	Mass emitted (kg)	R <sub>50 v</sub> ( m)		(g.cm <sup>-3</sup> )	Emission time (s)	Flowrate (g/s)
Soluble	140 (CsI+CsOH)	0,5	2	4	3 600	38,9
Insoluble	100 (FP) 620 (structures)	1,75	1,75	7	3 600	200

Steam condensation flowrate (kg/s)

Time (s)*	Bulk condensation	Wall condensation
0	1	36,5
500	1	36,5
2245	1	11,1
2400	1	7,3
3600	!	7,3
4000	0	6,5
7500	0	2,5
40 000	0	0,2
86 400	0	0,1

\* Linear interpolation of the value between each time increment.

**TABLE 3**

**Definition of computation cases and main results**

Case N°	Aerosol sources (I)  Soluble (S) Insoluble (I)	Dry	Diffusio- phoresis	Conden- sation onto soluble elements	Conden- sation onto insoluble elements	Results after 24 h					
						Mass (kg) in suspension			Median aerodyna- mic radius (m)	Standard deviation	Retention* factor
						FP (soluble)	Structures + FP (insoluble)	Total			
1	S	X				7,21		7,21	2,86	1,57	19
2	S + I	X				3	2,04	5,04	2,53	1,55	171
3	S + I	X	X			1,70	1,30	3	3,32	1,56	287
4	S + I			X		2,30	1,90	4,20	2,49	1,64	205
5	S + I		X	X		1,32	1,30	2,62	2,32	1,66	328
6	S + I		X		X	1,70	1,35	3,05	2,33	1,55	282
7	S + I				X	3	2	5	2,58	1,55	172

(1) Mass of soluble elements : 140 kg  
 Mass of insoluble elements : 720 kg (including 100 kg of FP)

\* Mass emitted / mass in suspension (all aerosols)



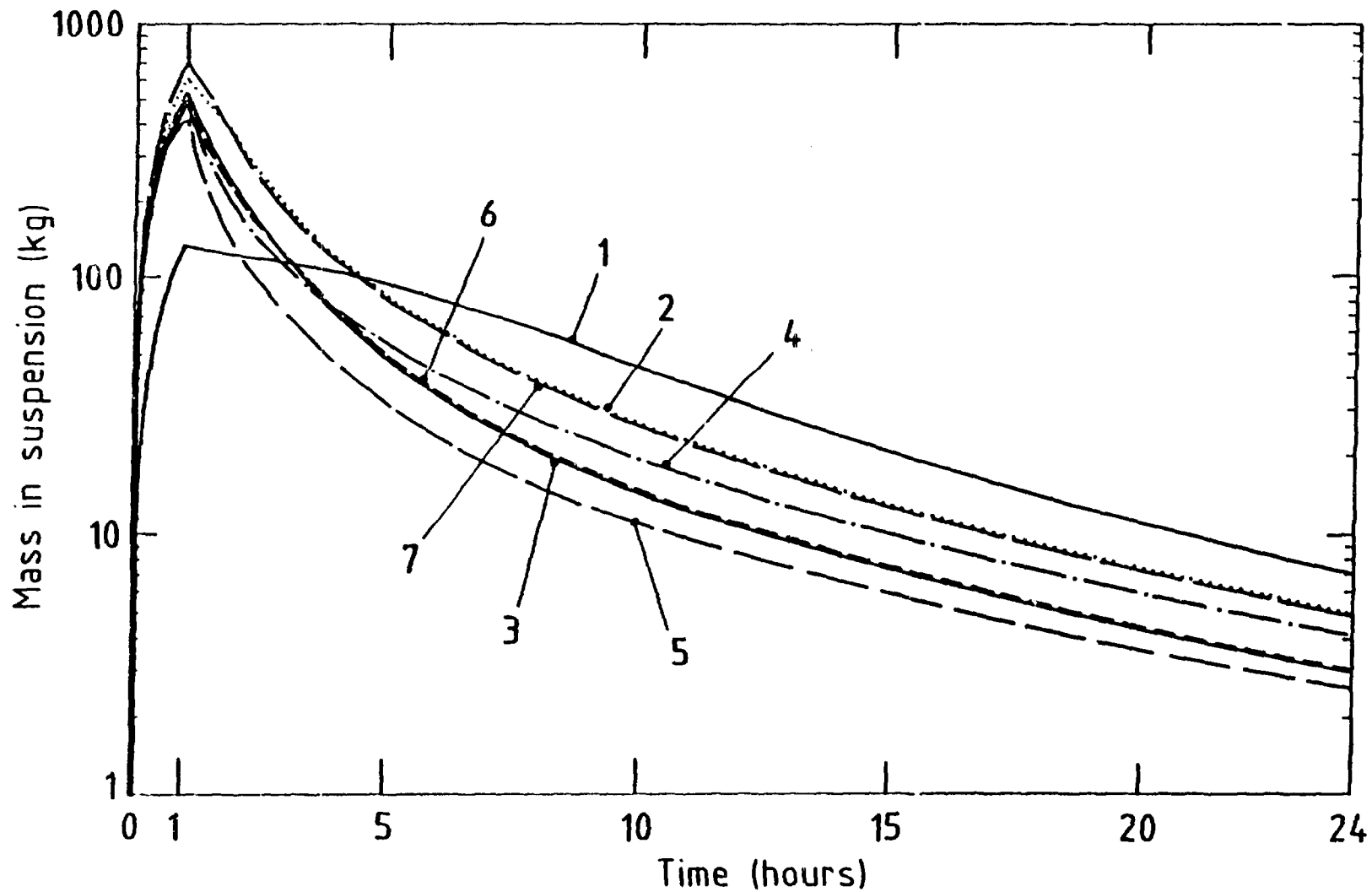


Fig. 1 - Evolution of the total mass of suspended aerosols in the containment atmosphere

**RAPPORT DAS N° 473 f**

**CARACTERISTIQUES DES AEROSOLS EMIS  
DANS L'ENVIRONNEMENT APRES UN ACCIDENT GRAVE  
SUR UN REACTEUR A EAU SOUS PRESSION**

**LHIAUBET G., MANESSE D. \***

**IVe symposium international de radioécologie.  
(Cadarache, 14-18 mars 1988)**

\* DAS/SASC

Mai 1988

CARACTERISTIQUES DES AEROSOLS EMIS  
DANS L'ENVIRONNEMENT APRES UN ACCIDENT GRAVE SUR UN  
REACTEUR A EAU SOUS PRESSION

G. LHIAUBET, D. MANESSE

IPSN / DAS / SASC, BP N° 6 - 92265 FONTENAY AUX ROSES CEDEX

SESSION : TERME SOURCE

En cas d'accident grave hypothétique, avec dégradation du combustible, affectant un réacteur à eau sous pression (REP), des gaz et des aérosols contenant des produits radioactifs risquent d'être relâchés et d'entraîner, pour la population et l'environnement, des conséquences à court, moyen et long terme.

Si l'on s'attache plus spécialement au moyen et au long terme, les conséquences radiologiques sont liées à la présence, sur le sol et la végétation, de dépôts d'aérosols contenant des produits de fission radioactifs. Pour évaluer l'impact de ces dépôts d'une part et pour se préparer aux actions post-accidentelles (en particulier la réhabilitation des sols) d'autre part, il est nécessaire de connaître l'activité et la masse des aérosols déposés mais également le spectre granulométrique, la solubilité et si possible les formes chimiques.

A l'aide du système de codes ESCADRE, développé à l'IPSN, il est possible de calculer, en cas d'accident, les caractéristiques des rejets et, en particulier, avec le code AEROSOLS/B2, les caractéristiques principales des aérosols (concentration, granulométrie, composition). Pour des conditions représentatives des accidents graves sur les REP, et en faisant varier différents paramètres importants (aérosols de matériaux de structure, condensation de vapeur d'eau dans le confinement...), on donne des indications sur les plages de variation des caractéristiques des aérosols (contenant notamment Cs, Te, Sr, Ru...) émis dans l'atmosphère ; on indique également comment des indications plus précises (en particulier sur les formes chimiques) pourront être obtenues dans le cadre des programmes expérimentaux en cours ou en projet (HEVA, PITEAS, PHEBUS PF ...).

Ensuite, en supposant que ces caractéristiques varient peu au cours du transfert atmosphérique, les codes de dispersion atmosphérique et de dépôt permettent d'obtenir, en fonction des conditions météorologiques et de la distance, les activités et les masses d'aérosols déposées par unité de surface.

## I - INTRODUCTION

La sûreté des réacteurs repose sur une bonne conception, une réalisation correcte et sur des règles d'exploitation appropriées. Dans le domaine du dimensionnement, les concepts de barrières successives et de défense en profondeur ont conduit à la définition des systèmes redondants de sauvegarde. La possibilité d'accident grave, ou hors dimensionnement, ne peut pas être complètement écartée et, depuis la publication du rapport WASH 1400 en 1975, de nombreuses études, déterministes ou probabilistes, d'accidents ont été réalisées pour les réacteurs à eau de puissance. A la suite de ces études des procédures supplémentaires ont été mises au point. Elles visent à faire face à des situations potentiellement graves, soit en réduisant leur probabilité, soit en réduisant leurs conséquences /1, 2/. Malgré toutes ces dispositions, les accidents graves et leurs conséquences continuent d'être étudiés dans le cadre des études probabilistes de risque, des choix des sites et de la définition des plans d'intervention. Pour un réacteur à eau sous pression (REP), un accident grave, impliquant la perte du réfrigérant primaire, le dénoyage et la fusion du combustible, libère dans l'enceinte de confinement des quantités très importantes de produits de fission. Si le système de confinement qui constitue l'ultime barrière, perd son intégrité, les rejets dans l'environnement (en priorité par la voie atmosphérique) peuvent être tels qu'ils nécessiteraient la mise en oeuvre de plans d'intervention, à court et moyen terme. Ces plans visent à réduire, à un niveau aussi bas que possible, les conséquences pour le public et pour l'environnement (sol, eaux, plantes).

Les produits de fission (PF) sont émis en quantité variable selon leur volatilité et selon l'état de dégradation du coeur. L'étude de leur émission et de leur comportement à l'intérieur du confinement est fondamentale pour définir le rejet en cas de défaillance du confinement. En France, le système de codes ESCADRE /3/ a été progressivement mis au point pour évaluer la composition, les quantités et la cinétique des rejets de PF hors de l'enceinte lors d'un accident grave. Jusqu'à une période récente, l'effort principal avait porté sur l'évaluation, pour les différentes classes de PF, des fractions de l'inventaire du coeur rejetées et le calcul des conséquences radiologiques était mené en utilisant des valeurs standards pour un certain nombre de paramètres tels la vitesse de dépôt sec, le taux de lavage par la pluie, la fraction interceptée par la végétation, les facteurs de transfert, sans tenir compte des formes physiques et chimiques.

Si l'on s'intéresse plus spécialement aux effets à moyen et long terme des dépôts dans l'environnement, la quasi-totalité des PF concernés vont être émis sous forme d'aérosols. Par condensation des vapeurs sur des particules et par agglomération des particules entre elles, après un certain temps de séjour dans le confinement, différents PF vont se trouver réunis, associés éventuellement à des matériaux de structure (gainés, barres de contrôle, plaques supports, ...) du coeur. Les caractéristiques physico-chimiques de ces PF et la granulométrie des aérosols vont revêtir une importance fondamentale, d'abord pour les phénomènes de transfert atmosphérique et de dépôt et ensuite pour tous les transferts dans le milieu naturel (eaux, sols, plantes, ...). Cette importance a été reconnue dans un certain nombre de publications récentes /4, 5/ et a été prise en compte dans la définition du programme expérimental RESSAC, mené actuellement par l'Institut de Protection et de Sécurité Nucléaire (IPSN) à Cadarache.

## **II - EMISSION DES AEROSOLS EN CAS D'ACCIDENT GRAVE D'UN REP**

Au cours d'un accident grave, on distingue deux périodes d'émission d'aérosols dans l'enceinte de confinement. La première a lieu lors de la fusion du coeur et la seconde lors de l'interaction entre le corium (coeur fondu mélangé aux matériaux de structure) et le béton du radier du bâtiment réacteur.

Hormis les gaz rares, la quasi-totalité des PF vont être émis sous forme d'aérosols ; la seule exception peut concerner une faible fraction de l'iode, élément très réactif, dont les nombreuses formes chimiques possibles font l'objet d'études. De plus, dans la mesure où l'on s'intéresse aux effets à moyen et long terme dans l'environnement, les PF de vie relativement courte (< 8 j), incluant donc les iodures, ne seront pas étudiés ici.

Les PF et les matériaux de structure sont émis du coeur ou du corium sous forme de vapeurs. La formation des aérosols par nucléation a lieu dans le circuit primaire lors de la fusion du coeur et au voisinage du corium lors de l'interaction avec le béton. Pour des températures inférieures à 800°C, la quasi-totalité de la masse émise est formée d'aérosols. La température de l'atmosphère dans l'enceinte de confinement est comprise entre 140°C et 200°C.

A masse émise constante, le débit d'émission est un des paramètres essentiels du devenir des aérosols dans l'enceinte durant le temps de confinement. Ce débit est fonction de la température, de la masse des

éléments présents dans le coeur ou dans le corium et de leur capacité à se vaporiser.

### II.1. Source d'aérosols au cours de la fusion du coeur

Pour une séquence accidentelle jugée représentative pour les REP français de 900 MWe, le tableau I précise les masses des PF (stables et instables) et des matériaux de structure pouvant se vaporiser et former des aérosols. On constate ainsi que les PF, dont la plus grande fraction massique est composée d'isotopes stables, peuvent être minoritaires en masse si l'on considère l'émission simultanée ou différée des matériaux de structure.

Au cours de la fusion, un courant gazeux composé de vapeur d'eau et d'hydrogène (provenant de l'oxydation des gaines) entraîne les aérosols vers l'enceinte à travers la brèche du circuit primaire sauf pour les séquences où l'on bipasse l'enceinte. Les études actuellement réalisées semblent montrer que la rétention dans le circuit primaire est faible et surtout qu'il n'y a pas de rétention sélective des aérosols en fonction des éléments qui les composent. L'émission de PF et de matériaux de structure peut, suivant la séquence accidentelle, durer de quelques dizaines à quelques centaines de minutes.

Parmi les PF émis sous forme d'aérosols, les iodes et les césiums, fortement volatils, représentent les deux tiers de la masse émise et se retrouvent d'après l'évaluation actuelle sous forme d'iodure de césium (CsI) et d'hydroxyde de césium (Cs OH), tous deux solubles dans l'eau.

Les formes chimiques des autres PF sont très difficiles à préciser ; elles vont être très dépendantes des formes chimiques initiales dans le combustible, des réactions avec les autres PF et les matériaux de structure (Zr, Ag, ...) et enfin, du scénario (pressions, températures, degré d'oxydation des gaines, potentiel d'oxydo-réduction, emplacement de la brèche sur le circuit primaire, ...).

D'après la littérature, à l'exception du strontium qui pourrait être sous forme d'hydroxyde soluble, les autres principaux PF (Te, Ru, Mo, La, Ce, ...) pourraient être, soit sous forme métallique, soit sous forme d'oxyde, généralement insolubles.

### II.2. Source d'aérosols au cours de l'interaction corium-béton

Durant cette interaction, où se produit la décomposition thermique du béton, on devrait avoir une faible émission des PF restant dans le corium et une émission importante d'aérosols et de gaz (oxydes de carbone, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>) provenant du béton. D'après les conclusions des spécialistes /6/ et en se basant plus particulièrement sur les expériences allemandes BETA, on peut

distinguer deux phases dans l'émission des aérosols :

- une phase courte ( $\sim 10$  mn) et à haute température ( $T > 2000^\circ\text{C}$ ) pendant laquelle la masse émise d'aérosols de béton est de l'ordre de quelques dizaines de kg,
- une phase prolongée (jusqu'à la percée du radier, soit plusieurs jours), à température plus basse ( $T \sim 1500^\circ\text{C}$ ), au cours de laquelle la masse émise peut être de l'ordre de quelques centaines de kg.

La nature du béton (siliceux ou silico-calcaire) détermine les masses émises, beaucoup plus importantes dans le cas du béton silico-calcaire. L'adjonction de ces aérosols (à base de  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ) aux aérosols (émis lors de la fusion du coeur) déjà en suspension dans le confinement ne peut que réduire, par sédimentation, accélérée par les agglomérations, la masse totale d'aérosols en suspension.

Par contre, l'émission même faible de PF pendant plusieurs jours peut poser un problème, du fait de l'enrichissement des aérosols en PF. Actuellement, les taux de relâchement des PF à partir du corium interagissant avec le béton sont très mal connus et des expériences sont prévues pour améliorer les connaissances dans ce domaine.

### III- DESCRIPTION DU CODE CALCULANT L'EVOLUTION DES AEROSOLS DANS LE CONFINEMENT

Dans le système de codes ESCADRE, le code AEROSOLS/B2 /7/ permet de calculer le comportement physique des aérosols dans un circuit ou dans une enceinte (divisée en compartiments ou non). Les aérosols, solides ou liquides, en suspension dans un gaz sont définis principalement par leur distribution granulométrique (rayon médian et écart-type de la distribution) et leur concentration, en masse ou en nombre.

L'évolution de la distribution est régie par les mécanismes d'agglomération, de sédimentation, de dépôts sur les parois et de grossissement des gouttelettes par condensation de vapeur d'eau sur des particules solubles ou insolubles.

Les aérosols issus de la fusion des éléments du coeur (produits de fission, combustible, matériaux de structure) peuvent présenter des caractéristiques différentes selon leur origine et leur moment d'émission. Le code AEROSOLS/B2 permet de suivre le comportement de plusieurs populations d'aérosols différant à l'origine par la granulométrie, la masse volumique et la solubilité dans la vapeur d'eau. On peut ainsi, à chaque

instant, connaître la proportion massique des différents constituants, en particulier des PF. Ces derniers constituent la source potentielle de rejet radioactif en cas de fuite ou de défaillance du confinement.

#### IV- COMPORTEMENT DES AEROSOLS DANS L'ENCEINTE

##### IV.1. Description des phénomènes

Dans une première phase, la concentration en nombre des aérosols va croître jusqu'à atteindre une valeur permettant au phénomène d'agglomération des particules de se développer. En parallèle, les conditions thermohydrauliques régnant dans l'enceinte peuvent entraîner la condensation de la vapeur d'eau sur les aérosols, principalement sur les solubles. Ainsi la taille des aérosols va croître rapidement, ce qui entraîne une augmentation de la vitesse de sédimentation. A source constante, pour un volume donné, on obtient, si le débit est suffisant, un équilibre donc un rayon médian du spectre en suspension ainsi qu'une concentration massique constants. Au phénomène d'élimination des aérosols de l'atmosphère par sédimentation peuvent se superposer des phénomènes de dépôts sur la paroi des murs de l'enceinte. Les dépôts par diffusion brownienne et par thermophorèse, liée à l'écart de température entre le gaz et la paroi, ne piègent au maximum que 10 % de la masse émise. Par contre, les dépôts par diffusiophorèse, dus à la condensation de vapeur d'eau à la paroi, peuvent entraîner, pour de forts débits de condensation, des masses déposées voisines de celles sédimentées.

L'émission des aérosols générés par l'interaction du corium avec le béton peut conduire à une augmentation de la concentration des aérosols en suspension et à répéter les séquences précédemment décrites.

A l'arrêt de la source, l'atmosphère n'est plus alimentée en petites particules, ce qui accélère, pour une courte période, le grossissement des aérosols et donc la vitesse de sédimentation. On aura au cours de cette période une très forte atténuation en fonction du temps.

L'atténuation rapide des aérosols en suspension va conduire à une concentration en nombre inférieure à  $10^5$  particules/cm<sup>3</sup>, ce qui ne permet plus les agglomérations. Si, par ailleurs, les conditions thermohydrauliques ne permettent plus la condensation de vapeur d'eau sur les particules, la taille des aérosols ne peut plus évoluer. Les vitesses de sédimentation conduiront à une diminution beaucoup plus lente de la masse d'aérosols en suspension.



Cependant certains événements pourraient être à l'origine d'une réémission partielle des PF déposés. Par exemple, on ne peut exclure que, au cours de la fusion du coeur dans la cuve, la chute d'un volume important de métal en fusion dans l'eau restant dans le fond de la cuve n'entraîne une bouffée de vapeur d'eau qui remette en suspension les aérosols déposés dans le circuit primaire. Les études de sensibilité à ce type de phénomène montrent que, pour une réémission de courte durée et même pour des masses relarguées importantes, on retrouve, après quelques heures, une concentration d'aérosols identique à celle obtenue sans réémission.

#### IV.2. Calculs d'évolution des aérosols dans l'enceinte

A l'aide du code AEROSOLS/B2 et à partir de données réalistes sur les conditions thermohydrauliques régnant dans l'enceinte, on peut calculer l'évolution des aérosols dans l'enceinte et donner les plages dans lesquelles se situeraient les caractéristiques du rejet atmosphérique (avant une éventuelle filtration). Des calculs du même type, déjà présentés /8/, dans lesquels on avait fait varier le rayon médian de la distribution de la source d'aérosols à la brèche du circuit primaire ont montré qu'une variation d'un facteur 20 de ce rayon n'avait plus d'influence 7 heures après la fin de l'émission des aérosols. On ne reviendra donc pas, ici, sur la réponse à la variation de ce paramètre. L'émission des aérosols lors de l'interaction du corium avec le béton n'est pas prise en compte.

Les données introduites dans les calculs sont présentées dans le tableau 2. Dans le tableau 3, on indique, pour chacun des cas de calcul, les phénomènes physiques impliqués. Les résultats du calcul de l'évolution de la concentration en fonction du temps jusqu'à 24 heures, tracés sur la figure 1, montrent qu'au delà de 8 heures, l'atténuation de l'ensemble des résultats des cas de calcul est identique, le rayon médian du spectre obtenu étant le même. A 24 heures (voir tableau 3), le coefficient de rétention du cas n°1 est d'un facteur 10 inférieur à celui du cas n°2. On constate enfin, ce qui est essentiel pour les caractéristiques du rejet atmosphérique, que le rayon médian ainsi que l'écart type de la distribution des particules suspendues sont identiques pour tous les cas de calcul réalisés.

Ces résultats mettent en évidence l'incidence de la vapeur d'eau présente dans l'enceinte sur la rétention des aérosols, principalement lorsqu'ils contiennent des corps solubles.

A partir du résultat du cas de calcul n°1 comparé aux autres résultats, on peut constater l'influence d'un faible débit massique d'émission de la source d'aérosols sur la concentration des aérosols en suspension dans l'enceinte.

La masse totale en suspension est comprise, à 24 heures, entre 7,2 kg et 2,6 kg, la masse des PF solubles étant elle comprise entre 3 et 1,3 kg par rapport aux 140 kg initialement émis. La valeur maximale calculée dans le cas n°1 est obtenue avec une source à la brèche du circuit primaire peu réaliste, l'émission d'aérosols provenant de la fusion du cœur ne pouvant être limitée uniquement aux PF volatils.

#### **IV.3. Filtration du rejet atmosphérique**

Pour permettre d'écrêter la pression dans l'enceinte et d'éviter ainsi une rupture du confinement, il est prévu de pouvoir effectuer, à partir de 24 h, des rejets contrôlés, au travers d'un filtre, d'efficacité supérieure à 10 (filtre à sable prévu dans la procédure U5 des REP français). Cette filtration modifiera les caractéristiques de la source de rejet en réduisant la masse, mais aussi en modifiant le spectre des aérosols en suspension dans l'enceinte. Le piégeage dans le filtre se faisant préférentiellement sur les grosses particules, le spectre des particules rejetées à l'atmosphère aura, à 24 heures, un diamètre médian aérodynamique après filtration voisin ou légèrement inférieur à 1  $\mu$ m.

### **V - EXPERIENCES EN COURS OU PROJETEES POUR AMELIORER LES CONNAISSANCES SUR LES EMISSIONS ET LE COMPORTEMENT DES PF ET DES AEROSOLS EN CAS D'ACCIDENT GRAVE**

Les connaissances dans ces domaines restent encore largement insuffisantes et un certain nombre d'expériences internationales ont été réalisées (ex : MARVIKEN, LACE, DEMONA, ...) ou sont en projet.

En France, l'Institut de Protection et de Sécurité Nucléaire compte poursuivre ou réaliser un certain nombre d'expériences.

En ce qui concerne le comportement des aérosols, on peut citer :

- PITEAS "physique des aérosols" qui vise à étudier le comportement des aérosols solubles et insolubles en présence de vapeur d'eau, dans les conditions d'une enceinte de confinement de REP,
- TUBA, étude du comportement des aérosols dans un circuit,
- PITEAS-FILTRATION, étude du comportement et mesure de l'efficacité d'un filtre rustique destiné à réduire les rejets atmosphériques.

Pour l'émission à partir d'un cœur en fusion, on peut citer :

- HEVA qui, à partir de combustible irradié, porté à des températures définies, doit déterminer la cinétique d'émission des principaux PF

et produits de structure et les caractéristiques du spectre des aérosols émis et tenter d'identifier les principales formes chimiques des PF,

- PHEBUS-PF, expérience globale, qui vise à être représentative des conditions de l'ensemble combustible-circuit primaire-enceinte, doit permettre d'identifier les formes physico-chimiques des PF et de caractériser les aérosols (en suspension, déposés, dans les condensats).

Enfin pour les émissions à partir du corium interagissant avec le béton, des expériences sont en cours de définition pour essayer de quantifier cette éventuelle émission de PF.

## VI- CONCLUSION

Lors d'un accident grave hypothétique affectant un réacteur à eau sous pression (REP), la majorité des produits de fission (à l'exception des gaz rares et d'une faible fraction des iodes) et la totalité des matériaux de structure du coeur émis lors de la fusion vont former des aérosols à la brèche du circuit primaire.

Les formes chimiques de ces aérosols sont très difficiles à préciser car elles vont être très dépendantes du scénario (pression, température, degré d'oxydation des gaines, potentiel d'oxydo-réduction, emplacement de la brèche sur le circuit primaire,...).

Compte tenu des taux d'émission des différentes familles de PF, les césiums vont être majoritaires en masse, sous les formes CsOH et CsI solubles. Les autres formes des principaux PF les plus couramment admises sont pour les strontiums  $Sr(OH)_2$  (soluble) et pour les Te, Ru, La, Ce, les formes métalliques ou les formes oxydes, qui sont pratiquement toutes insolubles.

Pour les caractéristiques physiques du spectre des aérosols restant en suspension dans le confinement et qui résultent de l'agglomération des aérosols primaires, on considère qu'ils sont composés de tous les matériaux émis. Des études de sensibilité, menées avec le code AEROSOLS/B2 et appliquées au cas des REP français montrent que, 24 h après la fusion et sans tenir compte des aérosols provenant de l'interaction corium-béton et d'une remise en suspension, les aérosols présentent les caractéristiques suivantes :

- diamètre médian aérodynamique en masse compris entre 5 et 6  $\mu m$ ,
- écart-type de la distribution de l'ordre de 1,6,

- masse en suspension inférieure à 5 kg (soit 0,1 gm<sup>-3</sup>) pour tous les aérosols, soit moins de 3,3 kg de PF (équivalent à moins de 1,5 % des PF initialement émis).

Après passage sur un dispositif de filtration (tel que celui prévu dans la procédure U5 visant à écrêter la pression dans l'enceinte), le diamètre médian serait réduit ( $\approx 1 \mu\text{m}$ ) et la masse d'aérosols éventuellement rejetée à l'atmosphère serait au minimum divisée par 10.

Les caractéristiques physiques jouent au niveau de la vitesse de dépôt sec (qui conditionne les activités restant sur le sol après le passage du panache), du taux de lavage par la pluie, du facteur d'interception par la végétation, etc. Il apparaît qu'avec le scénario moyen étudié, les PF seraient contenus dans des aérosols de faible diamètre (1  $\mu\text{m}$ , après filtration) dans lesquels les PF solubles (essentiellement le césium) formeraient environ la moitié de la masse, le reste étant surtout des matériaux de structure.

Dans l'environnement, la biodisponibilité des PF (fraction du dépôt initial transférable, à la plante par exemple) est généralement associée à la solubilité. Avant toute éventuelle modification des formes chimiques initiales au contact de l'atmosphère, des eaux ou du sol, on peut conclure de cette étude que le césium, élément dominant pour les conséquences à long terme, serait sous forme soluble et donc biodisponible, les autres PF importants (Sr, Ru, Te, ...) étant sous forme métal ou oxyde, insoluble.

## VII - REFERENCES

- /1/ J. BRISBOIS, A. L'HOMME, N. SCHEKTMAN, "Taking into account severe accidents in the design and the control of french PWR's"  
4th European Nuclear Conference and 9th Foratom Congress on Nuclear Energy of today and tomorrow, Geneve, June 1-6, 1986.
- /2/ J. BUSSAC, F. COGNE, J. PELCE, "The severe accidents and source term problems approach in France", International Topical Meeting on Thermal Reactor Safety, San Diego, February 2-6, 1986.
- /3/ J. DUFRESNE et al, "Présentation du système ESCADRE et applications".  
International Symposium on Severe Accidents in Nuclear Power Plants, Sorrente, March 1988, IAEA - SM - 296/13.
- /4/ Termes sources en cas d'accident de réacteur nucléaire, rapport d'un groupe d'experts de l'AEN, OCDE, Mars 1986.
- /5/ P.J. COOPER, B.Y. UNDERWOOD, "The impact of source term characteristics and the processes that modify them post release - on dry and wet depositium rates", final report on task 1 of extension to contract SR011 - 8 ou k (b), Commission des Communautés Européennes.
- /6/ Proceedings of the CSNI Specialists' Meeting on Core Debris - Concrete Interaction, Report EPRI NP-5054-SR- February 1987.
- /7/ J. GAUVAIN, G. LHIAUBET, "AEROSOLS/B2 - versior. 2, code aérosols à spectre multicomposant discrétisé avec condensation en pluie de vapeur d'eau, présentation du formalisme", Rapport technique DAS/SASC/87/54, Octobre 1987.
- /8/ J. GAUVAIN, G. LHIAUBET, "Influence of structural insoluble aerosols in severe accident scenarios with and without steam condensation onto soluble aerosol fission products", OECD workshop on water - cooled reactor aerosol code evaluation and uncertainty assessment, Brussels, 9-11 September, 1987.

**TABLEAU 1**

REP français de 900 MWe

Masses présentes de PF et de produits de structure, fractions et masses  
pouvant être émises en cas d'accident grave

	Masse (kg) des isotopes stables et instables	Fraction émise en cas de fusion du cœur	Masse émise dans l'en- ceinte (Kg)
PF et actinides			
I, Br	12	1	12
Cs, Rb	148	1	148
Te, Sb, Ag, Sn	28	1	28
Sr, Ba	116	0,1	11,6
As, In, Cd	55	0,1	5,5
Ru, Rh, Mo, Tc	328	0,1	32,8
Zr, Nb	180	0,001	0,2
La, Ce, Y ...	498	0,001	0,5
Actinides	641	0,001	0,6
<b>Total (hors gaz rares)</b>	<b>2006</b>		<b>239</b>
Combustible et matériaux de structure			
UO <sub>2</sub>	30 000	0,001	30
Fe (hors cuve)	20 600	0,001	20,6
Zr	18 150	0,001	18,2
Cr	6 200	0,001	6
Ni	4 100	0,001	4,1
Ag	1 900	0,1	190
In	360	0,1	36
Sn	200	1	200
Cd	120	0,5	60
<b>Total</b>	<b>131 630</b>		<b>615</b>

**TABLEAU 2**Source d'aérosols

Nature des aérosols	Masse émise (kg)	R <sub>50 v</sub> (μm)		(g.cm <sup>-3</sup> )	Durée d'émission (s)	Débit (g/s)
Solubles	140 (CsI+CsOH)	0,5	2	4	3 600	38,9
Insolubles	100 (PF) 620 (structures)	1,75	1,75	7	3 600	200

Débit de condensation de la vapeur d'eau (kg/s)

Temps (s)*	Condensation en pluie	Condensation en paroi
0	1	36,5
500	1	36,5
2245	1	11,1
2400	1	7,3
3600	1	7,3
4000	0	6,5
7500	0	2,5
40 000	0	0,2
86 400	0	0,1

\* entre chaque temps la valeur est interpolée linéairement.

**TABLEAU 3**

Définition des cas de calcul et principaux résultats

N° cas	Sources (1) d'aérosols solubles (S) insolubles (I)	Sec	Diffusio. p.	Condens. sur solubles	Condens. sur insolubles	Résultats à 24 h					
						Masse (kg) en suspension			Rayon aérodyna- mique médian ( m)	Ecart type	Facteur* de rétention
						PF (solubles)	Structures + PF (insol- ubles)	Total			
1	S	X				7,21		7,21	2,86	1,57	19
2	S + I	X				3	2,04	5,04	2,53	1,55	171
3	S + I	X	X			1,70	1,30	3	3,32	1,56	287
4	S + I			X		2,30	1,90	4,20	2,49	1,64	205
5	S + I		X	X		1,32	1,30	2,62	2,32	1,66	328
6	S + I		X		X	1,70	1,35	3,05	2,33	1,55	282
7	S + I				X	3	2	5	2,58	1,55	172

(1) masse des solubles : 140 kg  
masse des insolubles : 720 kg (dont 100 kg de PF)

\* masse émise/masse en suspension (tous aérosols).

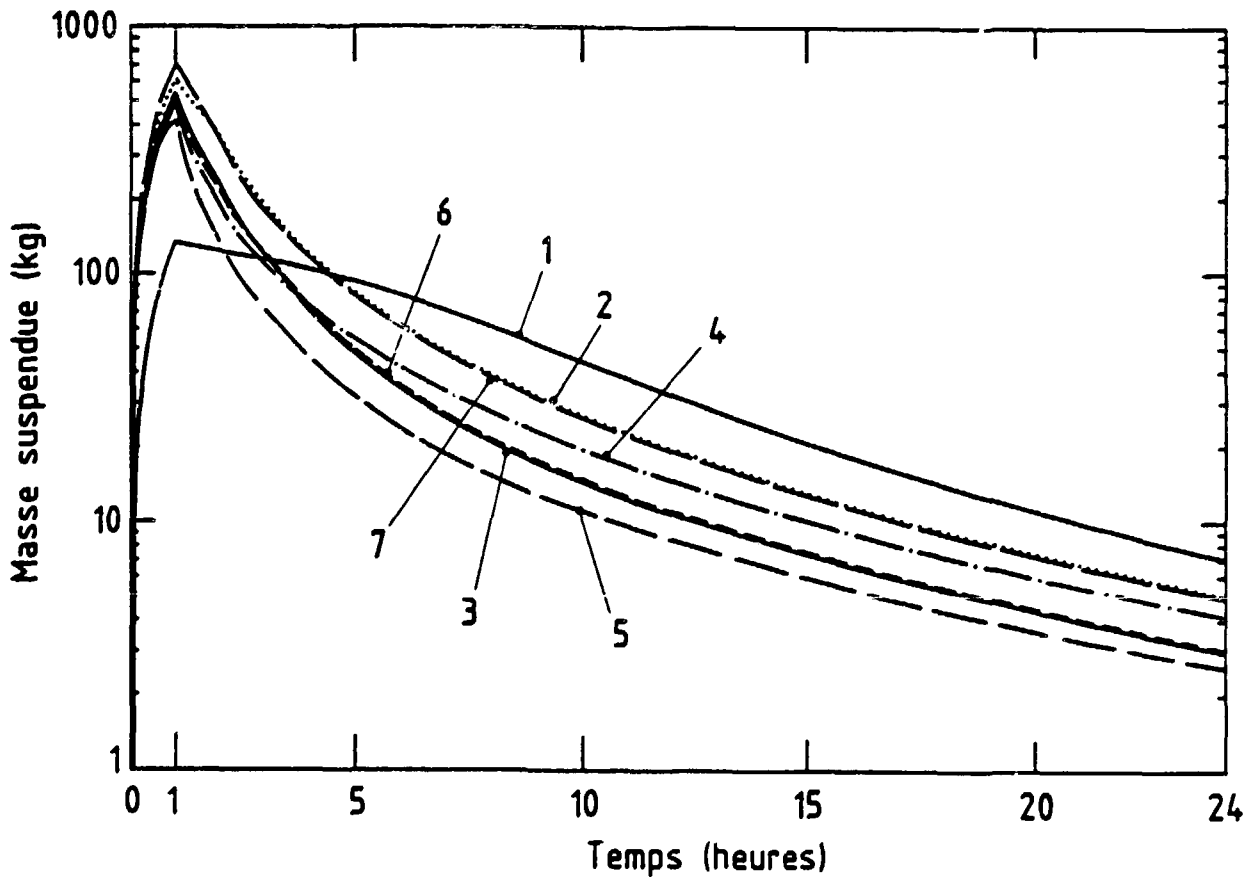


Fig. 1 - Evolution de la masse totale des aerosols en suspension dans l'atmosphère de l'enceinte

## DESTINATAIRES

DIFFUSION CEA

M. le Haut Commissaire  
 DSE  
 DDS  
 IPSN  
 IPSN : M. SCHMITT  
 IPSN : M. CANDES  
 OSSN : M. GUILLEMARD  
 DRSN : M. BUSSAC  
 DRSN : M. PELCE  
 DAS/DIR  
 DAS/SASICC  
 DERS Cadarache  
 SES Cadarache  
 SERE Cadarache  
 SIES Cadarache  
 SESRU Cadarache  
 SRSC Valduc  
 SEMAR  
 DPS/FAR + DPS/DOC : Mme BEAU  
 DPT/FAR  
 DSMN/FAR  
 CDSN/FAR : Mme PENNANEAC'H  
 UDIN/VALRHO  
 DEDR Saclay  
 DERPE/DIR Saclay  
 DRNR Cadarache  
 DRE Cadarache  
 DENT Saclay  
 DMECN/DIR Cadarache  
 DRE/STT Grenoble  
 DRE/SETH Grenoble  
 Service Documentation Saclay : Mme COTTON (3 ex.)  
 Service Documentation Cadarache : Mme REY

DIFFUSION HORS CEA

Secrétariat Général du Comité Interministériel de la Sécurité Nucléaire : M. CUREAU  
 Conseil Général des Mines : M. DE TOROUAT  
 Service Central de Sûreté des Installations Nucléaires : M. LAVERIE (+ 3 ex.)  
 Service Central de Sûreté des Installations Nucléaires - FAR  
 Monsieur le Président du G.P.d. : M. GUILLAUMONT  
 Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières : Mlle TISSIER  
 FRAMATOME : M. le Directeur Général  
 NOVATOME : M. le Directeur Général  
 TECHNICATOME : M. le Directeur Général  
 TECHNICATOME : Service Documentation  
 EDF / L'inspecteur général de sûreté et de sécurité nucléaires : M. TANGUY  
 EDF / SEPTEN (2 ex.)  
 EDF / SPT  
 VIENNA INTERNATIONAL CENTRE LIBRARY : Mrs ROSLYN M. STIRLING  
 M. HOHLEFELDER ) Bundes Ministerium für UMWELT, NATURSCHUTZ  
 M. BREEST ) und REAKTORSICHERHEIT - BONN (RFA)  
 M. KREWER - Bundes Ministerium für Forschung und Technologie - BONN (RFA)  
 M. BIRKHOFFER - Gesellschaft für Reaktorsicherheit - KOLN (RFA)  
 M. JAHNS - Gesellschaft für Reaktorsicherheit - KOLN (RFA)  
 M. HAUBER - U.S.N.R.C. - WASHINGTON (E.U.)  
 M. BECKJORD - U.S.N.R.C. - WASHINGTON (E.U.)

.../...



- M. J.S. MACLEOD - Nuclear Installations Inspectorate - LONDON (G.B.)  
M. GONZALES - Consejo de Seguridad Nuclear - MADRID (ESPAGNE)  
M. José DE CARLOS - Consejo de Seguridad Nuclear - MADRID (ESPAGNE)  
M. C. BORREGO - Département de l'Environnement - Université d'AVEIRO (PORTUGAL)  
M. E. HELLSTRAND - STUDSVIK ENERGITEKNIK AB -  
Nuclear Division, Safety and System Analysis - NYKOPING (SUEDE)  
M. NASCHI - Direttore Centrale della Sicurezza Nucleare e della Protezione Sanitaria -  
ENEA - ROMA (ITALIE)  
M. P. VANNI - Direttore relazioni esterne e informazione -  
ENEA - ROMA (ITALIE)  
M. ZHANG YU MAN - National Nuclear Safety Administration (CHINE)  
M. MA FUBANG, Director of the Nuclear Electricity Office - MIN (CHINE)  
M. Itsuro MISUMI - MITI (JAPON)  
M. EIICHI TSUJI - Science & Technology Agency -  
Director of the Nuclear Safety Division (JAPON)  
M. ICHIHASHI - Science & Technology Agency - Nuclear Safety Division (JAPON)  
M. FUKETA - JAERI - Center of Safety Research (JAPON)
- M. CHAVARDES (Attaché près de l'Ambassade de France aux Etats-Unis)  
M. MORIETTE (Attaché près de l'Ambassade de France au Japon)  
M. LALERE (Attaché près de l'ambassade de France en Chine)  
M. WUSTNER (Attaché près de l'Ambassade de France en RFA)

COPIE (SANS P.J.)

SRDE  
LEFH  
BAIN  
GCSR  
SASR  
SACP  
SAEP  
SGNR  
SAREP  
SAPN  
SASLU  
SASLU/VALRHO  
SEC  
SAET  
SAED  
STAS  
SASC  
SAEG  
SAM  
SPI