

**IRSN**INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

ÉTUDE DU RABATTEMENT DES PRODUITS DE  
FISSION SOUS FORME AEROSOL PAR UNE  
PULVERISATION DE GOUTTELETTES D'EAU  
GENEREES PAR UN SYSTEME D'ASPERSION DE  
REP

**MARCHAND Denis**  
ISRN IRSN - 2008/



Système de management  
de la qualité IRSN certifié

Laboratoire d'Expérimentations en Confinement Epuration et  
Ventilation



# THESE

présentée

*A L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE ROUEN*

en vue de l'obtention du titre de

**DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE ROUEN**

Discipline : **SCIENCE POUR L'INGENIEUR**

Spécialité : **ENERGETIQUE**

par

**Denis MARCHAND**

---

## **ÉTUDE DU RABATTEMENT DES PRODUITS DE FISSION SOUS FORME AEROSOL PAR UNE PULVERISATION DE GOUTTELETTES D'EAU GENEREES PAR UN SYSTEME D'ASPERSION DE REP**

---

### Composition du jury :

D. BOULAUD	Directeur de recherche à l'IRSN	RAPPORTEUR/PRESIDENT DU JURY
J.P.A.J. VAN BEECK	Professeur associé à l'Institut von Karman, Rhodes S <sup>te</sup> Genèse	RAPPORTEUR
C. DUMOUCHEL	Chargé de recherche CNRS, CORIA Rouen	EXAMINATEUR
G. GREHAN	Directeur de recherche CNRS, CORIA Rouen	DIRECTEUR DE THESE
E. PORCHERON	Ingénieur de recherche, IRSN Saclay	EXAMINATEUR
W. PLUMECOCQ	Ingénieur de recherche, IRSN Cadarache	EXAMINATEUR



« La vérité, ce n'est point ce qui se démontre,

c'est ce qui simplifie. »

Antoine de St-Exupéry



## **Résumé :**

L'étude porte les phénomènes physiques mis en jeu dans la collecte des aérosols par une aspersion multi gouttes pour des conditions thermohydrauliques représentatives de celles d'un accident grave de REP simulées dans l'expérience TOSQAN. Une caractérisation des aérosols (WELAS), couplée aux mesures des caractéristiques du spray (PDA, PIV), a fournie des informations détaillées permettant d'obtenir des résultats reproductibles montrant que la dynamique de collecte des aérosols comporte deux phases caractérisées par deux taux de rabattement distincts. Les efficacités élémentaires moyennes de collecte par classe d'aérosol ont été estimées en fonction du débit d'aspersion et de la température d'injection des gouttes. La comparaison entre l'approche numérique (code ASTEC) et les résultats expérimentaux sur la masse collectée par le spray a montré un bon accord au début de l'essai, puis un léger désaccord après un certain temps lié aux limites expérimentales de mesure et aux limites du code.

**Mots clés :** AEROSOL, TAUX DE RABATTEMENT, COLLECTE, EFFICACITE ELEMENTAIRE, ASPERSION MULTI GOUTTE, ACCIDENT GRAVE, PRODUIT DE FISSION, REP, ENCEINTE DE CONFINEMENT, SURETE, CODE ASTEC

## ***WASHOUT STUDY OF FISSION PRODUCTS UNDER AEROSOL FORM BY A DROPLETS PULVERIZATION OF PWR WATER SPRAY CONTAINMENT***

### ***Abstract:***

The study investigated the physical phenomena involved in the aerosols washout by water droplets for thermal hydraulic conditions representative of a severe accident in a PWR simulated into the TOSQAN vessel. A aerosols characterization (WELAS, turbidimeter) coupled with the spray characteristics measurements (PDA, PIV), provided detailed information allowing to obtain reproducible results showing that aerosols collection dynamics has two phases characterized by two distinct removal rates. The average elementary collection efficiency per aerosols class was estimated according to the water flow rates and the droplets temperature injection. The comparison between the numerical approach (ASTEC's code) and the experimental results on the collected mass by the droplets showed a good agreement at the test beginning, then a light dissension after a certain time related on the experimental limits of measurement and the limits of the code.





# R EMERCIEMENTS

Arrivé à la traditionnelle phase des remerciements, je me rends compte que ces trois années de travail à Saclay ont été l'occasion de rencontrer et d'interagir avec de nombreuses personnes. Fruit de nombreuses contributions, l'aboutissement de cette thèse m'amène naturellement à exprimer mes remerciements les plus sincères.

Cette thèse a été réalisée au sein de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) et plus précisément à la Direction de la Sûreté des Usines, des laboratoires, des transports et des déchets (DSU) dans le Service d'Etudes et de Recherches en Aérodispersion des polluants et en Confinement (SERAC). Qu'il me soit permis de remercier Monsieur J.L. Laborde, chef du SERAC pour m'avoir accueilli dans ce service ainsi que Monsieur L. Bouilloux, chef du laboratoire, pour m'avoir permis de mener à bien ce travail.

Je remercie chaleureusement Monsieur E. Porcheron Ingénieur-chercheur à l'IRSN pour avoir assuré le suivi de ce travail de thèse, en me faisant profiter de son expérience et de ses réflexions afin de me conseiller et de m'aiguiller. Je voudrais également lui exprimer ma profonde reconnaissance pour sa confiance dès le début, son appui scientifique de qualité et l'intérêt qu'il a témoigné quotidiennement à ce travail quelque soit le moment.

Je remercie Monsieur G. Grehan, Directeur de recherche au CNRS, pour avoir assuré la direction de cette thèse. Il a su me faire bénéficier de ses conseils et de son optimisme constant dans les moments de doutes qui accompagnent les trois années de thèse.

Je suis très reconnaissant à Monsieur J.P.A.J. VAN BEECK, Professeur associé à l'Institut von Karman, Rhodes S<sup>te</sup> Genèse, de me faire l'honneur d'être rapporteur de ce travail de thèse. Qu'il sache combien ses remarques m'ont été utiles et enrichissantes.

J'adresse également mes remerciements à Monsieur D. BOULAUD, Directeur de recherche à l'IRSN, pour avoir accepté malgré ses charges multiples au sein de l'IRSN, d'être rapporteur de ce travail de thèse et de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de cette thèse. J'ai pu apprécier les qualités humaines et professionnelles dont il témoigne au sein de l'institut à plusieurs occasions.

Fort peu aguerri au calcul numérique des grands codes de calcul à mon arrivée à l'IRSN, j'ai eu la chance de pouvoir bénéficier des lumières de Monsieur W. Plumecocq Ingénieur-chercheur à l'IRSN pour utiliser un outil de calcul performant. J'espère qu'en retour j'ai pu lui transmettre une partie des résultats expérimentaux nécessaires pour valider le code et les modèles physiques mis en jeu dans ses travaux. Je le remercie aussi de m'avoir fait l'honneur de faire partie du jury de thèse.

Je remercie également Monsieur C. Dumouchel, Chargé de recherche CNRS, pour ces remarques et ces commentaires avisés ainsi que d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.

Je suis très reconnaissant à l'ensemble des membres de l'équipe TOSQAN, Pascal, Amandine et Vincent, de m'avoir fait bénéficier de leurs compétences techniques et scientifiques et de leur dynamisme ainsi que leur collaboration tout au long de cette thèse.

Ces remerciements seraient incomplets si je n'exprimais pas mon immense reconnaissance envers mes amis Fabrice et Bruno rencontrés au fil des mes trajets entre la Touraine et le plateau de Saclay dans les célèbres TGV quotidiens 5302 et 5231 et la 205 ou Corsa, puis envers les doctorants de « ma génération » Charles et Pierre Yves des « générations suivantes » Roger, Pascale, Christophe, Philippe, Sébastien, Tony et Aurélie, pour toute l'amitié qu'ils m'ont témoigné tout au long de ces années passées ensemble.

Enfin, je tiens également à témoigner ma reconnaissance et mon affection à toutes les personnes de mon entourage qui m'ont soutenu durant ces trois années et particulièrement surtout à 6h00 le matin...

# T ABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS .....	9
TABLE DES MATIERES .....	11
LISTE DES ILLUSTRATIONS ET DES TABLEAUX .....	15
LISTE DES FIGURES.....	15
LISTE DES FIGURES DES ANNEXES.....	23
LISTE DES TABLEAUX.....	24
LISTE DES TABLEAUX DES ANNEXES.....	25
NOMENCLATURE .....	27
INTRODUCTION.....	31
CHAPITRE 1. CONTEXTE ET RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES.....	35
1.1. CONTEXTE ET RAPPEL SUR LE FONCTIONNEMENT DES REACTEURS A EAU PRESSURISEE ET SUR LA PHENOMENOLOGIE DES ACCIDENTS GRAVES .....	35
1.1.1. LES REACTEURS A EAU PRESSURISEE ET LA SECURITE .....	35
1.1.2. ACCIDENT GRAVE DE REACTEURS A EAU PRESSURISEE .....	38
1.1.2.1. L'échelle de INES.....	38
1.1.2.2. Déroulement général des accidents graves & phénomènes physiques envisagés pour un REP .....	38
1.1.3. L'ASPERSION DANS LES REACTEURS A EAU PRESSURISEE.....	41
1.1.4. CONCLUSION .....	42
1.2. ETAT DE L'ART BIBLIOGRAPHIQUE.....	43
1.2.1. TRAVAUX EXISTANTS SUR LES AEROSOLS SUSCEPTIBLES D'ETRE EMIS DANS UNE ENCEINTE DE CONFINEMENT .....	43
1.2.2. REVUE SUCCINCTE DES EXPERIENCES ANTERIEURES SUR LE COMPORTEMENT ET LE RABATTEMENT D'AEROSOLS.....	44
1.2.3. LES EXPERIENCES GLOBALES.....	44
1.2.3.1. Containment System Experiment (CSE).....	44
1.2.3.2. Nuclear Safety Pilot Plant (NSPP).....	45
1.2.4. LES EXPERIENCES ANALYTIQUES .....	47
1.2.4.1. DEMOnstration Nuklearen Aerosolverhalthens (DEMONA) .....	47
1.2.4.2. VANAM .....	49

1.2.4.3. KernschmelzAerosolVERhalten (KAEVER) .....	50
1.2.4.4. Caractérisation du Rabattement des Aérosols et de l'Iode par un Dispositif d'ASpersion (CARAIDAS) .....	52
1.2.5. CONCLUSION .....	53
<b>1.3. MODELISATION DU RABATTEMENT DES AEROSOLS PAR DES GOUTTES D'EAU .....</b>	<b>54</b>
1.3.1. ASPERSION : GRANULOMETRIE, VITESSE.....	54
1.3.2. TAUX DE RABATTEMENT $\lambda$ .....	55
1.3.3. DEFINITION DE L'EFFICACITE DE COLLECTE E .....	56
1.3.4. MECANISMES ELEMENTAIRES DE COLLECTE .....	57
1.3.4.1. Les effets mécaniques .....	58
1.3.4.2. Les effets phorétiques .....	66
1.3.4.3. Autres mécanismes .....	73
1.3.4.4. Synthèse en situation réacteur.....	73
1.3.5. LA MODELISATION DE LA COLLECTE DANS LES CODES DE CALCUL .....	75
1.3.5.1. Le module CPA du code intégral ASTEC.....	76
1.3.5.2. Les modèles de collecte utilisés.....	80
1.3.5.3. Les validations réalisées et les manques actuels.....	81
1.3.5.4. Mise à jour envisageable.....	83
<b>1.4. CONCLUSION.....</b>	<b>84</b>
<b>CHAPITRE 2. CPA ET GRILLE D'ESSAIS .....</b>	<b>85</b>
<b>2.1. INTRODUCTION .....</b>	<b>85</b>
<b>2.2. SIMULATION D'UN ESSAI AVEC CPA.....</b>	<b>85</b>
2.2.1. LE SPRAY .....	85
2.2.2. LES AÉROSOLS .....	86
2.2.3. DEFINITION DU MAILLAGE DE L'ENCEINTE .....	86
<b>2.3. DESCRIPTION D'UN ESSAI DE TYPE REFERENCE .....</b>	<b>88</b>
2.3.1. COMPORTEMENT DU GAZ ET DES GOUTTES D'ASPERSION .....	88
2.3.2. COMPORTEMENT DES AEROSOLS .....	91
<b>2.4. ETUDES DE SENSIBILITE .....</b>	<b>99</b>
2.4.1. INFLUENCE DES CARACTERISTIQUES THERMOHYDRAULIQUES INITIALES .....	99
2.4.1.1. Température gaz.....	99
2.4.1.2. Saturation (pression air et vapeur) .....	101
2.4.2. INFLUENCE DES CARACTERISTIQUES DE L'ASPERSION .....	103
2.4.2.1. Température des gouttes .....	103
2.4.2.2. Débit d'aspersion.....	105
2.4.2.3. Vitesse d'injection des gouttes .....	107
2.4.2.4. Diamètre initial des gouttes .....	110
2.4.3. INFLUENCE DES CARACTERISTIQUES DES AEROSOLS .....	112
2.4.3.1. Concentration initiale des aérosols.....	112
2.4.3.2. Diamètre initial des aérosols .....	112
<b>2.5. GRILLE D'ESSAIS .....</b>	<b>113</b>
<b>2.6. CONCLUSION.....</b>	<b>115</b>
<b>CHAPITRE 3. LES MOYENS EXPERIMENTAUX .....</b>	<b>117</b>

<b>3.1. INTRODUCTION .....</b>	<b>117</b>
<b>3.2. L'INSTALLATION TOSQAN.....</b>	<b>118</b>
3.2.1. DESCRIPTION DE L'INSTALLATION EXPERIMENTALE .....	118
3.2.2. MOYENS DE MESURE ASSOCIES IMPLANTES .....	120
3.2.2.1. <i>Caractérisation des gouttes</i> .....	121
3.2.2.2. <i>Caractérisation du gaz</i> .....	124
<b>3.3. MOYENS DE MESURE DEDIES AUX AEROSOLS .....</b>	<b>126</b>
3.3.1. LA CARACTERISATION DES AEROSOLS UTILISES LORS DES ESSAIS .....	127
3.3.1.1. <i>Par visualisation au microscope électronique à transmission</i> .....	128
3.3.1.2. <i>Par comparaison entre APS &amp; Aerosizer</i> .....	129
3.3.2. LA CARACTERISATION DES AEROSOLS EN SUSPENSION IN SITU DANS TOSQAN.....	134
3.3.2.1. <i>Le Granulomètre WELAS</i> .....	135
3.3.2.2. <i>Dimensionnement du système de prélèvement d'aérosols en suspension et implantation sur TOSQAN du WELAS</i> .....	138
3.3.2.3. <i>Qualification de la mesure des aérosols en suspension dans le gaz - Mesures comparatives APS/WELAS en série</i> .....	140
3.3.3. LA CARACTERISATION DES AEROSOLS COLLECTES PAR LES GOUTTES DE L'ASPERSION IN SITU DANS TOSQAN : LA TURBIDIMETRIE .....	146
<b>3.4. CARACTERISATION DES BUSES D'ASPERSION .....</b>	<b>149</b>
3.4.1. PRINCIPE DE LA MESURE PDA .....	150
3.4.2. PRESENTATION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL .....	150
3.4.3. RESULTATS EXPERIMENTAUX OBTENUS.....	151
3.4.4. CARACTERISATION PAR VISUALISATION .....	153
<b>3.5. CONCLUSION.....</b>	<b>154</b>
<b>CHAPITRE 4. TRAITEMENT DES DONNEES ET ANALYSE DES RESULTATS .....</b>	<b>155</b>
<b>4.1. INTRODUCTION .....</b>	<b>155</b>
<b>4.2. SCENARIO : PROTOCOLE D'ESSAI ET CONDITIONS INITIALES.....</b>	<b>155</b>
4.2.1. PROTOCOLE D'ESSAI .....	155
4.2.2. CONDITIONS INITIALES DES ESSAIS ET REPRODUCTIBILITE DES GRANDEURS THERMOHYDRAULIQUES .....	157
4.2.3. CONDITIONS INITIALES DES ESSAIS ET REPRODUCTIBILITE DES GRANDEURS LIEES AUX AEROSOLS .....	159
<b>4.3. ANALYSE DES ESSAIS SANS ASPERSION (S0).....</b>	<b>161</b>
<b>4.4. ANALYSE DE L'ESSAI DE REFERENCE AVEC ASPERSION (AG0).....</b>	<b>165</b>
<b>4.5. INFLUENCE DU DEBIT D'ASPERSION .....</b>	<b>177</b>
4.5.1. ESSAIS AVEC UNE TEMPERATURE D'INJECTION DES GOUTTES « FROIDES ».....	177
4.5.2. ESSAIS AVEC UNE TEMPERATURE D'INJECTION DES GOUTTES « CHAUDES » .....	183
<b>4.6. INTER-COMPARAISON : INFLUENCE DE LA TEMPERATURE A DEBIT CONSTANT.....</b>	<b>190</b>
4.6.1. DEBIT D'ASPERSION DE 5 G/S.....	190
4.6.2. DEBIT D'ASPERSION DE 10 G/S.....	191
DEBIT D'ASPERSION DE 18 G/S.....	192

<b>4.7. INFLUENCE DE LA GEOMETRIE DU SPRAY.....</b>	<b>193</b>
<b>4.8. COMPARAISON CODE EXPERIENCE.....</b>	<b>194</b>
4.8.1. ESSAI SANS ASPERSION (S0).....	194
4.8.2. ESSAI DE REFERENCE AVEC ASPERSION AG0.....	195
4.8.2.1. <i>Efficacité de collecte par les gouttes</i> .....	195
4.8.2.2. <i>Distributions granulométriques</i> .....	196
4.8.2.3. <i>Masse collectée</i> .....	197
4.8.3. INFLUENCE DU DÉBIT D'ASPERSION.....	198
4.8.3.1. <i>Efficacité de collecte par les gouttes</i> .....	198
4.8.3.2. <i>Distributions granulométriques</i> .....	199
4.8.3.3. <i>Masse collectée</i> .....	200
4.8.4. INFLUENCE DE LA TEMPERATURE D'INJECTION DES GOUTTES.....	201
4.8.4.1. <i>Efficacité de collecte par les gouttes</i> .....	201
4.8.4.2. <i>Distributions granulométriques des aérosols</i> .....	202
4.8.4.3. <i>Masse collectée</i> .....	203
<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>205</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>209</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>219</b>
<b>ANNEXE 1. CLICHES MICROSCOPIQUES.....</b>	<b>219</b>
<b>ANNEXE 2. POSITIONS DES DIVERSES CANNES ET HUBLOTS.....</b>	<b>222</b>
<b>ANNEXE 3. ETUDES DE L'EFFICACITE D'ECHANTILLONNAGE DES AEROSOLS LORS DES ESSAIS AEROSOLS DE TOSQAN.....</b>	<b>227</b>
<b>3.1. MATERIEL ET PRODUITS EXISTANTS.....</b>	<b>227</b>
3.1.1. DISPOSITIF DE MESURE OPTIQUE WELAS.....	227
3.1.2. QUALIFICATION DE L'EFFICACITE D'ECHANTILLONNAGE DES AEROSOLS.....	229
3.1.3. PARTICULES ET NOMBRE DE STOKES.....	229
<b>3.2. EFFICACITE D'ECHANTILLONNAGE.....</b>	<b>230</b>
3.2.4. GENERALITE.....	230
3.2.5. EFFICACITE DE TRANSMISSION.....	231
3.2.6. EFFICACITE DE CAPTAGE DES AEROSOLS.....	232
<i>Modèle de Baron et Willeke (2001)</i> .....	232
<i>Modèle de Hangel et Willeke, et TAI et Vincent (Witschger, 1996; Baron et Willeke, 2001)</i> .....	233
<i>Extrapolation des résultats</i> .....	235
3.2.7. SYNTHESE DE L'EFFICACITE D'ECHANTILLONNAGE.....	235
3.2.8. CONCLUSION SUR LA LIGNE D'ECHANTILLONNAGE.....	236
<b>ANNEXE 4. ETUDE PRELIMINAIRE EN VUE DE L'UTILISATION DU GRANULOMETRE WELAS ET SON IMPLANTATION SUR TOSQAN.....</b>	<b>237</b>
<b>ANNEXE 5. PRINCIPE DE LA MESURE PDA.....</b>	<b>241</b>
<b>ANNEXE 6. CALCUL DE L'EFFICACITE DE COLLECTE ELEMENTAIRE.....</b>	<b>244</b>
<b>ANNEXE 7. LES PRODUITS DE FISSION (PF).....</b>	<b>246</b>

# **L**ISTE DES ILLUSTRATIONS ET DES TABLEAUX

## **LISTE DES FIGURES**

FIG. 1-1 SCHEMA DE PRINCIPE DU CONFINEMENT D'UNE ENCEINTE DE REP DE 1300 MWe (ASN, 2005) .....	37
FIG. 1-2 FONCTION DE RECIRCULATION D'UN REP .....	37
FIG. 1-3 ECHELLE INES : ECHELLE DE GRAVITE DES INCIDENTS ET ACCIDENTS NUCLEAIRES (ASN, 2004) .....	38
FIG. 1-4 PHENOMENES PHYSIQUES INTERVENANT LORS D'UN ACCIDENT GRAVE (IRSN ET AL., 2006) .....	38
FIG. 1-5 ACCIDENT GRAVE.....	41
FIG. 1-6 GRANULOMETRIE DES GOUTTES EN FONCTION DE LA DIFFERENCE DE PRESSION DU CIRCUIT D'ASPERSION (DUCRET ET AL., 1993) .....	41
FIG. 1-7 POSITION DES BUSES DANS CSE (HILLIARD ET AL., 1970).....	45
FIG. 1-8 SCHEMA ET INSTRUMENTATION DE L'ENCEINTE CSE (HILLIARD ET AL., 1970) .....	45
FIG. 1-9 SCHEMA ET INSTRUMENTATION DE NSPP (PARSLY, 1971B) .....	46
FIG. 1-10 MODELE DE L'ENCEINTE DE NSPP (PARSLY, 1971A) .....	47
FIG. 1-11 ENCEINTE DEMONA (FROMENTIN ET AL., 1988).....	48
FIG. 1-12 INSTALLATION VANAM ET SCHEMA DE L'INSTALLATION (FIRNHABER, 1996).....	50
FIG. 1-13 KAEVER (SCHEIBEL ET AL., 1992) .....	51
FIG. 1-14 SCHEMA DE CARAIDAS (DUCRET ET AL., 1998B).....	52
FIG. 1-15 EFFICACITE MECANIQUE TOTALE DE COLLECTE EN FONCTION DE LA TAILLE DES PARTICULES (POWERS ET BURSON, 1993A).....	57
FIG. 1-16 EFFETS MECANIQUES.....	58
FIG. 1-17 VARIATIONS DE L'EFFICACITE DE COLLECTE PAR DIFFUSION BROWNIENNE EN FONCTION DU DIAMETRE DES GOUTTES $D_g$ (GRIST, 1982) .....	61

FIG. 1-18 EFFICACITE DE COLLECTE PAR IMPACTION EN FONCTION DE LA TAILLE DES AEROSOLS (POWERS ET BURSON, 1993A).....	64
FIG. 1-19 $\mathcal{E}_{int,pot}$ ET $\mathcal{E}_{int,vis}$ EN FONCTION DE LA TAILLE DES AEROSOLS (POWERS ET BURSON, 1993A).....	66
FIG. 1-20 SCHEMA EXPLICATIF DE LA THERMOPHORESE.....	67
FIG. 1-21 SCHEMA POUR LA DIFFUSIOPHORESE.....	70
FIG. 1-22 COMPARAISON QUALITATIVE DE L'EFFICACITE DE COLLECTE DES AEROSOLS.....	75
FIG. 1-23 SCHEMA DE LA STRUCTURE D'ASTEC V1.....	77
FIG. 1-24 COMPARAISON DES CONDITIONS THERMOHYDRAULIQUES AU COURS D'UN ESSAI CSE-A10 (PLUMECOCQ ET AL., 2005).....	81
FIG. 1-25 COMPARAISON DE LA CONCENTRATION EN AEROSOLS DANS LE GAZ POUR L'ESSAI CSE-A10 (PLUMECOCQ ET AL., 2005).....	82
FIG. 1-26 COMPARAISON DES MODELES D'EFFICACITE ELEMENTAIRE DE COLLECTE AVEC LES DONNEES DE CARAIDAS (PLUMECOCQ ET AL., 2005).....	83
FIG. 2-1 (A) MAILLAGE 1 (M1) ET (B) MAILLAGE 2 (M2).....	87
FIG. 2-2 MAILLAGE 3 (M3).....	87
FIG. 2-3 EVOLUTION TEMPORIELLE DE LA TEMPERATURE ET DE LA PRESSION POUR L'ESSAI DE REFERENCE POUR L'ETUDE DE SENSIBILITE.....	90
FIG. 2-4 EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DES GOUTTES ET DE LEUR COEFFICIENT DE TRANSFERT DE MASSE EN FONCTION DE LA HAUTEUR DE CHUTE.....	91
FIG. 2-5 EVOLUTION DU DIAMETRE ET DE LA VITESSE DES GOUTTES EN FONCTION DE LA HAUTEUR DE CHUTE.....	91
FIG. 2-6 EFFICACITE DE COLLECTE PAR MECANISME DIFFUSIF EN FONCTION DE LA HAUTEUR DE CHUTE DES GOUTTES.....	92
FIG. 2-7 EFFICACITE DE COLLECTE PAR MECANISMES D'INTERCEPTION ET D'IMPACTION EN FONCTION DE LA HAUTEUR DE CHUTE DES GOUTTES.....	92
FIG. 2-8 EFFICACITE DE COLLECTE PAR TOUS LES EFFETS MECANIQUES EN FONCTION DE LA HAUTEUR DE CHUTE DES GOUTTES.....	92
FIG. 2-9 EFFICACITE DE COLLECTE PAR EFFETS PHORETIQUES EN FONCTION DE LA HAUTEUR DE CHUTE DES GOUTTES.....	93
FIG. 2-10 CONTRIBUTION DES DIFFERENTS MECANISMES DE L'EFFICACITE TOTALE A LA HAUTEUR E06 = 0,063 M.....	93
FIG. 2-11 EFFICACITE DE COLLECTE PAR EFFETS MECANIQUES ET PAR EFFETS PHORETIQUES EN FONCTION DE LA HAUTEUR DE CHUTE DES GOUTTES.....	94
FIG. 2-12 EVOLUTION SPATIALE DES EFFICACITES DE COLLECTE POUR LA CLASSE DE TAILLES D'AEROSOLS DIAM 09.....	94
FIG. 2-13 EVOLUTION SPATIALE DES EFFICACITES DE COLLECTE POUR LA CLASSE DE TAILLES D'AEROSOLS DIAM 17.....	94



FIG. 2-14 ÉVOLUTIONS SPATIALES DE L'EFFICACITÉ TOTALE DE COLLECTE POUR DIVERSES CLASSES DE TAILLE D'AÉROSOL .....	95
FIG. 2-15 EFFICACITÉ DE COLLECTE MOYENNÉE SUR LA HAUTEUR TOTALE DE CHUTE .....	95
FIG. 2-16 ÉVOLUTIONS TEMPORELLES DES MASSES D'AÉROSOLS EN SUSPENSION DANS LE GAZ POUR L'ESSAI DE RÉFÉRENCE AVEC ET SANS ASPERSION .....	96
FIG. 2-17 ÉVOLUTIONS TEMPORELLES DES DÉPÔTS MASSIQUES TOTAUX D'AÉROSOLS SUR LES SURFACES VERTICALES POUR LES ESSAIS DE RÉFÉRENCE AVEC ET SANS ASPERSION .....	97
FIG. 2-18 ÉVOLUTIONS TEMPORELLES DES DÉPÔTS MASSIQUES D'AÉROSOLS SUR LES SURFACES HORIZONTALES DE LA ZONE R3 POUR LES ESSAIS DE RÉFÉRENCE AVEC ET SANS ASPERSION.....	97
FIG. 2-19 ÉVOLUTIONS TEMPORELLES DES DÉPÔTS MASSIQUES D'AÉROSOLS SUR LES SURFACES VERTICALES DES ZONES R2 ET R3 POUR LES ESSAIS DE RÉFÉRENCE AVEC ET SANS ASPERSION.....	97
FIG. 2-20 ÉVOLUTIONS TEMPORELLES DES DÉPÔTS MASSIQUES D'AÉROSOLS SUR LA SURFACE HORIZONTALE DE LA ZONE R1 POUR LES ESSAIS DE RÉFÉRENCE AVEC ET SANS ASPERSION.....	97
FIG. 2-21 ÉVOLUTIONS TEMPORELLES DU NOMBRE NORME DES AÉROSOLS DANS LE GAZ.....	98
FIG. 2-22 ÉVOLUTION SPATIALE DU DIAMÈTRE CRITIQUE DES AÉROSOLS LIÉE À L'IMPACTION.....	98
FIG. 2-23 ÉVOLUTIONS TEMPORELLES DES MASSES EN SUSPENSION DANS TOSQAN EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE INITIALE DU MÉLANGE GAZEUX .....	100
FIG. 2-24 ÉVOLUTIONS TEMPORELLES DES MASSES DÉPOSÉES SUR LES PAROIS (HORS SURFACE DE R1) DANS TOSQAN EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE INITIALE DU MÉLANGE GAZEUX .....	100
FIG. 2-25 ÉVOLUTIONS DU DIAMÈTRE DES GOUTTES AU COURS DE LA CHUTE DANS TOSQAN EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE INITIALE DU MÉLANGE GAZEUX .....	100
FIG. 2-26 ÉVOLUTIONS TEMPORELLES DU NOMBRE NORME DES AÉROSOLS DANS LE GAZ POUR DIFFÉRENTS DIAMÈTRES EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE INITIALE DES PAROIS.....	101
FIG. 2-27 ÉVOLUTIONS TEMPORELLES DES MASSES D'AÉROSOLS EN SUSPENSION DANS TOSQAN EN FONCTION DE LA SATURATION INITIALE DU MÉLANGE GAZEUX .....	102
FIG. 2-28 ÉVOLUTIONS TEMPORELLES DES MASSES D'AÉROSOLS DÉPOSÉES SUR LES PAROIS (HORS SURFACE DE R1) EN FONCTION DE LA SATURATION INITIALE DU MÉLANGE GAZEUX.....	102
FIG. 2-29 ÉVOLUTIONS TEMPORELLES DE LA SATURATION DU GAZ DANS TOSQAN EN FONCTION DE LA SATURATION INITIALE DU MÉLANGE GAZEUX.....	102
FIG. 2-30 ÉVOLUTIONS TEMPORELLES DU NOMBRE NORME DES AÉROSOLS DANS LE GAZ POUR DIFFÉRENTS DIAMÈTRES EN FONCTION DE LA SATURATION .....	103
FIG. 2-31 ÉVOLUTIONS TEMPORELLES DES MASSES D'AÉROSOLS EN SUSPENSION DANS TOSQAN EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE INITIALE DES GOUTTES D'ASPERSION .....	104
FIG. 2-32 ÉVOLUTIONS TEMPORELLES DES MASSES D'AÉROSOLS DÉPOSÉES SUR LES PAROIS DANS TOSQAN EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE INITIALE DES GOUTTES D'ASPERSION .....	104
FIG. 2-33 ÉVOLUTIONS DU DIAMÈTRE DES GOUTTES EN FONCTION DE LA HAUTEUR DE CHUTE DANS TOSQAN POUR DIFFÉRENTES TEMPÉRATURES D'INJECTION ET À DIFFÉRENTS TEMPS .....	104

FIG. 2-34	EVOLUTIONS TEMPORELLES DU DEBIT MASSIQUE DE VAPEUR DU SPRAY DANS TOSQAN EN FONCTION DE LA TEMPERATURE INITIALE DES GOUTTES D'ASPERSION .....	104
FIG. 2-35	EVOLUTIONS TEMPORELLES DU NOMBRE NORME DES AEROSOLS DANS LE GAZ EN FONCTION DE LA TEMPERATURE INITIALE DES GOUTTES D'ASPERSION .....	105
FIG. 2-36	EVOLUTIONS TEMPORELLES DES MASSES D'AEROSOLS EN SUSPENSION DANS TOSQAN EN FONCTION DU DEBIT D'ASPERSION.....	106
FIG. 2-37	EVOLUTIONS TEMPORELLES DES MASSES D'AEROSOLS DEPOSEES SUR LES PAROIS DANS TOSQAN EN FONCTION DU DEBIT D'ASPERSION .....	106
FIG. 2-38	EVOLUTIONS TEMPORELLES DES MASSES D'AEROSOLS EN SUSPENSION DANS TOSQAN EN FONCTION DE LA SURFACE DE COLLECTE POUR DIFFERENTS DEBITS D'ASPERSION.....	107
FIG. 2-39	EVOLUTIONS DU NOMBRE NORME DES AEROSOLS EN SUSPENSION DANS LE GAZ EN FONCTION DES DEBITS D'ASPERSION.....	107
FIG. 2-40	EVOLUTIONS TEMPORELLES DES MASSES D'AEROSOLS EN SUSPENSION DANS TOSQAN EN FONCTION DE LA VITESSE D'INJECTION DES GOUTTES D'ASPERSION.....	108
FIG. 2-41	EVOLUTIONS TEMPORELLES DES MASSES D'AEROSOLS DEPOSEES SUR LES PAROIS DANS TOSQAN EN FONCTION DE LA VITESSE D'INJECTION DES GOUTTES D'ASPERSION.....	108
FIG. 2-42	EVOLUTIONS DE LA VITESSE DES GOUTTES EN FONCTION DE LA HAUTEUR DE CHUTE, POUR DIFFERENTES VITESSES D'INJECTION DES GOUTTES D'ASPERSION.....	108
FIG. 2-43	EVOLUTIONS TEMPORELLES DU DIAMETRE DES GOUTTES A H = 0,5 M EN FONCTION DE LA VITESSE D'INJECTION DES GOUTTES D'ASPERSION .....	108
FIG. 2-44	EVOLUTIONS TEMPORELLES DU NOMBRE NORME DES AEROSOLS DANS LE GAZ EN FONCTION DE LA VITESSE D'INJECTION DES GOUTTES D'ASPERSION .....	109
FIG. 2-45	EFFICACITES MOYENNES DE COLLECTE D'UNE GOUTTE SUR LA HAUTEUR DE CHUTE EN FONCTION DE LA VITESSE D'INJECTION DES GOUTTES .....	109
FIG. 2-46	EVOLUTIONS TEMPORELLES DES MASSES D'AEROSOLS EN SUSPENSION DANS TOSQAN SUR LES PAROIS EN FONCTION DU DIAMETRE INITIAL DES GOUTTES D'ASPERSION.....	110
FIG. 2-47	EVOLUTIONS TEMPORELLES DES MASSES D'AEROSOLS DEPOSEES DANS TOSQAN SUR LES PAROIS EN FONCTION DU DIAMETRE INITIAL DES GOUTTES D'ASPERSION.....	110
FIG. 2-48	EVOLUTIONS DE LA VITESSE DES GOUTTES EN FONCTION DE LA HAUTEUR DE CHUTE A T = 18 S POUR LES DIFFERENTS DIAMETRES DE GOUTTES D'ASPERSION INJECTEES.....	111
FIG. 2-49	EVOLUTIONS DU DIAMETRE CRITIQUE POUR L'IMPACTATION EN FONCTION DE LA HAUTEUR DE CHUTE A T = 120 S POUR LES DIFFERENTS DIAMETRES DE GOUTTES D'ASPERSION INJECTEES.....	111
FIG. 2-50	EVOLUTIONS TEMPORELLES DU NOMBRE NORME DES AEROSOLS DANS LE GAZ EN FONCTION DU DIAMETRE DES GOUTTES D'ASPERSION.....	111
FIG. 2-51	EFFICACITE MOYENNE DE COLLECTE D'UNE GOUTTE SUR LA HAUTEUR DE CHUTE EN FONCTION DU DIAMETRE D'INJECTION DES GOUTTES.....	112
FIG. 3-1	PHENOMENES ETUDIES DANS TOSQAN.....	117
FIG. 3-2	SCHEMA DE L'INSTALLATION TOSQAN .....	118

FIG. 3-3 VUE GENERALE DE L'EXPERIENCE TOSQAN .....	119
FIG. 3-4 POSITION ET IDENTIFICATION DES HUBLOTS DE L'ENCEINTE TOSQAN .....	119
FIG. 3-5 DESCRIPTION DU SYSTEME D'ASPERSION (BRUN ET AL., 2005) .....	120
FIG. 3-6 SCHEMA DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL POUR L'IMAGERIE EN DEFAUT DE MISE AU POINT (MAEDA ET AL., 2002) .....	122
FIG. 3-7 SCHEMA DU PRINCIPE DE L'IMAGERIE EN DEFAUT DE MISE AU POINT (MAEDA ET AL., 2002).....	122
FIG. 3-8 EXEMPLE D'IMAGE EN DEFAUT DE MISE AU POINT (100 MM × 160 MM).....	123
FIG. 3-9 GRANULOMETRIE DE LA BUSE POUR L'ESSAI A 10 G/S (AG0).....	124
FIG. 3-10 SCHEMA DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL PIV .....	124
FIG. 3-11 POSITIONNEMENT DES THERMOCOUPLES DANS L'ENCEINTE TOSQAN.....	125
FIG. 3-12 POSITION DES DIVERSES CANNES DE THERMOCOUPLE ET HUBLOTS .....	125
FIG. 3-13 CLASSEMENT DES DISPOSITIFS METROLOGIQUES EN FONCTION DE LA GAMME DE MESURE DE QUELQUES INSTRUMENTS D'ANALYSE DES AEROSOLS (BARON ET WILLEKE, 2001) .....	126
FIG. 3-14 ORGANIGRAMME PRESENTANT DE MANIERE NON EXHAUSTIVE, LES INSTRUMENTS A LECTURE DIRECTE POUR ANALYSER LES AEROSOLS (BARON ET WILLEKE, 2001). .....	127
FIG. 3-15 MORPHOLOGIE AU MET DU MONOSPHER 1000 .....	128
FIG. 3-16 MORPHOLOGIE AU MET DU SiC.....	129
FIG. 3-17 MORPHOLOGIE AU MET DU AKE46 .....	129
FIG. 3-18 SCHEMA DU TEMPS DE VOL (TOF - TIME OF FLIGHT) .....	130
FIG. 3-19 SCHEMA DE PRINCIPE DE L'APS (BARON ET WILLEKE, 2001).....	131
FIG. 3-20 SYSTEME DE DISPERSION (A GAUCHE) ET DE DETECTION DES PARTICULES (A DROITE) DU GRANULOMETRE AEROSIZER.....	132
FIG. 3-21 DISTRIBUTION EN NOMBRE DES PARTICULES DE MONOSPHER 1000 POUR L'APS ET L'AEROSIZER.....	133
FIG. 3-22 DISTRIBUTION EN NOMBRE DES PARTICULES DE SiC POUR L'APS ET L'AEROSIZER.....	134
FIG. 3-23 DISTRIBUTION EN NOMBRE DES PARTICULES DE AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (AK42) POUR L'APS ET L'AEROSIZER .....	134
FIG. 3-24 VUE SCHÉMATIQUE DU GRANULOMÈTRE WELAS .....	135
FIG. 3-25 COURBES DE REPONSE (MÖLTER ET KEßLER, 2004) .....	136
FIG. 3-26 VOLUME DE MESURE DU WELAS .....	137
FIG. 3-27 SCHEMA GENERAL DU SYSTEME DE PRELEVEMENT (ROCHAS, 2006).....	139
FIG. 3-28 SCHEMA DU RACCORD CHOISI - CANNE DEMONTABLE (ROCHAS, 2006).....	139

FIG. 3-29 VUE EXTERIEURE DU SYSTEME DE PRELEVEMENT IMPLANTE SUR TOSQAN (Z14).....	140
FIG. 3-30 SCHEMA DES DISPOSITIFS APS/WELAS MIS EN SERIE SUR TOSQAN .....	141
FIG. 3-31 DISTRIBUTION EN NOMBRE NORMALISE DES AEROSOLS DE MONOSPHER 1000 POUR L'APS ET LE WELAS .....	142
FIG. 3-32 DISTRIBUTION EN NOMBRE NORMALISE DES AEROSOLS DE SiC POUR L'APS ET LE WELAS .....	143
FIG. 3-33 EVOLUTION DES DIAMETRES MOYENS MESURES POUR LE MONOSPHER 1000 PAR L'APS ET LE WELAS ...	143
FIG. 3-34 EVOLUTION DES DIAMETRES MOYENS MESURES POUR LE SiC PAR L'APS ET LE WELAS .....	144
FIG. 3-35 SCHEMA DE PRINCIPE DE LA VALIDATION DE LA CONCENTRATION MASSIQUE MESUREE PAR LE GRANULOMETRE WELAS (LEMAITRE ET AL., 2007B) .....	144
FIG. 3-36 COMPARAISON DE LA MASSE PESEE SUR LE FILTRE ET DE CELLE DEDUITE DE LA MESURE DU GRANULOMETRE WELAS .....	145
FIG. 3-37 SCHEMA DES DISPOSITIFS DE TURBIDITE MOD. 1 ET MOD. 2.....	147
FIG. 3-38 SCHEMA DE LA VUE ASPERSION DE TOSQAN.....	148
FIG. 3-39 VUE DU SYSTEME DE TURBIDIMETRIE EN LIGNE EN DESSOUS DU PUISARD.....	149
FIG. 3-40 ENCEINTE RAP .....	150
FIG. 3-41 PHOTO DU DISPOSITIF PHASE DOPPLER.....	151
FIG. 3-42 DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DES GOUTTES D'EAU ISSUES DE LA BUSE D1-35 MESUREE A 52 CM SUR L'AXE.....	151
FIG. 3-43 VISUALISATION PAR PLAN LASER DU SPRAY : DETERMINATION DE L'ANGLE DE SPRAY POUR LA BUSE D1 - 35 .....	154
FIG. 4-1 CHAMP DE TEMPERATURE DU GAZ DANS L'ENCEINTE AVANT INJECTION DE L'AIR ET DES AEROSOLS .....	156
FIG. 4-2 SCHEMA DES PHASES DE L'ESSAI AVEC ASPERSION .....	157
FIG. 4-3 (A) CHAMP DE TEMPERATURE DU GAZ DANS L'ENCEINTE AU COURS DE L'INJECTION DE VAPEUR (B) CHAMP DE TEMPERATURE DU GAZ DANS L'ENCEINTE AVANT DECLENCHEMENT DE L'ASPERSION	158
FIG. 4-4 REPRODUCTIBILITE DES CONDITIONS THERMOHYDRAULIQUES DANS L'ENCEINTE TOSQAN AU COURS DES ESSAIS .....	159
FIG. 4-5 NOMBRE D'AEROSOLS EN SUSPENSION DANS LE GAZ AU COURS D'UN ESSAI D'ASPERSION .....	160
FIG. 4-6 EVOLUTIONS TEMPORELLES DU DIAMETRE MOYEN DES AEROSOLS EN SUSPENSION DANS LE GAZ AU COURS D'UN ESSAI D'ASPERSION .....	160
FIG. 4-7 EVOLUTIONS TEMPORELLES DE LA MASSE D'AEROSOLS NORMEE EN SUSPENSION DANS LE GAZ AU COURS D'UN ESSAI D'ASPERSION .....	161
FIG. 4-8 EVOLUTIONS TEMPORELLES DES CONDITIONS THERMOHYDRAULIQUES ET DES CARACTERISTIQUES DES AEROSOLS (EN L1) AU COURS L'ESSAI DE REFERENCE SANS ASPERSION S0 .....	162

FIG. 4-9 EVOLUTION TEMPORELLE DU NOMBRE NORME D'AEROSOL EN SUSPENSION PAR CLASSE DE TAILLE POUR L'ESSAI S0.....	163
FIG. 4-10 DISTRIBUTIONS DES AEROSOLS POUR L'ESSAI S0 POUR DIFFERENTS TEMPS .....	163
FIG. 4-11 TAUX DE PERTES POUR L'ESSAI S0 EN FONCTION DU DIAMETRE DES AEROSOLS .....	164
FIG. 4-12 EVOLUTION TEMPORELLES DES TAUX DE PERTES GLOBALES POUR L'ESSAI S0.....	164
FIG. 4-13 FACTEUR DE DECONTAMINATION EN FONCTION DU TEMPS POUR L'ESSAI DE REFERENCE SANS ASPERSION S0 ET L'ESSAI S0F.....	165
FIG. 4-14 EVOLUTIONS TEMPORELLES DES CONDITIONS THERMOHYDRAULIQUES ET DES CARACTERISTIQUES DES AEROSOLS (EN L1) AU COURS L'ESSAI DE REFERENCE AVEC ASPERSION (AG0).....	166
FIG. 4-15 EVOLUTIONS TEMPORELLES DU DEBIT D'EAU EVACUEE DE L'ENCEINTE ET DU NOMBRE DE MOLE DE GAZ DANS L'ENCEINTE .....	167
FIG. 4-16 EVOLUTION DU NOMBRE D'AEROSOLS NORME EN SUSPENSION ET DU DIAMETRE MOYEN DES AEROSOLS POUR LES ESSAIS AG0 ET S0 DANS TOSQAN .....	168
FIG. 4-17 EVOLUTIONS TEMPORELLES DU NOMBRE NORME D'AEROSOLS PAR CLASSE DE TAILLE POUR L'ESSAI AG0.....	169
FIG. 4-18 DISTRIBUTIONS DES AEROSOLS EN SUSPENSION POUR DIFFERENTS TEMPS POUR L'ESSAI AG0.....	169
FIG. 4-19 EVOLUTIONS TEMPORELLES DE L'EFFICACITE GLOBALE DE DECONTAMINATION (EN L1) POUR L'ESSAI AG0 .....	170
FIG. 4-20 EFFICACITES GLOBALES POUR L'ESSAI DE REFERENCE AG0 ET POUR L'ESSAI S0 EN FONCTION DU DIAMETRE DES AEROSOLS .....	170
FIG. 4-21 MASSE ADIMENSIONNELLE EN FONCTION DU TEMPS .....	172
FIG. 4-22 EVOLUTION DE LA MASSE NORMEE D'AEROSOLS DANS LE GAZ ( $M(T)/M(0)$ ) ET DU TAUX DE RABATTEMENT POUR L'ESSAI DE REFERENCE (AG0) AU POINT DE PRELEVEMENT (L1) .....	173
FIG. 4-23 EVOLUTIONS TEMPORELLES DE LA MASSE TOTALE D'AEROSOLS COLLECTEE PAR LES GOUTTES .....	174
FIG. 4-24 EFFICACITE ELEMENTAIRE DE COLLECTE A DIFFERENTS TEMPS POUR CHAQUE CLASSE DE TAILLE D'AEROSOL (EN L1).....	176
FIG. 4-25 FACTEUR DE DÉCONTAMINATION EN FONCTION DU TEMPS POUR LES ESSAIS AG0 ET S0.....	177
FIG. 4-26 EVOLUTIONS DU DIAMETRE MOYEN NORME DES AEROSOLS POUR LES ESSAIS AG51, AG0 ET AG52.....	178
FIG. 4-27 EVOLUTIONS DE LA MASSE NORMEE D'AEROSOL EN SUSPENSION POUR LES ESSAIS AG51, AG0 ET AG52 .....	178
FIG. 4-28 EVOLUTIONS TEMPORELLES DE L'EFFICACITE GLOBALE DE DECONTAMINATION (EN L1) POUR L'ESSAI AG51 A UN DEBIT DE 5 G/S.....	179
FIG. 4-29 EVOLUTIONS TEMPORELLES DE L'EFFICACITE GLOBALE DE DECONTAMINATION (EN L1) POUR L'ESSAI AG0 A UN DEBIT DE 10 G/S.....	179
FIG. 4-30 EVOLUTIONS TEMPORELLES DE L'EFFICACITE GLOBALE DE DECONTAMINATION (EN L1) POUR L'ESSAI AG52 A UN DEBIT DE 18 G/S .....	180
FIG. 4-31 EFFICACITE ELEMENTAIRE DE COLLECTE POUR L'ESSAI A 5 G/S (AG51).....	181

FIG. 4-32 EFFICACITE ELEMENTAIRE DE COLLECTE POUR L'ESSAI DE REFERENCE A 10 G/S (AG0) .....	182
FIG. 4-33 EFFICACITE ELEMENTAIRE DE COLLECTE POUR L'ESSAI A 18 G/S (AG52).....	182
FIG. 4-34 FACTEUR DE DECONTAMINATION EN FONCTION DU DEBIT MASSIQUE D'ASPERSION DES GOUTTES INJECTEES A UNE TEMPERATURE DE 30 °C .....	183
FIG. 4-35 EVOLUTIONS DE LA MASSE NORMEE D'AEROSOL EN SUSPENSION POUR LES ESSAIS AG10, AG11 ET AG12 .....	184
FIG. 4-36 EVOLUTIONS DU DIAMETRE MOYEN NORME DES AEROSOLS POUR LES ESSAIS AG10, AG11 ET AG12.....	184
FIG. 4-37 EVOLUTIONS TEMPORELLES DE L'EFFICACITE GLOBALE DE DECONTAMINATION (EN L1) POUR L'ESSAI AG10 .....	185
FIG. 4-38 EVOLUTIONS TEMPORELLES DE L'EFFICACITE GLOBALE DE DECONTAMINATION (EN L1) POUR L'ESSAI AG11 .....	185
FIG. 4-39 EVOLUTIONS TEMPORELLES DE L'EFFICACITE GLOBALE DE DECONTAMINATION (EN L1) POUR L'ESSAI AG12 .....	186
FIG. 4-40 EFFICACITE ELEMENTAIRE DE COLLECTE POUR L'ESSAI A 5 G/S (AG10).....	187
FIG. 4-41 EFFICACITE ELEMENTAIRE DE COLLECTE POUR L'ESSAI A 10 G/S (AG11).....	188
FIG. 4-42 EFFICACITE ELEMENTAIRE DE COLLECTE POUR L'ESSAI A 18 G/S (AG12).....	188
FIG. 4-43 EFFICACITES MOYENNES POUR LES 3 ESSAIS A TEMPERATURE D'ASPERSION « CHAUDE » PENDANT LA PERIODE 2 .....	189
FIG. 4-44 FACTEUR DE DECONTAMINATION EN FONCTION DU DEBIT MASSIQUE D'ASPERSION DES GOUTTES INJECTEES A UNE TEMPERATURE DE 100 °C .....	189
FIG. 4-45 EFFICACITES MOYENNES POUR UN DEBIT DE 5 G/S PENDANT LA PERIODE 2 EN FONCTION DE LA TEMPERATURE D'INJECTION DES GOUTTES.....	190
FIG. 4-46 EFFICACITES MOYENNES POUR UN DEBIT DE 10 G/S PENDANT LA PERIODE 2 EN FONCTION DE LA TEMPERATURE D'INJECTION DES GOUTTES.....	191
FIG. 4-47 EFFICACITES MOYENNES POUR UN DEBIT DE 18 G/S PENDANT LA PERIODE 2 EN FONCTION DE LA TEMPERATURE D'INJECTION DES GOUTTES.....	192
FIG. 4-48 EVOLUTION DE LA TEMPERATURE MOYENNE DU GAZ EN FONCTION DU DEBIT .....	192
FIG. 4-49 EFFICACITES ELEMENTAIRES MOYENNES DE COLLECTE POUR LES ESSAIS A 18 G/S (AG52 ET AG2) .....	193
FIG. 4-50 FACTEUR DE DECONTAMINATION EN FONCTION DE LA SECTION DU SPRAY.....	194
FIG. 4-51 COMPARAISON DES CONCENTRATIONS NUMERIQUES DES AEROSOLS EN SUSPENSION DANS LE GAZ ISSUES DU CODE ET DE L'EXPERIENCE POUR L'ESSAI S0.....	195
FIG. 4-52 COMPARAISONS DES EFFICACITES DE COLLECTE DETERMINEES EXPERIMENTALEMENT AVEC LES RESULTATS ISSUS DU CODE POUR L'ESSAI DE REFERENCE AVEC ASPERSION .....	196
FIG. 4-53 COMPARAISONS DES DISTRIBUTIONS GRANULOMETRIQUES EXPERIMENTALES DES AEROSOLS EN SUSPENSION AVEC LES RESULTATS ISSUS DU CODE POUR L'ESSAI DE REFERENCE AVEC ASPERSION .....	197

FIG. 4-54 COMPARAISON ENTRE LA MASSE EXPERIMENTALE D'AEROSOLS COLLECTEE PAR LES GOUTTES ET CELLE ISSUE DU CODE CPA POUR L'ESSAI DE REFERENCE .....	198
FIG. 4-55 COMPARAISONS DES EFFICACITES DE COLLECTE DETERMINEES EXPERIMENTALEMENT AVEC LES RESULTATS ISSUS DU CODE POUR L'ESSAI A UN DEBIT DE 18 G/S (AG52).....	199
FIG. 4-56 COMPARAISONS DES EFFICACITES MOYENNES DE COLLECTE EXPERIMENTALES AVEC LES RESULTATS ISSUS DU CODE POUR LES ESSAIS A UN DEBIT DE 10 G/S (AG0) ET DE 18 G/S (AG52) .....	199
FIG. 4-57 COMPARAISONS DES DISTRIBUTIONS GRANULOMETRIQUES EXPERIMENTALES DES AEROSOLS EN SUSPENSION AVEC LES RESULTATS ISSUS DU CODE POUR L'ESSAI A UN DEBIT DE 18 G/S (AG52).....	200
FIG. 4-58 COMPARAISON ENTRE LA MASSE EXPERIMENTALE D'AEROSOLS COLLECTEE PAR LES GOUTTES ET CELLE ISSUE DU CODE CPA POUR L'ESSAI AG52 A 18 G/S .....	201
FIG. 4-59 COMPARAISONS DES EFFICACITES EXPERIMENTALE DE COLLECTE AVEC LES RESULTATS ISSUS DU CODE POUR L'ESSAI A UN DEBIT DE 10 G/S AVEC DES GOUTTES INJECTEES « CHAUDES » (AG11).....	202
FIG. 4-60 COMPARAISONS DES EFFICACITES MOYENNES DE COLLECTE EXPERIMENTALES AVEC LES RESULTATS ISSUS DU CODE POUR LES ESSAIS A UN DEBIT DE 10 G/S AVEC DES GOUTTES INJECTEES « FROIDES »(AG0) ET « CHAUDES » (AG11).....	202
FIG. 4-61 COMPARAISONS DES DISTRIBUTIONS GRANULOMETRIQUES EXPERIMENTALES DES AEROSOLS EN SUSPENSION AVEC LES RESULTATS ISSUS DU CODE POUR L'ESSAI A UN DEBIT DE 10 G/S AVEC DES GOUTTES INJECTEES « CHAUDES » (AG11).....	203
FIG. 4-62 COMPARAISON ENTRE LA MASSE EXPERIMENTALE D'AEROSOLS COLLECTEE PAR LES GOUTTES ET CELLE ISSUE DU CODE CPA POUR L'ESSAI A UN DEBIT DE 10 G/S AVEC DES GOUTTES INJECTEES « CHAUDES » (AG11) .....	204

## LISTE DES FIGURES DES ANNEXES

FIG. A 1 MORPHOLOGIE AU MET DU MONOSPHER 1000 .....	219
FIG. A 2 MORPHOLOGIE AU MET DU SiC .....	219
FIG. A 3 MORPHOLOGIE AU MET DU AKE46 .....	220
FIG. A 4 MORPHOLOGIE AU MET DU AKE42 .....	220
FIG. A 5 MORPHOLOGIE AU MET DU SM50 .....	220
FIG. A 6 MORPHOLOGIE AU MET DU SG10 .....	221
FIG. A 7 POSITION DES DIVERSES CANNES ET HUBLOTS .....	222
FIG. A 8 « CHAPEAU » DE PROTECTION DES THERMOCOUPLES .....	222
FIG. A 9 CELLULE OPTIQUE DU WELAS.....	228
FIG. A 10 VUE D'ENSEMBLE D'UNE CANNE DE PRELEVEMENT DES AEROSOLS .....	228
FIG. A 11 VUE DE FACE DU BOITIER DE REGULATION.....	228
FIG. A 12 EFFICACITE DE TRANSPORT DES PARTICULES POUR DIFFERENTS DIAMETRES DE TUBES – Q = 5 L/MIN, L = 1M [ROCHAS 2006].....	231

FIG. A 13 PRELEVEMENT ANISOAXIAL .....	232
FIG. A 14. EFFICACITE DE CAPTAGE POUR UN ANGLE DE 60°[ROCHAS 2006] .....	233
FIG. A 15. EFFICACITE DE CAPTAGE DES MODELES DE HANGEL ET WILLEKE, TSAI ET VINCENT EN FONCTION DU NOMBRE DE STOKES [ROCHAS 2006] .....	234
FIG. A 16. EXTRAPOLATION DE L'EFFICACITE DE CAPTAGE EN FONCTION DE STOKES [ROCHAS 2006] .....	235
FIG. A 17 ENCEINTE EXPERIMENTALE DECAPE .....	237
FIG. A 18 POINTS DE MESURE DANS DECAPE.....	238
FIG. A 19 EVOLUTION DE LA CONCENTRATION NUMERIQUE NORMALISEE (N(T)/N(0)) EN FONCTION DU TEMPS .....	239
FIG. A 20 EVOLUTION TEMPORELLE DU DIAMETRE MOYEN DES AEROSOLS .....	240
FIG. A 21 TRAJETS OPTIQUES DES RAYONS DANS LA GOUTTE .....	241
FIG. A 22 SCHEMA DU MONTAGE PHASE DOPPLER.....	242
FIG. A 23 SIGNAUX DOPPLER COLLECTES PAR LES DIFFERENTS PHOTODETECTEURS .....	243
FIG. A 24 DIFFERENCE DE PHASE EN FONCTION DU DIAMETRE DES GOUTTES .....	243

## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1-1 COMPARAISON ENTRE LES VITESSES DE THERMOPHORESE ET DE SEDIMENTATION .....	69
TABLEAU 2-1 ESSAI DE REFERENCE .....	88
TABLEAU 2-2 DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DES AEROSOLS DANS CPA.....	89
TABLEAU 2-3 CONDITIONS DE LA SIMULATION : TEST DE LA TEMPERATURE INITIALE DU GAZ .....	99
TABLEAU 2-4 CONDITIONS DE LA SIMULATION : TEST DE LA SATURATION .....	101
TABLEAU 2-5 CONDITION DE SATURATION POUR L'ETUDE DE SENSIBILITE.....	101
TABLEAU 2-6 CONDITIONS DE LA SIMULATION : TEST DE LA TEMPERATURE D'INJECTION DES GOUTTES D'ASPERSION .....	103
TABLEAU 2-7 CONDITIONS DE LA SIMULATION : TEST DU DEBIT D'ASPERSION .....	105
TABLEAU 2-8 CONDITIONS DE LA SIMULATION : TEST DE LA VITESSE D'INJECTION DES GOUTTES D'ASPERSION .....	108
TABLEAU 2-9 CONDITIONS DE LA SIMULATION : TEST DU DIAMETRE DES GOUTTES D'ASPERSION .....	110
TABLEAU 2-10 GRILLE D'ESSAIS. ....	114
TABLEAU 3-1 RECAPITULATIF DES MESURES DES DIAMETRES AERODYNAMIQUES .....	133
TABLEAU 3-2 RECAPITULATIF DES MESURES DES AEROSOLS (APS/WELAS) .....	141



TABLEAU 3-3 COMPARAISON DES DIAMETRES ET DES COEFFICIENTS CORRECTEURS .....	142
TABLEAU 3-4 CARACTERISTIQUES DE LA BUSE D1-35 EN FONCTION LE LA POSITION ET DU DEBIT DANS RAP .....	153
TABLEAU 4-1 CONDITIONS INITIALES DE L'ESSAI S0 A LA FIN DE L'INJECTION DE VAPEUR .....	161
TABLEAU 4-2 CONDITIONS INITIALES DE L'ESSAI DE REFERENCE AG0 A T = 0 S.....	165
TABLEAU 4-3 CONDITIONS INITIALES DES ESSAIS A T = 0 S.....	178
TABLEAU 4-4 TAUX DE RABATTEMENT ( $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ) A PARTIR DES DONNEES DU GAZ .....	180
TABLEAU 4-5 CONDITIONS INITIALES DES ESSAIS A T = 0 S.....	183
TABLEAU 4-6 TAUX DE RABATTEMENT ( $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ) A PARTIR DES DONNEES DU GAZ .....	186

### LISTE DES TABLEAUX DES ANNEXES

TABLEAU A 1 POSITIONS VERTICALES DES POINTS DE MESURE DANS TOSQAN .....	223
TABLEAU A 2 POSITIONS RADIALES DES POINTS DE MESURE DANS TOSQAN.....	224
TABLEAU A 3 POSITIONS ANGULAIRES DES POINTS DE MESURE DANS TOSQAN .....	225
TABLEAU A 4 DISTANCE EXPRIMEE EN CM ENTRE LES THERMOCOUPLES PROCHE PAROIS ET LA PAROI .....	225
TABLEAU A 5 CORRESPONDANCE ENTRE LES SYSTEMES DE COORDONNEES Z ET Z/D <sub>INJ</sub> POUR LES THERMOCOUPLES DES CANNES VERTICALES.....	226
TABLEAU A 6 NOMBRE DE STOKES ASSOCIES AUX PARTICULES POUR DIFFERENTES VITESSES DE GAZ DANS TOSQAN A 120 °C ET 2 BAR.....	230
TABLEAU A 7 EFFICACITES DE TRANSMISSION ASSOCIEES AUX PARTICULES .....	232
TABLEAU A 8 EFFICACITE DE CAPTAGE EN FONCTION DU NOMBRE DE STOKES ET DE L'ANGLE DE PRELEVEMENT ....	233
TABLEAU A 9 EFFICACITE DE CAPTAGE DES MODELES DE HANGEL ET WILLEKE, TSAI ET VINCENT .....	234
TABLEAU A 10 ESTIMATION DE L'EFFICACITE DE CAPTAGE DES PARTICULES .....	235
TABLEAU A 11 EFFICACITE D'ECHANTILLONNAGE EN FONCTION DU TYPE DE PARTICULE UTILISEE POUR UNE LIGNE DE PRELEVEMENT DE 1 M DE LONGUEUR ET DE 6 MM DE DIAMETRE (D <sub>C</sub> ).....	236
TABLEAU A 12 CONDITIONS DES ESSAIS.....	238



# NOMENCLATURE

## Caractères usuels

$C$	Concentration massique en aérosol ( $\text{kg.m}^{-3}$ )
$C_u$	Facteur de Cunningham
$d_p$	Diamètre de l'aérosol (m)
DMM	Diamètre médian en masse (m)
$d_{p_{crit}}$	Diamètre critique des particules (m)
$D_p$	Coefficient de diffusion de Stokes-Einstein ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ )
$d_w$	Diamètre moyen des gouttes (m)
$d_{goutte}$	Diamètre des gouttes (m)
$\frac{dS_{inj}}{dt}$	Débit massique d'injection d'aérosols dans l'enceinte ( $\text{kg.s}^{-1}$ )
$\frac{dR_{perte}}{dt}$	Débit massique de perte des aérosols par d'autres mécanismes ( $\text{kg.s}^{-1}$ )
$E$	Efficacité de collecte par une goutte
$E_{totale}$	Efficacité totale de collecte par une goutte
$E_{elem}^i$	Efficacité de collecte par une goutte d'aérosols de la classe i
FD	Facteur de décontamination
$h$	Hauteur de chute (m)
HR	Humidité relative
$K_{B_M}$	Coefficient de transfert de masse

$k_b$	Constante de Boltzmann ( $1,3806503 \times 10^{-23} \text{ m}^2.\text{kg}.\text{s}^{-2}.\text{K}^{-1}$ )
$k_g$	Coefficient de conductivité thermique de l'atmosphère gazeuse de la particule ( $\text{W}.\text{m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )
$k_p$	Coefficient de conductivité thermique de la particule ( $\text{W}.\text{m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )
$k'_p$	Coefficient de transfert de masse des aérosols ( $\text{m}.\text{s}^{-1}$ )
$K_{\text{TA}}$	Coefficient de thermophorèse
$L_s$	Distance d'arrêt de la particule (m)
$M$	Masse molaire du composant ( $\text{g}.\text{mol}^{-1}$ )
$m_a(t)$	Masse d'aérosols en suspension dans l'enceinte à l'instant $t$ (kg)
$m_{\text{aérosols,init}}$	Masse d'aérosols injectée dans l'enceinte initialement (kg)
$m_{p\_collectée}$	Masse d'aérosols collectée par les gouttes (kg)
$n_i$	Nombre d'aérosols de la classe $i$
$n_{\text{Total}}$	Nombre de moles de gaz total
$P$	Pression (Pa)
$P_{\text{sat}}$	Pression de saturation (Pa)
$P_{\text{air}}$	Pression partielle d'air (Pa)
$P_{\text{abs}}$	Pression dans l'enceinte (Pa)
$P_{\text{vap}}$	Pression partielle de vapeur (Pa)
$Q_{\text{asp}}$	Débit d'aspersion ( $\text{g}.\text{s}^{-1}$ )
$Q_{\text{vol}}$	Débit d'aspersion volumique ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )
$r_{\text{goutte}}$	Rayon de la goutte (m)
$s$	Saturation
$T_{\text{asp,inj}}$	Température d'injections des gouttes (K)
$T_{\text{gaz}}$	Température du gaz (K)
$T_{\text{masse1/2}}$	Période de diminution de la masse de moitié (s)
$T_{\text{paroi}}$	La température des parois de l'enceinte (K)

$V$	Volume de l'enceinte ( $m^3$ )
$v_w$	Vitesse des gouttes ( $m.s^{-1}$ )
$\bar{v}_{th}$	Vitesse de thermophorèse ( $m.s^{-1}$ )
$V$	volume de la phase gazeuse ( $m^3$ )
$V_d$	Vitesse de dépôt par diffusiophorèse ( $m.s^{-1}$ )
$V_{ph}$	Vitesse de dépôt phorétique ( $m.s^{-1}$ )
$V_s$	Vitesse de Stefan ( $m.s^{-1}$ )
$U_\infty$	Vitesse terminale des gouttes ( $m.s^{-1}$ )
$X$	Fraction molaire du composant

#### Caractères grecs

$\alpha$	Diffusivité thermique
$\mathcal{E}_{db}$	Efficacité de collecte par diffusion brownienne
$\mathcal{E}_{difph}$	Efficacité de collecte par diffusiophorèse
$\mathcal{E}_{imp}$	Efficacité de collecte par impaction
$\mathcal{E}_{int}$	Efficacité de collecte par interception
$\mathcal{E}_{thermph}$	Efficacité de collecte par thermophorèse
$\eta_g$	Viscosité dynamique du gaz ( $Pa.s$ )
$\nu_g$	Viscosité cinématique du fluide ( $m^2.s^{-1}$ )
$\lambda$	Libre parcours moyen des molécules du gaz ( $m$ )
$\lambda_s$	Constante de rabattement des aérosols ( $s^{-1}$ )
$\lambda_m$	Taux de collecte en masse ( $s^{-1}$ )
$\rho_{eau}$	Masse volumique de l'eau ( $kg.m^{-3}$ )
$\rho_p$	Masse volumique des aérosols ( $kg.m^{-3}$ )

$\rho_g$  Masse volumique du gaz ( $\text{kg.m}^{-3}$ )

$\sigma$  Écart-type géométrique

### Nombres adimensionnels

Nombre de Reynolds  $Re_w = \left( \frac{d_w v_w \rho_g}{\eta_g} \right)$

Nombre de Schmidt  $Sc_p = \left( \frac{\eta_g}{\rho_g D_p} \right)$

Nombre de Peclet  $Pe = Re_w Sc_p$

Nombre de Knudsen  $Kn = \frac{2\lambda}{d_p}$

Nombre de Sherwood  $Sh_g = \frac{k'_p L}{D}$

Nombre de Stokes  $Stk = \frac{d_p^2 \rho_p v_w C_u}{9\eta_g d_w}$

Nombre de Prandtl  $Pr_g = \frac{\nu_g}{\alpha}$

## INTRODUCTION

Il convient tout d'abord de définir ce dont on veut parler et d'expliciter ce que l'on entend par le terme « aérosol ». On utilise le terme général *d'aérosol* pour désigner la suspension, dans un milieu gazeux, de particules solides ou liquides, présentant une vitesse de chute négligeable. En physique, on fixe arbitrairement une valeur supérieure à la taille des particules pouvant constituer un aérosol, en adoptant une vitesse de chute limite maximale pour le lieu considéré<sup>1</sup>. Cela correspond à des tailles de particule typiquement comprises entre le nanomètre et 100 microns (Schmauss, 1920, cité par (Renoux et Boulaud, 1998)). En toute rigueur, l'aérosol est un système diphasique formé par des particules et le gaz porteur. Mais dans la pratique, « **aérosol** » est souvent synonyme de « **particule** ». Dans l'atmosphère, les aérosols comptent parmi les principaux vecteurs de la pollution et de la radioactivité atmosphérique.

Dans le but de nettoyer cette atmosphère, le transfert de l'aérosol vers le sol peut se faire par plusieurs voies. En présence de précipitations, les particules présentes dans l'atmosphère locale du nuage peuvent être incorporées (suite à divers processus physico-chimiques) dans les gouttes d'eau formant le nuage (« phénomène dit de rainout »). Ensuite, les gouttelettes du nuage précipitent sous forme de pluie ou d'averse, et lors de leur chute, elles lavent l'air ambiant en se chargeant à nouveau en polluants qui sont alors collectés et rabattus vers le sol (« phénomène dit de washout »).

Ainsi, la collecte des aérosols par des gouttes et donc le rabattement de polluants par l'aspersion sont le thème de nombreuses études étant donné la grande diversité des domaines d'application de ce type de piégeage des particules :

- la météorologie, pour la croissance des gouttes de pluie et le rabattement de polluants atmosphériques (Tuncel et Ungor, 1996; Chate et Kamra, 1997; Ebert et al., 1998),
- le rabattement de polluants dans l'industrie (Gustafsson, 1999),
- le nettoyage de gaz et d'atmosphères dans l'industrie (Gustafsson, 1999; Balachandran et al., 2003; Gaunt et al., 2003),
- la protection de l'environnement des rejets radioactifs en cas d'accident grave dans les Réacteurs à Eau sous Pression (REP) (Postma et al., 1978; Lecomte, 1994; Vendel et al., 1999).

Nous nous focaliserons sur ce dernier thème. En France, les premiers grands programmes de recherche dans le domaine des accidents graves ont été initiés au début des années 80, suite à l'accident

---

<sup>1</sup> Définition donnée par la norme AFNOR X 44.001, Juin 1971

du réacteur de Three Miles Island 2 (TMI-2) en 1979. L'accident à l'unité 2 a démontré que la fusion significative du cœur pouvait se produire dans un réacteur de puissance commercial et qu'au moins deux des trois barrières physiques de confinement de la radioactivité pouvait être rompues. En conséquence, compte tenu de l'importance de son parc électronucléaire, la France a été amenée à développer des programmes de recherche de sûreté des réacteurs sur à peu près tous les sujets relatifs aux accidents graves, et s'est historiquement concentrée sur des risques d'accident ayant une probabilité très faible d'occurrence mais néanmoins pouvant conduire à des accidents dont les conséquences sont très importantes, accidents désignés sous le nom des « **accidents graves** ».

Lors d'un hypothétique accident grave de REP, l'enceinte de confinement peut être pressurisée par de la vapeur d'eau libérée à haute pression par une brèche du circuit primaire. La perte du refroidissement du réacteur conduirait à la dégradation du cœur nucléaire, ce qui entraînerait un relâchement de produits de fission<sup>2</sup>, sous forme d'aérosols et d'espèces gazeuses. Afin de préserver l'intégrité de l'enceinte de confinement du réacteur, un système d'aspersion permet, par l'injection d'eau froide, de diminuer la pression du bâtiment réacteur, d'homogénéiser et refroidir le mélange gazeux. L'aspersion permet aussi de piéger les produits de fission mis en suspension dans l'enceinte de confinement et de les rabattre vers le puisard (Grist, 1982). On estime actuellement que les performances de l'aspersion sont faibles en ce qui concerne le piégeage des formes gazeuses de l'iode, mais que ce système peut s'avérer très efficace pour la collecte des aérosols (Plumecocq, 1997). La quantification de l'efficacité de la collecte des produits de fission présente un grand intérêt pour la gestion des accidents graves, notamment pour l'évaluation de la quantité de radioactivité susceptible d'être relâchée dans l'environnement en cas de dépressurisation de l'enceinte suite à une brèche de cette dernière. Une bonne connaissance des phénomènes physiques qui gouvernent le rabattement des aérosols est indispensable pour estimer le niveau de rejet potentiel afin, autant que faire se peut, d'initier les actions destinées à optimiser les dispositions éventuelles à prendre autour de la centrale pour la protection des populations.

La sûreté nucléaire vit. Elle se nourrit des progrès scientifiques et techniques, des enseignements tirés du fonctionnement des réacteurs en situations normale et anormale afin d'évoluer continuellement.

Le rabattement des aérosols par l'aspersion est un des thèmes de recherche au sein de l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) et plus particulièrement du SERAC et ce dans le cadre des études de sûreté dans les REP (Ducret et al., 1998a; Vendel et al., 1999).

De plus, pour le futur réacteur EPR (European Pressurized water Reactor), l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) française a fixé comme objectifs de sûreté une réduction significative des rejets radioactifs pouvant résulter de toutes les situations d'accident, y compris les accidents avec fusion du cœur. Des dispositions de conception spécifiques doivent être prises afin d'aboutir à une élimination pratique des accidents pouvant conduire à des rejets précoces importants et à une limitation des conséquences des accidents avec fusion du cœur à basse pression. Les recherches menées dans ce cadre doivent donc permettre d'aider à remplir ces objectifs.

### **Objectif et plan de l'étude**

L'objectif de cette thèse est donc de parvenir à une meilleure compréhension des phénomènes physiques impliqués dans le rabattement des aérosols par un système d'aspersion générant une pulvérisation de gouttes d'eau, afin de contribuer à l'amélioration de la modélisation de ces phénomènes dans les codes de calcul de sûreté nucléaire. Comme il est impossible d'effectuer, dans ce domaine, des essais complètement représentatifs et de reproduire toutes les situations envisageables, il est nécessaire de réaliser des essais les plus analytiques possibles tout en conservant une représentativité par rapport au cas réacteur.

---

<sup>2</sup> Annexe 7 Les produits de fission (PF)



Cette étude consiste dans un premier temps, à synthétiser les connaissances sur les mécanismes de collecte des aérosols représentatifs de produits de fission, par une pulvérisation de gouttelettes d'eau, ceci pour des conditions thermohydrauliques représentatives de celles d'un accident grave de REP. Les aspects théoriques aussi bien qu'applicatifs sont considérés. Dans un second temps, il s'agit d'acquérir des données expérimentales à partir d'essais réalisés dans l'expérience TOSQAN (TONuS Qualification ANalytique) qui permet de reproduire des conditions thermohydrauliques typiques de celles pouvant être rencontrées dans une enceinte de confinement en cas d'accident grave du réacteur nucléaire. La finalité de ces essais est de déterminer des taux de rabattement et des efficacités de collecte au sein d'écoulements multiphasiques où le système d'aspersion qui génère une pulvérisation, est plus représentatif du cas réel, par rapport aux études précédentes (Vendel et Droulas, 2001). Enfin, troisièmement, de confronter les résultats expérimentaux avec ceux obtenus à l'aide d'un code de calcul.

Ce document est organisé en quatre chapitres.

- Le chapitre 1 présente, en première partie, le contexte de la thèse avec une brève description des Réacteurs à Eau Pressurisée et quelques rappels sur leur fonctionnement ainsi que sur la phénoménologie des accidents graves et l'aspersion utilisée comme moyen de sauvegarde. Ensuite, en deuxième partie, il dresse un état de l'art des expériences antérieures sur le comportement et sur le rabattement des aérosols. En dernière partie, les modèles associés aux mécanismes de collecte sont présentés ainsi qu'une brève description des différents codes existants ainsi qu'une description détaillée du code ASTEC (Accident Source Term Evaluation Code) utilisé pour nos simulations.

- Le chapitre 2 est dédié à l'étude numérique, avec le code choisi : le module CPA (containment part of ASTEC) du code ASTEC (Beste et Klein-Heßling, 2000; Plumecocq et al., 2005), des paramètres permettant de mieux appréhender les phénomènes de rabattement en fonction de la sensibilité à ces derniers et de définir une grille originale d'essais expérimentaux à réaliser dans l'enceinte TOSQAN.

- Le chapitre 3 présente les moyens expérimentaux en décrivant en premier lieu l'expérience TOSQAN utilisée pour caractériser le rabattement des aérosols par l'aspersion ainsi que son instrumentation dédiée à la caractérisation des aérosols et à la caractérisation du spray d'aspersion.

- Le chapitre 4 constitue la phase applicative de cette étude. Il s'appuie sur les données expérimentales obtenues au cours des essais réalisés dans l'enceinte TOSQAN à partir de la grille définie précédemment. Il présente le traitement des données et l'analyse des résultats expérimentaux en décrivant premièrement les essais de référence avec et sans aspersion, puis deuxièmement ceux dimensionnés pour caractériser l'influence des effets mécaniques ou phorétiques. Enfin troisièmement, le rôle du transfert des aérosols du gaz vers la zone de spray est estimé. Pour terminer les résultats expérimentaux sont confrontés à ceux issus des simulations réalisées à l'aide du module CPA du code ASTEC.

A la fin de ce document, nous exposons les conclusions générales que cette étude a permis d'obtenir et les perspectives entrevues, tant au niveau des voies d'amélioration possibles des modèles implantés dans le module CPA du code ASTEC qu'au niveau des programmes expérimentaux qui pourraient être entrepris dans l'expérience TOSQAN.



# CHAPITRE 1. CONTEXTE ET RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES

Ce chapitre constitue une introduction aux scénarios d'accidents avec fusion du cœur d'un réacteur envisagés sur un Réacteur à Eau Pressurisée (REP) et présente les rappels bibliographiques essentiels pour comprendre les phénomènes mis en jeu dans la collecte des aérosols par les gouttes d'aspersion du système de sauvegarde.

Dans une première partie sont rappelés quelques éléments sur le fonctionnement des REP et sur les différents phénomènes physiques pouvant se produire au cours d'un accident grave après le début de la fusion du cœur. Les conséquences vis-à-vis de la possible perte de la fonction de confinement des produits de fission et les moyens de sauvegarde associés pour éviter un relâchement de produits de fission dans l'environnement sont aussi présentées. Les conditions accidentelles susceptibles de résulter d'une dégradation du cœur sont décrites ainsi que les caractéristiques du système d'aspersion utilisé comme moyen de sauvegarde.

Dans une seconde partie, l'état de l'art des travaux antérieurs portant sur les aérosols susceptibles d'être émis lors d'un accident grave est présenté. Une synthèse des études entreprises sur le comportement des aérosols dans une enceinte de confinement ainsi que sur leurs rabattements par l'aspersion, est réalisée en détaillant d'une part, les expériences globales, et d'autre part, les expériences analytiques.

En troisième partie, la modélisation des phénomènes physiques mise en jeu lors du rabattement des gouttes est détaillée afin de mieux comprendre les résultats obtenus par la suite. Sont aussi présentées leurs modélisations dans les codes de calcul et plus particulièrement dans le code ASTEC.

## 1.1. CONTEXTE ET RAPPEL SUR LE FONCTIONNEMENT DES REACTEURS A EAU PRESSURISEE ET SUR LA PHENOMENOLOGIE DES ACCIDENTS GRAVES

### 1.1.1. LES REACTEURS A EAU PRESSURISEE ET LA SECURITE

#### Descriptif des REP (Durand-Smet, 1996)

Le principe de production de l'électricité dans une centrale nucléaire est le même que celui qui est utilisé dans les centrales thermiques classiques fonctionnant avec du charbon, du pétrole ou du gaz, à cette différence que le combustible utilisé comme source de chaleur est constitué par de l'uranium.

Le cœur du réacteur est constitué de crayons contenant des pastilles d'oxyde d'uranium ou d'un mélange d'oxyde d'uranium et de plutonium (combustible dit « MOX ») répartis en assemblages combustibles, et contenus dans une cuve en acier. Le cœur du réacteur de 900 MWe (2775 MW thermique) est constitué de 157 assemblages de combustibles, soit près de 80 tonnes d'oxyde d'uranium (UO<sub>2</sub>) faiblement enrichi en uranium 235. Au cours de son séjour dans le cœur, l'U<sup>235</sup> subit des fissions qui émettent des neutrons qui provoquent à leur tour d'autres fissions : c'est la réaction en chaîne. Cela donne naissance à de nombreux corps radioactifs dont les produits de fission (PF).

Le combustible est placé dans des gaines en zirconium, *première barrière*, pour éviter la contamination du circuit primaire. Le circuit primaire comprend la cuve qui contient le cœur du réacteur et trois boucles servant au refroidissement du cœur. Chaque boucle comprend un échangeur de chaleur et une pompe. L'eau primaire pénètre dans le cœur par la partie inférieure, à une température d'environ 285 °C, remonte le long des crayons combustibles, et ressort par la partie supérieure à une température de l'ordre de 320 °C. Sur l'une des boucles se trouve le pressuriseur qui maintient la pression de l'eau primaire à 155 bar pour éviter l'ébullition de l'eau qui est chauffée à plus de 300 °C (température d'ébullition : 344 °C). Le circuit primaire constitue la *deuxième barrière* pour les produits de fission en cas de rupture des gaines.

La réaction en chaîne, et donc la puissance du réacteur, est maîtrisée par des grappes de commande qui pénètrent dans le cœur ainsi que par la variation de la teneur en acide borique (absorbeur de neutrons) de l'eau du circuit primaire. Les grappes de commande permettent de démarrer et d'arrêter le réacteur ainsi que d'ajuster la puissance à la quantité d'énergie électrique que l'on veut produire. En cas de situations anormales, des grappes de sécurité chutent automatiquement dans le cœur, stoppant instantanément le réacteur. La concentration en acide borique est ajustée en fonction de l'épuisement progressif du combustible en matériau fissile.

L'enceinte du bâtiment réacteur a entre autres fonctions celle de confinement des produits de fission lors d'une rupture du circuit primaire. Elle constitue donc la *troisième et dernière barrière* vis-à-vis de l'environnement. En cas de rupture du circuit primaire et donc de perte du refroidissement, un système d'injection d'eau dans la cuve est activé. De plus, il existe un système d'aspersion d'eau dans l'enceinte qui fait chuter la pression et la température.

### **L'enceinte de confinement (Costaz, 2002)**

L'enceinte de confinement des réacteurs à eau sous pression assure deux fonctions :

- ❑ Le confinement est ainsi la protection du public et de l'environnement vis-à-vis des produits radioactifs susceptibles d'être dispersés à l'intérieur de l'enceinte en situation accidentelle ; à cette fin, les enceintes ont été conçues pour résister à la pression et à la température qui pourraient être atteintes en situation accidentelle, et pour présenter une étanchéité satisfaisante dans ces conditions.
- ❑ La protection du réacteur vis-à-vis des agressions externes (par exemple : les chutes d'avion, les tremblements de terre...).

Les enceintes de confinement des réacteurs à eau sous pression sont de deux types en fonction de la puissance de ces derniers :

- ❑ Les enceintes de type REP 900 MWe sont constituées d'une simple paroi en béton précontraint de 90 cm d'épaisseur. Cette paroi assure la résistance mécanique vis-à-vis de la pression de l'accident le plus sévère pris en compte à la conception et l'intégrité de la structure vis-à-vis d'une agression externe. L'étanchéité est, quant à elle, assurée par une peau métallique de faible épaisseur située sur la face interne de la paroi en béton.
- ❑ Les enceintes de type REP 1300 MWe et 1450 MWe (Fig. 1-1), sont constituées de deux parois, la paroi interne en béton précontraint et la paroi externe en béton armé. L'étanchéité est assurée par la paroi interne et le système de ventilation (EDE) qui collecte, dans l'espace entre les parois, les éventuelles fuites provenant de l'intérieur comme de l'extérieur.

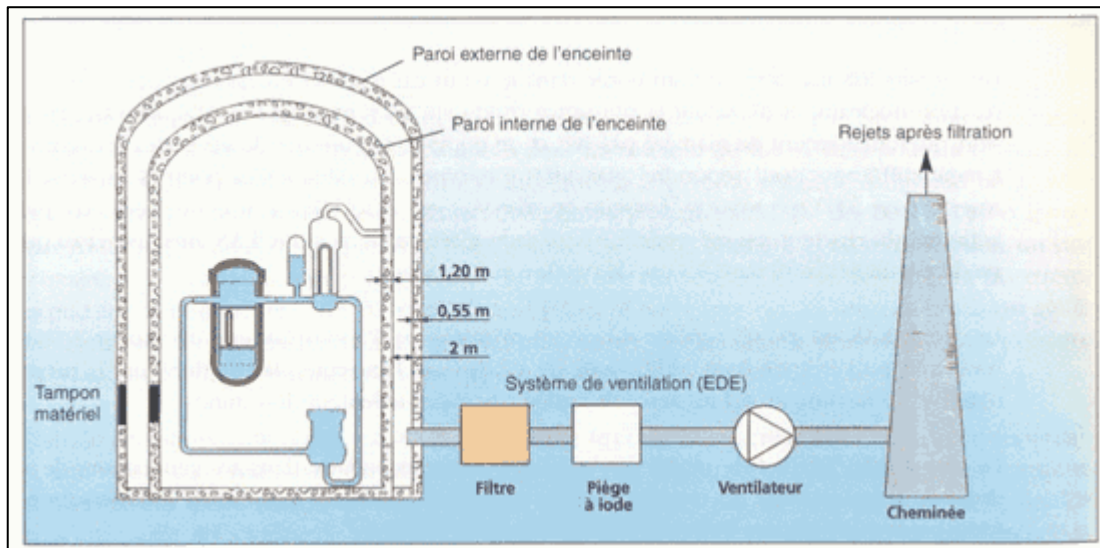


Fig. 1-1 Schéma de principe du confinement d'une enceinte de REP de 1300 MWe (ASN, 2005)

### Les circuits de sauvegarde (EDF, 2005)

Le rôle des circuits de sauvegarde est de maîtriser et de limiter les conséquences des incidents et des accidents. Il s'agit principalement des *circuits d'injection de sécurité* (RIS) et du *circuit d'aspersion dans l'enceinte* (EAS) du bâtiment réacteur (Fig. 1-2).

- ❑ **Les circuits RIS** injectent de l'eau borée dans le cœur du réacteur en cas d'accident afin d'étouffer la réaction nucléaire et d'évacuer la puissance résiduelle. Ils sont constitués d'accumulateurs sous pression qui fonctionnent de manière passive et de pompes qui ont des débits et des pressions de refoulement différentes pour répondre aux différents types d'accidents. Ces pompes aspirent l'eau d'un réservoir de 2000 m<sup>3</sup> environ, le *réservoir PTR*. Lorsque ce réservoir est vide, elles sont connectées aux puisards du bâtiment réacteur où est recueillie l'eau pulvérisée par le *système EAS*, ainsi que l'eau qui s'échappe du circuit primaire dans les cas de rupture de celui-ci.
- ❑ En cas de rupture du circuit primaire ou d'une tuyauterie de vapeur à l'intérieur de l'enceinte, le **circuit EAS** pulvérise de l'eau additionnée de soude, afin de diminuer la pression qui règne dans l'enceinte et de rabattre au sol les aérosols (radioactifs) éventuellement disséminés. La température de l'eau peut varier de 25 °C à 100 °C fonction du moment de l'accident.

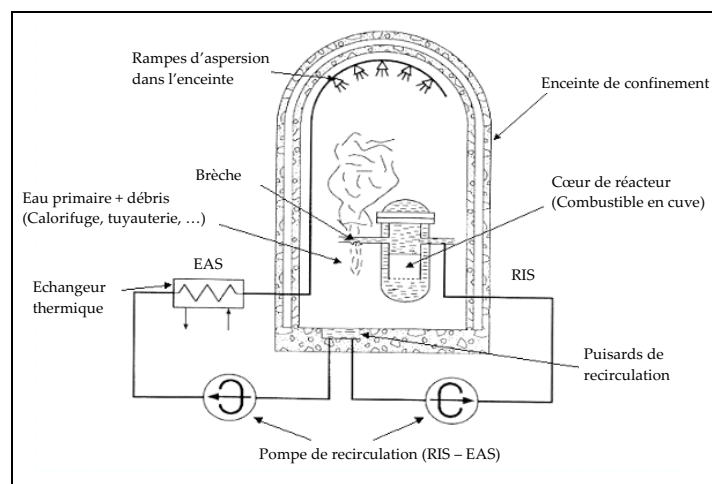


Fig. 1-2 Fonction de recirculation d'un REP

## 1.1.2. ACCIDENT GRAVE DE REACTEURS A EAU PRESSURISEE

### 1.1.2.1. L'échelle de INES

Tous les incidents, y compris les plus minimes, survenant dans les installations nucléaires doivent, obligatoirement, être déclarés aux autorités de sûreté et rendus publics. Ils sont classés selon une échelle de gravité adoptée au niveau international : l'échelle INES<sup>3</sup> (Fig. 1-3). Le classement va de l'anomalie sans conséquence (« niveau 0 ») à l'accident le plus grave (« niveau 7 »), niveau attribué à l'accident de Tchernobyl. Le travail de cette thèse s'inscrit à partir du niveau 6.

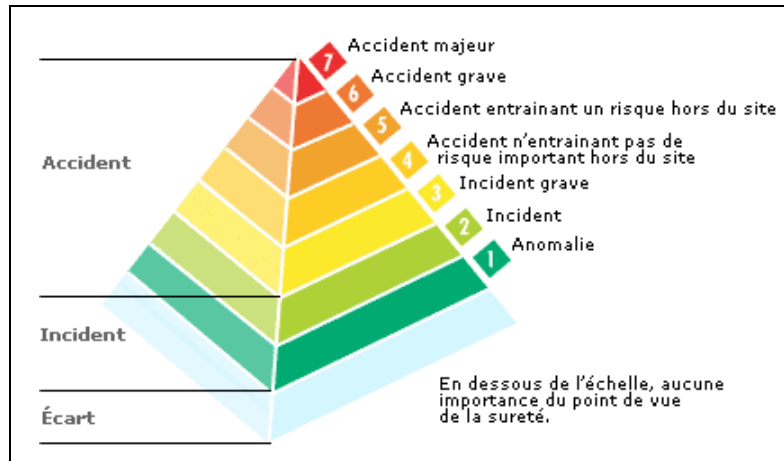


Fig. 1-3 Echelle INES : échelle de gravité des incidents et accidents nucléaires (ASN, 2004)

### 1.1.2.2. Déroulement général des accidents graves & phénomènes physiques envisagés pour un REP

La Fig. 1-4 schématise les principaux phénomènes physiques susceptibles de survenir lors d'un accident grave, ainsi que les systèmes de sauvegarde impliqués.

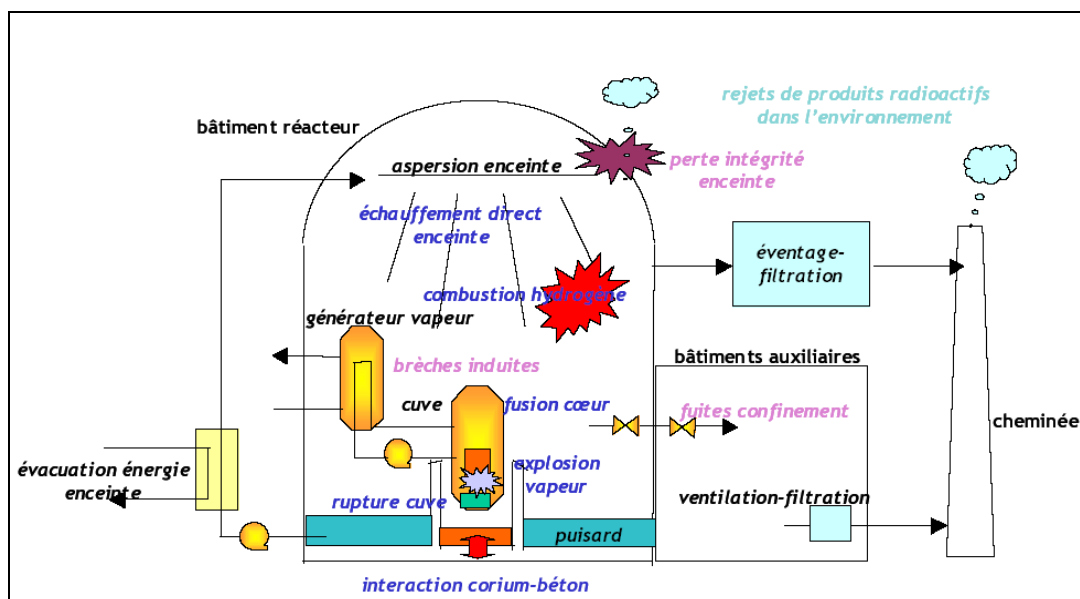


Fig. 1-4 Phénomènes physiques intervenant lors d'un accident grave (IRSN et al., 2006)

<sup>3</sup> International Nuclear Event Scale

Un accident grave a généralement pour origine un défaut de refroidissement du cœur dont la puissance résiduelle ne parvient plus à être évacuée. En une à quelques heures, suite à des défaillances multiples, humaines et/ou matérielles, incluant l'échec des procédures de sauvegarde, la structure des éléments combustibles se dégrade. Une suite de phénomènes nombreux et complexes se déroule alors, selon divers scénarios dépendant des conditions initiales de l'accident et des actions des opérateurs ; ces scénarios sont susceptibles, à terme, de conduire à la perte de l'intégrité du confinement et à des risques de relâchements importants de produits radioactifs à l'extérieur de l'enceinte de confinement.

Lors du dénoyage prolongé du cœur du réacteur, le combustible s'échauffe progressivement sous l'effet de la puissance résiduelle, qui n'est plus évacuée. Une réaction exothermique d'oxydation des gaines de combustible en zircaloy par la vapeur d'eau se produit, menant à une production importante d'hydrogène et de puissance thermique. Par ailleurs, des réactions métallurgiques entre le combustible et la gaine produisent des eutectiques à bas point de fusion, entraînant des relocalisations de matériaux dans le cœur. Sous l'effet de l'échauffement, les produits de fission les plus volatils, puis les produits de fission semi-volatils sont relâchés par le combustible.

Progressivement, il se forme, dans le cœur, un bain de matériaux fondus, appelé corium qui va ensuite s'écouler au fond de la cuve. A son contact avec de l'eau restant au fond de la cuve, une interaction se produit. Elle se traduit par une fragmentation grossière du corium, pouvant être suivie d'un phénomène plus violent, appelé explosion de vapeur. Sous l'effet de cette explosion, d'une part, le fond de la cuve peut être rompu, d'autre part, un projectile formé d'une partie du cœur peut être généré et venir rompre le couvercle de la cuve, ce qui pourrait s'accompagner également de la projection d'éléments de structure vers l'enceinte de confinement et de son éventuelle perte d'étanchéité.

Au cours de la dégradation du cœur, il est possible de mettre en œuvre des moyens ultimes d'appoint en eau pour le circuit primaire ou pour le circuit secondaire, par l'intermédiaire de « lignages » de différents circuits. Le renoyage d'un cœur dégradé, qui est un phénomène complexe, pourrait permettre, dans certaines conditions, d'arrêter la progression de l'accident. Par contre, ce renoyage peut provoquer un surcroît de production d'hydrogène et un relâchement supplémentaire de produits de fission.

Lors de la phase de dégradation du cœur, en l'absence de refroidissement par le circuit secondaire, un échauffement important des parois du circuit primaire et des tubes des générateurs de vapeur se produit. Si cet échauffement se conjugue avec une pression primaire élevée, une rupture du circuit primaire, appelée « brèche induite », peut survenir. Cette rupture entraîne une dépressurisation du circuit primaire, mais si elle intervient sur les tubes de générateurs de vapeur et si les soupapes du circuit secondaire sont ouvertes, elle crée un contournement de l'enceinte de confinement. L'hydrogène produit par la dégradation du cœur est relâché dans l'enceinte de confinement, où il peut brûler au contact de l'oxygène, entraînant un pic de pression et de température dans l'enceinte de confinement pouvant provoquer son endommagement.

Après la rupture de la cuve, le corium s'accumule dans le fond du radier provoque une érosion thermique progressive du radier en béton pouvant aller jusqu'à le percer, causant ainsi la perte du confinement. Durant cette phase, une quantité importante de gaz incondensables est libérée provoquant une montée en pression progressive de l'enceinte de confinement. Afin d'éviter la rupture de l'enceinte qui pourrait en résulter, un dispositif d'éventage-filtration (dispositif U5) a été installé sur les réacteurs à eau sous pression et peut être mis en œuvre 24 heures après le début de l'accident, en cas de défaillance du système d'aspersion enceinte.

Au cours du déroulement d'un accident grave, il peut se produire des fuites hors de l'enceinte de confinement via les traversées, résultant de fuites préexistantes ou de défaillances lors de l'isolement de l'enceinte. Ces fuites peuvent également se produire sur les circuits assurant la recirculation de l'eau

contenue dans les puisards de l'enceinte, notamment le système d'aspersion. Ces fuites débouchent dans les locaux des bâtiments auxiliaires où elles sont reprises par les circuits de ventilation, munis de dispositifs de filtration de différents types.

Pour les différents modes de rupture du confinement, les rejets dans l'environnement dépendent des conditions affectant le transfert des produits de fission dans l'installation ainsi que des moyens de sauvegarde disponibles. Ce transfert dépend principalement de la nature physico-chimique des produits de fission : gaz ou aérosols, forme chimique.

### L'accident grave

On appelle accident grave un accident au cours duquel le combustible est significativement dégradé par une fusion plus ou moins complète du cœur du réacteur. Compte tenu des mesures de prévention des accidents mises en place par l'exploitant (EDF, 2005), ce type d'accident reste hautement hypothétique. Cependant, du fait des conséquences importantes qu'aurait le rejet de produits radioactifs dans l'environnement, et au titre de la défense en profondeur, des efforts significatifs sont consacrés à leur étude. Les phénomènes physiques mis en jeu sont extrêmement complexes et sortent généralement du cadre des connaissances acquises hors du domaine nucléaire

Divers scénarios sont envisagés. Ils dépendent de la taille de la bêche (le cas échéant) des capacités d'évacuations de la puissance secondaire, de l'instant de l'ouverture des vannes de dépressurisation. Sans retour de l'injection de sécurité active, la défaillance de la cuve est inévitable. Entre le dénoyage du cœur et la rupture de la cuve, l'enchaînement des phénomènes comporte plusieurs phases similaires à tous les scénarios mais avec des temps différents. Les différents phénomènes physiques successifs, susceptibles de se produire et de conduire au relâchement de PF, formant ce que l'on appelle le « **Terme Source** », du cœur vers l'enceinte de confinement se résument ainsi (Fig. 1-5) :

- le dénoyage du cœur avec échauffement du cœur dû à la perte progressive de l'eau de refroidissement,
- l'oxydation de la gaine avec rejet d'hydrogène et de produits de fission,
- le début de la fusion du cœur avec formation d'eutectiques entre les matériaux, formation d'un bain de corium et rejet supplémentaire de produits de fission et aérosols inactifs,
- le début de relocalisation du corium dans le fond de la cuve rempli d'eau puis assèchement des débris qui refondent et vaporisation de l'eau résiduelle,
- l'entraînement des PF, sous forme gazeuse et sous forme aérosol, dans le circuit primaire, par les gaz chauds issus du cœur, puis le dépôt dans ce circuit et le relâchement des PF dans l'enceinte de confinement par la brèche,
- l'échauffement et la rupture de la cuve de protection et l'érosion du radier,
- le relâchement des PF dans l'enceinte de confinement.

Dans un des scénarios (comme une brèche dans le circuit primaire), de la vapeur d'eau, des produits de fission et des matériaux de structure sont libérés dans l'enceinte de confinement (Fig. 1-5). La libération de cette vapeur va entraîner une élévation de la pression et de la température dans l'enceinte. Typiquement, les conditions thermodynamiques de l'atmosphère sont : une pression de 5 bar, une température de 413 K et une atmosphère saturée en vapeur d'eau, constituée d'un mélange air-vapeur-gaz incondensables (H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, etc.) (EDF, 2005). De nombreuses variétés d'aérosols sont également produites. Afin de préserver le confinement, dès lors que la pression dans l'enceinte dépasse la pression critique de 2,4 bar (pour des REP de 1300 MWe), l'aspersion (**le système EAS**) est automatiquement déclenchée.



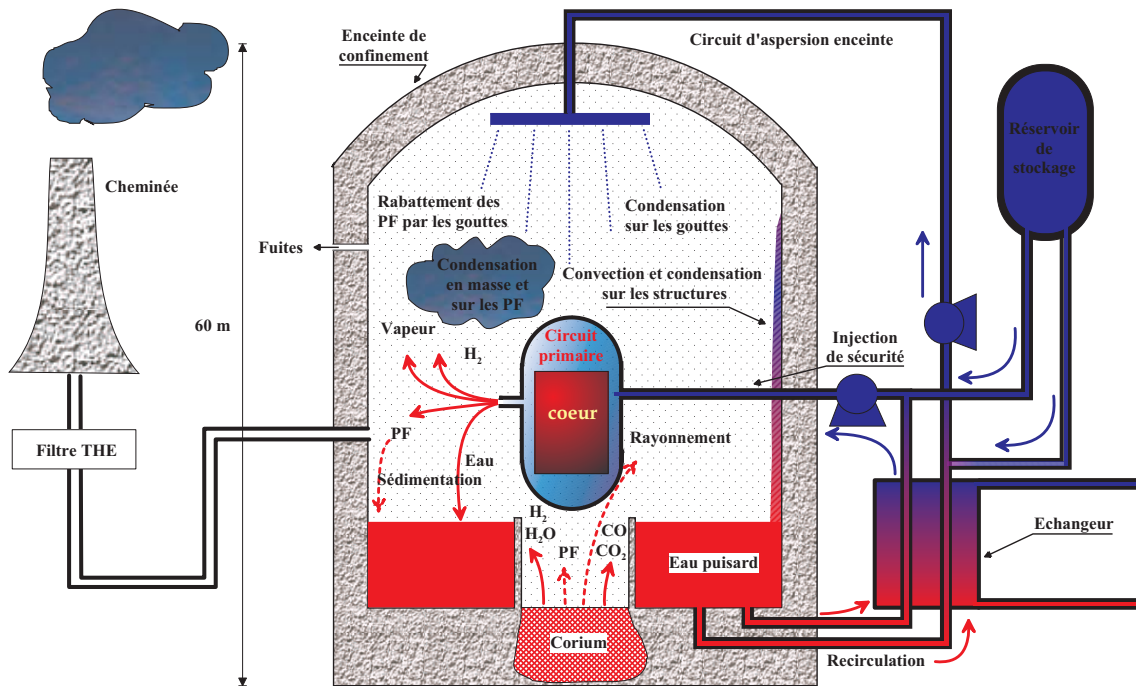


Fig. 1-5 Accident grave.

### 1.1.3. L'ASPERSION DANS LES REACTEURS A EAU PRESSURISEE

Le dispositif d'aspersion présent dans les REP 900 (Ducret et al., 1993; EDF, 2005) est constitué de deux rampes comportant 252 et 254 buses de marque SPRACO orientées de manière à couvrir le maximum de surface. Chaque buse a un orifice circulaire de 1 cm de diamètre et génère des gouttes dont la granulométrie varie en fonction des pressions relatives d'injection (Fig. 1-6). Leur diamètre moyen est d'environ 170  $\mu\text{m}$ . Il est important de noter que les buses engendrent aussi des gouttes dont la diamètre peut aller jusqu'à 1 mm.

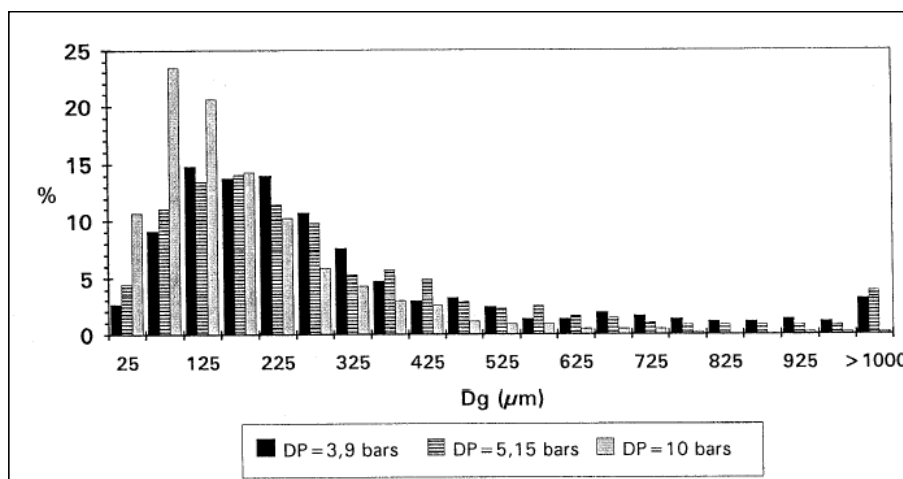


Fig. 1-6 Granulométrie des gouttes en fonction de la différence de pression du circuit d'aspersion (Ducret et al., 1993)

Chaque rampe d'aspersion débite 280  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$  d'eau, et le choix de la mise en route d'une ou deux rampes d'aspersion dépend du scénario accidentel rencontré.

Le système d'aspersion fonctionne suivant deux modes :

- En **mode d'injection directe**, les rampes sont alimentées depuis des réservoirs d'eau dont le volume est d'environ 2000 m<sup>3</sup> (PTR). Les gouttes d'eau ont une température d'environ 293 K. Ces réservoirs permettent de prolonger cette phase pendant une trentaine de minutes jusqu'à leur épuisement. Ensuite, le système bascule en mode recirculation.
- En passant en **mode recirculation**, il est possible de prolonger l'aspersion. Pour cela, les rampes sont alimentées par l'eau récupérée dans le puisard situé à la base du bâtiment réacteur. Elle passe dans un échangeur pour être refroidie à une température d'environ 343 K avant d'être réinjectée dans l'enceinte. Cette phase peut alors durer plusieurs dizaines d'heures, le temps de réduire la pression et de rabattre les produits de fission.

Le système d'aspersion peut être mis en marche aussi bien automatiquement que manuellement. Sa mise en marche automatique survient dès que la pression dans l'enceinte atteint un seuil critique ou bien sur un critère de débit de dose<sup>4</sup> dans l'enceinte.

### **Effets thermodynamiques**

Au déclenchement de l'aspersion, pour un grand nombre de situation accidentelle, l'atmosphère de l'enceinte est saturée en vapeur d'eau. La vapeur d'eau va se condenser sur les gouttes froides car la pression partielle de vapeur à la surface des gouttes est inférieure à la pression partielle de vapeur dans le mélange. Ceci va entraîner une augmentation de la température des gouttes au cours de leur chute (Lemaitre, 2004), associée à une baisse de la température du gaz dans l'enceinte ainsi qu'une baisse de la pression partielle de vapeur.

### **Rabattement des produits de fission**

Au moment de l'accident, la fuite de vapeur au niveau de la brèche entraîne les produits de fission présents sous forme d'aérosols qui vont être distribués dans l'enceinte. Ceux-ci sont majoritairement relâchés avec une masse volumique moyenne de 5500 kg.m<sup>-3</sup> pour un diamètre inférieur à 10 µm (Femandjian, 1982; Femandjian et al., 1987; Schwarz et al., 1999; Clement et al., 2005). Au cours de leur chute, les gouttes d'aspersion collectent une certaine masse d'aérosols par différents mécanismes que nous détaillerons au paragraphe §1.3.4. Ce rabattement permet de réduire la quantité d'aérosols radioactifs en suspension dans l'enceinte et de diminuer ainsi les risques liés au relâchement éventuel de la contamination en dehors de l'enceinte de confinement.

#### **1.1.4. CONCLUSION**

Les objectifs de la recherche sont donc de parvenir à comprendre au mieux ces phénomènes physiques et de réduire les incertitudes quant à leur quantification, afin d'être capable de développer des modèles applicables aux réacteurs. Ces modèles, regroupés au sein de codes de calcul informatiques, doivent permettre de prévoir le déroulement d'un accident grave.

Comme il est impossible d'effectuer, dans ce domaine, des essais à taille réelle et de reproduire toutes les situations envisageables, il est nécessaire de réaliser des essais élémentaires, permettant d'étudier séparément chaque phénomène physique, puis de confirmer sur des essais globaux les interactions entre ces phénomènes physiques. Le tout doit se faire à des échelles compatibles avec les capacités techniques et économiques des installations, tout en restant représentatives pour l'extrapolation à l'échelle du réacteur.

---

<sup>4</sup> *Activité radioactive dans l'enceinte trop importante*

La recherche concerne les réacteurs en fonctionnement et les réacteurs futurs. Les phénomènes de base sont les mêmes pour les réacteurs à eau sous pression actuels ou en projet. Toutefois, dans le cas des centrales existantes, les accidents graves n'ont pas été considérés lors de leur conception. Les modifications envisageables de l'installation sont donc restreintes et les recherches menées dans ce cadre ont essentiellement pour objectif de trouver des moyens de limiter les conséquences d'un éventuel accident grave.

Pour le futur réacteur EPR (European Pressurized water Reactor), l'Autorité de Sûreté Nucléaire a fixé comme objectifs de sûreté une réduction significative des rejets radioactifs pouvant résulter de toutes les situations d'accident concevables, y compris les accidents avec fusion du cœur. Les recherches menées dans ce cadre doivent donc aider à permettre de remplir ces objectifs.

## **1.2. ETAT DE L'ART BIBLIOGRAPHIQUE**

La modélisation des phénomènes mis en jeu dans le rabattement des produits de fission par l'aspersion présente un intérêt primordial pour l'évaluation du terme source présent dans l'enceinte de confinement en situation accidentelle et susceptible d'être relâché dans l'environnement. De nombreuses expériences menées à grande échelle sur le thème du comportement des produits de fission dans une enceinte sont décrites dans la littérature (DEMONA, VANAM et KAEVER (Fischer et Kanzleiter, 1999), NSPP (Parsly, 1971b), CSE (Hilliard et Postma, 1981) et CARAIDAS (Ducret et al., 1996)), mais peu s'intéressent à ces phénomènes dans des conditions thermodynamiques instationnaires bien maîtrisées. Afin d'étudier les paramètres pilotant la collecte des aérosols par un spray représentatif d'un système d'aspersion de REP, dans des conditions thermohydrauliques représentatives de celles d'un accident grave, l'IRSN a développé et utilise l'expérience TOSQAN (Zavaleta et Landesman, 1997). TOSQAN possède un haut niveau d'instrumentation qui permet, notamment, de caractériser localement les écoulements en conditions monophasique ou diphasique (Porcheron et al., 2003).

### **1.2.1. TRAVAUX EXISTANTS SUR LES AEROSOLS SUSCEPTIBLES D'ETRE EMIS DANS UNE ENCEINTE DE CONFINEMENT**

La singularité d'un accident grave, susceptible de survenir sur un réacteur nucléaire, par rapport à toute autre installation industrielle non nucléaire tient à la potentialité d'émission massive de produits radioactifs dans l'environnement et aux conséquences radiologiques associées (Verger, 2001). Les produits de fission (PF) en constituent la source principale et leur relâchement hors cuve, souvent appelé « terme source », est la première étape à appréhender.

Les aérosols émis dans l'enceinte de confinement vont être soumis à des phénomènes d'agglomération, de dépôt et éventuellement de remise en suspension depuis les dépôts. Les phénomènes physiques de base sont les mêmes que pour le transport dans le circuit primaire. Ils dépendent des conditions thermohydrauliques (taux d'humidité, condensation ou non de la vapeur d'eau). Les phénomènes de dépôt prédominants sont la sédimentation, la diffusiophorèse et la convection diffusion. Par ailleurs, les systèmes de sûreté tels que l'aspersion ont une influence importante sur la concentration d'aérosols.

Le relâchement des produits de fission hors du combustible d'un REP lors d'un régime transitoire accidentel est fonction de la température atteinte par ce combustible (seuil compris entre 1350 °C et 1800 °C (ABBAS, 1984; Duco, 1984)) et de la durée d'un tel échauffement. Ceci nécessite la prise en compte de la température dans les modèles d'émission des PF. Lors de la fusion du cœur, des aérosols sont émis en abondance notamment, la plus grande partie des PF est produite sous la forme gazeuse, et après nucléation homogène puis hétérogène sont mélangés à des aérosols issus des matériaux de structure, des barres de contrôle, des gaines, etc. La granulométrie de ces aérosols est inférieure à 100 µm, seule une fraction des aérosols formés migrera du circuit primaire vers l'enceinte de confinement avec un

diamètre médian en masse de l'ordre de 1 à 2  $\mu\text{m}$  (Cordfunke et Konings, 1993; Bourdon et al., 2002). Des essais analytiques HEVA-VERCORS (1983-1989, IPSN/EDF) (Lewis et al., 1996) et plus récemment, depuis 1996, le programme VERCORS-HT et RT (Ducros et al., 2001) étudient le relâchement des PF faiblement et fortement volatils. Un important programme de recherche PHEBUS-PF (IRSN) (Bourdon et al., 2002; Dubourg et al., 2005) est en cours d'achèvement sur le réacteur PHEBUS pour pallier, en particulier, l'insuffisance de données relatives aux aérosols (nature, quantité et comportement) libérés dans une situation de fusion de cœur.

### **1.2.2. REVUE SUCCINCTE DES EXPERIENCES ANTERIEURES SUR LE COMPORTEMENT ET LE RABATTEMENT D'AEROSOLS**

Les mécanismes de base liés à la physique des aérosols sont décrits par des modèles éprouvés, bâtis à partir de données provenant souvent de domaines hors du nucléaire (Tuncel et Ungor, 1996; Chate et Kamra, 1997; Gustafsson, 1999; Balachandran et al., 2003; Gaunt et al., 2003). Ils ont été validés, lorsque nécessaire, sur des expérimentations. De nombreuses expériences sur le comportement et le rabattement des aérosols par les gouttes d'aspersion sont décrites dans la littérature ; deux groupes apparaissent : premièrement les expériences globales (ou à grande échelle) où les phénomènes physiques sont couplés, et deuxièmement les expériences plus analytiques où les effets sont découplés. Certaines seront succinctement rappelées au cours de la suite de ce premier chapitre.

### **1.2.3. LES EXPERIENCES GLOBALES**

#### **1.2.3.1. Containment System Experiment (CSE)**

CSE (Postma et Coleman, 1970; Hilliard et Postma, 1981) est une expérience à l'échelle réacteur (1/3) destinée à une validation globale et réalisée au Pacific Northwest Laboratory (PNL). Huit essais ont été réalisés dans l'enceinte CSE (1964-1970) qui a un diamètre de 7,62 m pour une hauteur de 20,33 m (Fig. 1-8) soit un volume de 850 m<sup>3</sup> environ. Le découpage en trois compartiments, la présence de puisards, l'injection de vapeur durant l'activation de l'aspersion et l'importance des structures rendent son interprétation difficile, d'autant plus que l'on ne dispose pas de tous les paramètres de l'expérience.

Deux types d'injection de spray ont été testés (Fig. 1-7) : 3 ou 12 buses uniformément espacées couvrant 80 % de l'espace gazeux pour tous les tests exceptés pour un, au cours duquel seulement 50 % de l'espace gazeux est couvert afin d'étudier l'influence de ces différentes configurations sur le rabattement des aérosols.

Un système de production de simulant de PF a été développé par le PNL et l'ORNL (OAK Ridge National Laboratory) pour produire les aérosols et l'iode. Deux sortes de simulant peuvent être générées au cours d'un essai de simulation d'accident :

- De l'UO<sub>2</sub> associé à de l'acier inoxydable ou du zircaloy. Cet oxyde d'uranium simule les matériaux de cœur qui ont une faible pression de vapeur et une faible solubilité dans l'eau.
- Du Carbonate de Césium chauffé qui se volatilise à relativement basse température et forme des aérosols d'hydroxyde de césium ainsi que du CsI. Ces aérosols de césium simulent la classe de PF volatils solides et très solubles dans l'eau.

Dans cette installation, les gaz (air et vapeur d'eau) sont prélevés simultanément dans l'enceinte à l'aide de 14 cannes, et les gouttes d'aspersion sont prélevées à l'aide de goulottes pour être analysées hors de l'enceinte. Les conditions expérimentales des huit essais sont détaillées dans le rapport (Kmetyk, 1994).

Il faut noter que le diamètre des aérosols ( $0,4 \mu\text{m}$ ) est inférieur à celui que l'on attend dans une situation accidentelle. D'un autre coté, les essais, où les aérosols étaient constitués de CsI, aérosol très hygroscopique, avaient un effet probablement amplifié par rapport à une situation conforme au cas réacteur.

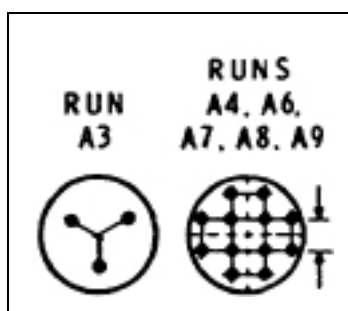


Fig. 1-7 Position des buses dans CSE (Hilliard et al., 1970)

Cette expérience globale, présentée sur la Fig. 1-8, a servi de base de données expérimentales pour valider les modèles de rabattement des aérosols par un système d'aspersion dans les codes 0-D tels que MELCOR (Kmetyk, 1994) et CASPER (Plumecocq, 1997).

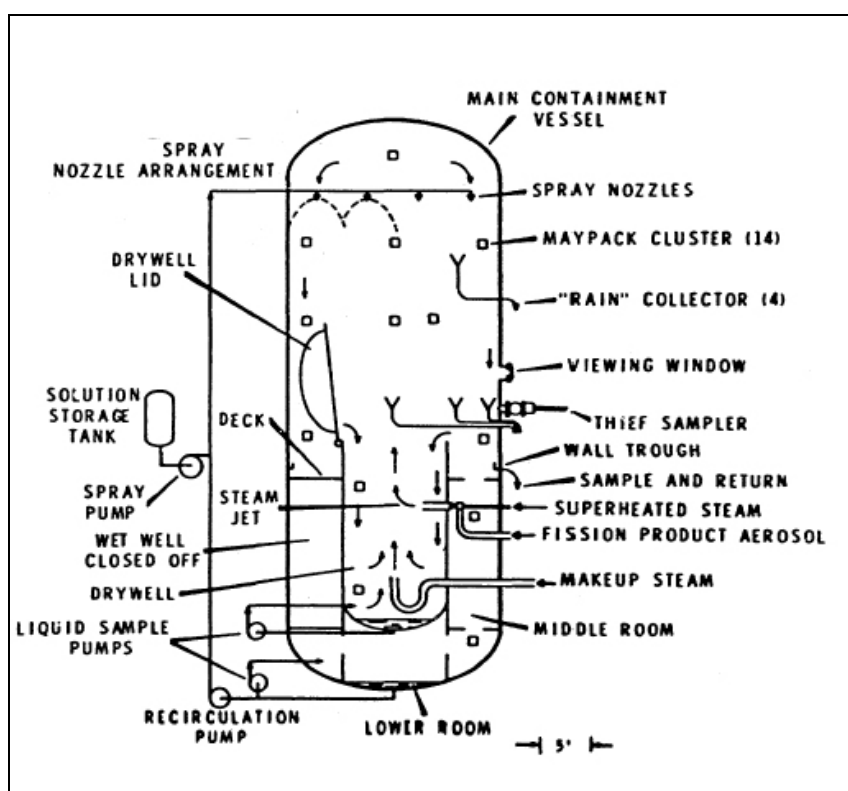


Fig. 1-8 Schéma et instrumentation de l'enceinte CSE (Hilliard et al., 1970)

### 1.2.3.2. Nuclear Safety Pilot Plant (NSPP)

Les expériences NSPP (1970) (Parsly, 1971a; Parsly, 1971b; Adams et al., 1986) ont été réalisées au sein des laboratoires ORNL à plus petite échelle (un diamètre de 3,05 m par 4,57 m de hauteur soit une enceinte d'un volume de  $38,3 \text{ m}^3$ , Fig. 1-9 et Fig. 1-10). Elles ont porté sur le comportement d'aérosols multi composants pour des conditions thermohydrauliques accidentelles puis sur la collecte des aérosols par les gouttes de l'aspersion par effets mécaniques et par diffusiophorèse.

Comme dans CSE, le débit d'aspersion rapporté au volume de la cuve est représentatif du cas réacteur. Deux séries d'expériences ont été réalisées : une première série où les gouttelettes sont injectées à la température du gaz de sorte qu'il n'y ait pas de condensation de la vapeur et la collecte des aérosols s'effectue par effets mécaniques ; une deuxième série d'expériences où les gouttelettes sont injectées à basse température dans une atmosphère chaude et humide, maintenue dans des conditions stationnaires par l'injection d'une source de vapeur, le mécanisme de collecte par diffusiophorèse existant alors.

L'utilisation de particules hygroscopiques (mélange d'oxyde d'uranium ( $UO_2$ ) et carbonate de césium ( $Cs_2CO_3$ ) marqué au  $^{137}Cs$ ) a rendu difficile l'interprétation de certaines de ces expériences (Parsly, 1971a). Pour les essais en condensation, on observe pendant la première minute une décontamination très importante qui est attribuée à la croissance des aérosols hygroscopiques entraînant leur sédimentation. Les mesures concernant la granulométrie des germes secs et l'humidité en fonction du temps ne sont pas assez précises pour permettre une validation.

Le scénario des essais consiste en une montée en température et pression en air puis l'injection de vapeur débute. Ensuite l'injection des aérosols débute et dure le temps nécessaire pour obtenir les conditions de l'essai. Enfin, le déclenchement de l'aspersion est engagé jusqu'à la fin de l'essai déterminé par les conditions prévues puis les condensats sont drainés et l'enceinte purgée.

Dans les essais de collecte par effet de type mécanique, sans condensation, on observe un facteur de décontamination anormalement bas (2,8 et 1,7) compte tenu du diamètre des aérosols injectés ( $0,7 \mu m$  et  $1,7 \mu m$ ). Ceci est attribué à la grande influence des effets mécaniques et à l'évaporation des gouttelettes mais les données précises sur l'humidité manquent.

Deux phénomènes semblent importants : l'évolution des gouttes et la diffusiophorèse – Stefan Flow qui dure aussi longtemps qu'il y a condensation de la vapeur sur les gouttes. Il est observé une réduction du diamètre des aérosols en suspension après l'aspersion. Il est aussi noté que la réduction de la concentration d'aérosols en suspension par cette évolution des gouttes est prévisible pour être prise en compte dans les analyses d'accidents graves.

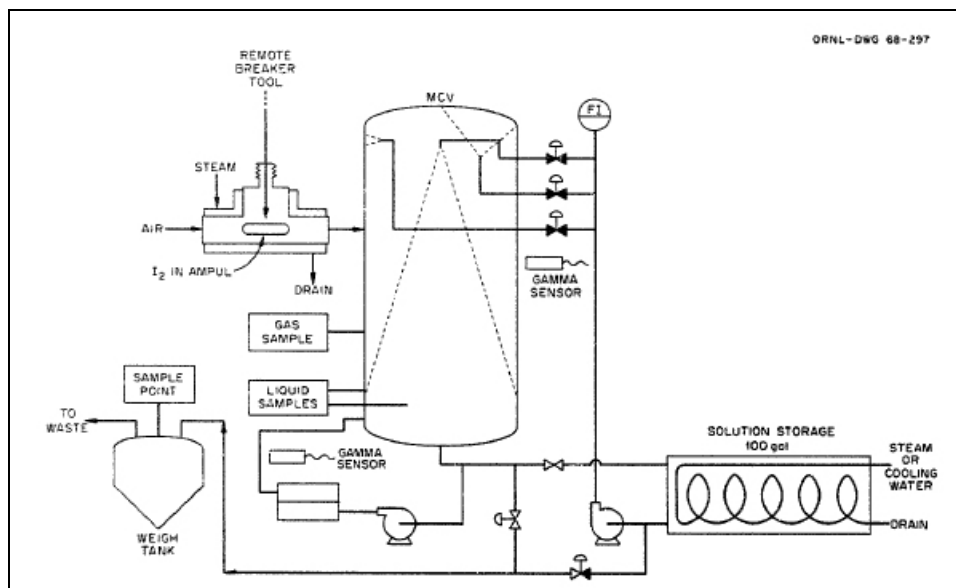


Fig. 1-9 Schéma et instrumentation de NSPP (Parsly, 1971b)

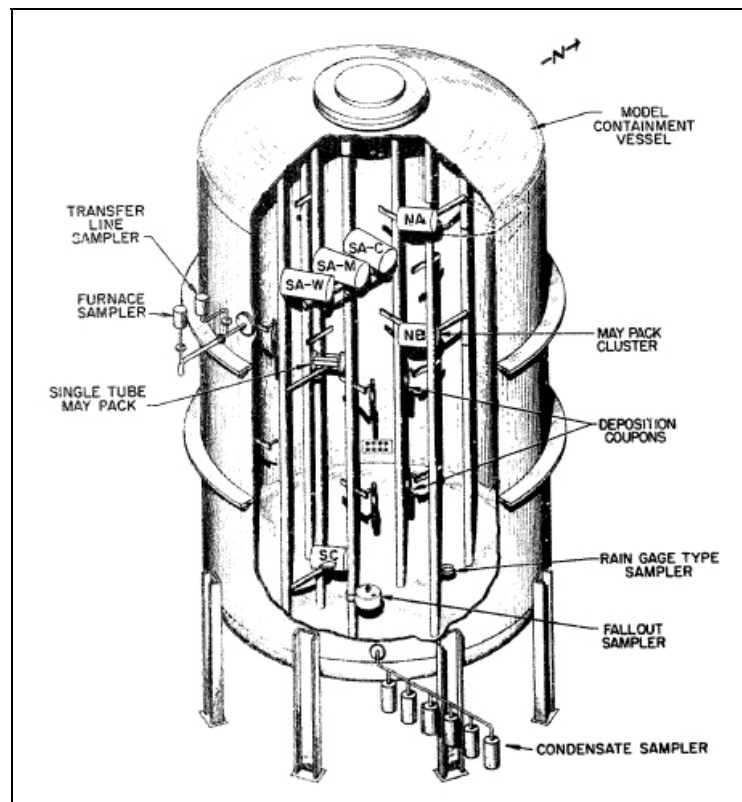


Fig. 1-10 Modèle de l'enceinte de NSPP (Parsly, 1971a)

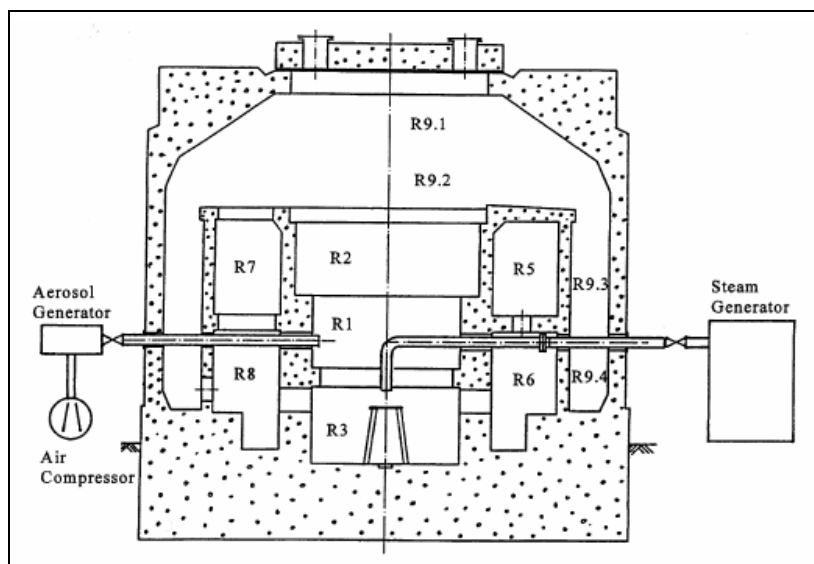
#### 1.2.4. LES EXPERIENCES ANALYTIQUES

De nombreuses expériences analytiques sur le comportement des aérosols de produits de fission dans une enceinte de confinement ont été réalisées depuis l'accident de Three Mile Island (TMI-2) en 1979. Cela a aussi amorcé le développement de codes mécanistes sur les aérosols ainsi que les programmes expérimentaux liés au comportement des aérosols. Au milieu et vers la fin des années 1990, des études expérimentales sur le comportement des aérosols dans une enceinte de confinement ont été conduites par divers organismes internationaux avec des installations à grande échelle comme le LACE (Westinghouse Hanford laboratory – USA) (Bieder et al., 1993), sur l'étude du comportement des aérosols dans des conduits et dans une enceinte de grandes dimensions. Ensuite, les programmes DEMONA/VANAM (Fischer et Kanzleiter, 1999) et VICTORIA (Mäkynen et al., 1997) (Allemagne) ont été réalisés pour étudier le comportement d'aérosols hygroscopiques et non-hygroscopiques dans une enceinte non-homogène et multi-compartimentées. En parallèle, dans des enceintes à petite échelle comme PITEAS (Sabathier et al., 1994; Saldo et al., 1998) (France), AHMED (Mäkynen et al., 1997) au VTT (Technical Research Centre of Finland) des études ont été faites sur l'effet des conditions thermohydrauliques d'accident grave sur le comportement d'aérosols hygroscopiques et inertes ou dans KAEVER (Scheibel et al., 1992) (Allemagne) sur le comportement d'aérosols solubles et insolubles pour des humidités relatives allant jusqu'à la saturation et en présence de brouillard. La collecte des aérosols par un train de gouttes indépendantes est étudiée dans l'enceinte CARAIDAS (Ducret et al., 1996). Quelques-unes de ces expériences sont présentées dans les paragraphes suivants.

##### 1.2.4.1. DEMONstration Nuklearen Aerosolverhaltens (DEMONA)

DEMONA (Fromentin et al., 1988) est un projet germano-suisse (1983-1990) dont l'objectif est de démontrer le rôle important joué par le confinement au regard de la rétention des aérosols. Cette expérience est réalisée au Battelle Model Containment (BMC) dans une enceinte de confinement en béton de forme cylindrique et d'un volume de 640 m<sup>3</sup> équipée de sous compartiments. Elle représente un

modèle réduit à l'échelle  $\frac{1}{4}$  du confinement réel d'un REP de type Biblis A. La Fig. 1-11 montre l'arrangement utilisé pour les séries d'essais DEMONA (Fischer et Kanzleiter, 1999). De plus, en faisant varier les conditions thermodynamiques (i.e. pression, injection de vapeur et humidité relative, température) et certains paramètres caractéristiques des aérosols, différents scénarios d'accidents ont été envisagés. Par l'injection de vapeur, l'humidité relative et par conséquent, les processus de condensation peuvent être modifiés. Les aérosols sont générés par une torche à plasma et injectés directement dans le compartiment central (R1 sur la Fig. 1-11). Ils sont composés par des oxydes d'étain ( $\text{SnO}_2$ ) et de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) et par de l'argent seul ou en multi composants, avec des concentrations initiales allant de 0,2 à  $12 \text{ g.m}^{-3}$ . Les essais sont réalisés sous une pression totale absolue d'environ 3 bar, une humidité relative variant de 30 % à 100 % et une température interne de l'ordre de 120 °C (avec des pointes à 200 °C).



**Fig. 1-11 Enceinte DEMONA (Fromentin et al., 1988)**

L'instrumentation mise en place permet de mesurer la pression atmosphérique, les températures de l'atmosphère, de l'eau du puisard et des murs, l'humidité relative, les taux de transfert de chaleur, ainsi que la concentration de gaz traceur injecté pour le contrôle des fuites. La concentration en aérosols et en gouttelettes ainsi que les distributions en taille des particules ont été déterminées à l'aide des techniques suivantes :

- prélèvements sur des filtres,
- des impacteurs,
- des photomètres,
- un spectromètre optique,
- des mesures de concentration par atténuation du rayonnement bêta.

Les résultats obtenus montrent :

- L'influence de l'humidité relative sur le taux de décroissance de la concentration des aérosols par sédimentation du fait de la condensation de la vapeur d'eau sur les particules (en atmosphère saturée la concentration en aérosols diminue d'un facteur  $10^5$  en l'espace de 10 h au lieu d'au moins 50 h en atmosphère insaturée).
- La faible influence de la nature des aérosols sur le comportement de ceux-ci dans l'enceinte.
- Sédimentation et diffusiophorèse sont des mécanismes dominant du rabattement dans ces conditions.



Les principaux effets observés en atmosphère condensante sont :

- Une augmentation de la sédimentation due à la croissance du diamètre aérodynamique des aérosols.
- La diffusiophorèse est un important mécanisme de dépôt.

Un benchmark a eu lieu sur ces essais afin de comparer les codes existants. Il en ressort que les résultats ne sont pas assez détaillés pour valider individuellement les sous modules des codes. Le manque de couplage entre la modélisation de la physique des aérosols et la thermohydraulique, et la nécessité du choix par l'utilisateur de paramètres, mènent à une dispersion considérable des résultats.

#### 1.2.4.2. VANAM

Les expériences de VANAM (Fischer et Kanzleiter, 1999) ont été conduites au BMC (1990-1992) pour examiner le comportement d'aérosols dans une enceinte multi-compartiments (Fig. 1-12) dans des conditions thermohydrauliques réalistes. Elles diffèrent des expériences de DEMONA par les aspects suivants :

- séparation en sous-compartiments augmentée,
- instrumentation plus complète,
- emplacement de l'injection de vapeur,
- utilisation d'aérosols insolubles ( $\text{SnO}_2$ ) et solubles ( $\text{NaOH}$ ) ainsi qu'un mélange des deux.

Trois séries d'expériences ont été réalisées : expérience (M1) avec les aérosols de  $\text{SnO}_2$ , expérience (M2) avec  $\text{NaOH}$  et expérience (M3) avec  $\text{SnO}_2 + \text{NaOH}$ . Cette dernière a été utilisée comme base pour l'ISP-37 avec divers codes (CONTAIN, MELCOR, FIPLOC, ECART, MACRES, MOSAIC et REMOVAL) (Firnhaber, 1996).

Les différences observées entre les résultats de calcul et les données expérimentales sont principalement dues aux erreurs dans la modélisation de la fuite de l'enceinte, des conditions limites thermiques, des transferts de chaleur à travers les murs ainsi qu'à la mauvaise simulation des conditions thermohydrauliques du mélange gazeux par rapport l'expérience. Bien que des progrès aient été faits sur la simulation du comportement des aérosols dans une enceinte multicompartiments, les concentrations locales en aérosols sont largement dispersées. Cependant, le terme source susceptible d'être relâché dans l'environnement est en général surestimé. Des écarts entre les valeurs de concentrations en aérosols données par l'expérience et les codes sont dus à l'insuffisance de paramètres de l'option hygroscopie de ces derniers. Parmi les plus incertaines variables et modèles analysés, il y avait « le taux de condensation en volume », « l'humidité relative » et « le modèle de solubilité ». Cela démontre la nécessité d'exécuter plusieurs essais sur un sujet important dans un temps limité. En comparaison du benchmark sur DEMONA, l'ISP-37 montre clairement que les simulations multicompartiments sont les meilleures et que les distributions locales de type inhomogènes sont pertinentes.

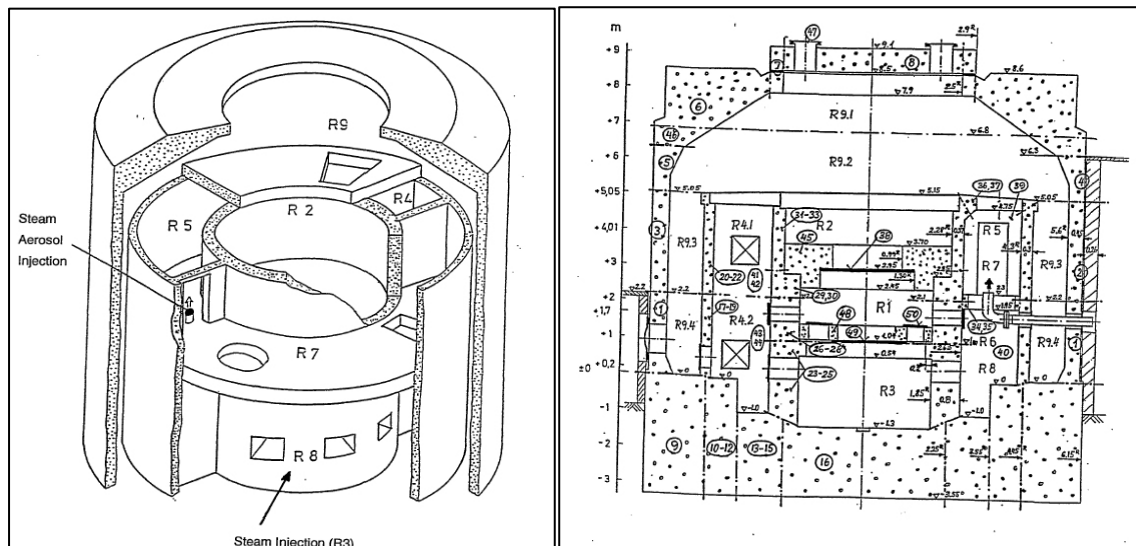


Fig. 1-12 Installation VANAM et Schéma de l'installation (Firnhaber, 1996)

### 1.2.4.3. KernschmelzAerosolVERhalten (KAEVER)

KAEVER (Scheibel et al., 1992; Kljenak, 2001) est un programme expérimental réalisé au Battelle Institut à Frankfort pour étudier l'influence de la distribution granulométrique, de la morphologie, de la composition et de la solubilité des aérosols pour diverses conditions thermohydrauliques simulant un accident grave de REP. L'enceinte KAEVER (Fig. 1-13) d'un volume de 10,6 m<sup>3</sup> a une forme cylindrique horizontale avec des surfaces planes contenant des portes de chaque côté. Des parties de l'enceinte sont isolées et chauffées. Lors d'essais réalisés en condensation, les condensats s'accumulent dans la partie basse du cylindre sans jamais atteindre le niveau des portes. Ces portes pourraient être à l'origine de la variation du taux de fuite observée entre les différents essais.

Dans l'enceinte, les conditions thermohydrauliques de l'atmosphère sont homogènes. L'injection d'aérosols est établie par le chauffage inductif de 1 ou 2 creusets jusqu'à ce que l'évaporation des matériaux se produise et qu'un jet d'azote transporte les aérosols vers l'enceinte. Les aérosols sont soit mono composant ou multi composants, soit insolubles (SnO<sub>2</sub>, Ag) ou solubles (CsOH, CsI, NaCl) avec une gamme de granulométries comprise entre 0,1 µm et 5 µm.

L'ISP-44 (Aerosol Behaviour) avec des essais assez simples (une enceinte avec un compartiment unique et des conditions thermohydrauliques stationnaires) donne une bonne image tant de la capacité des codes et des utilisateurs que de la qualité des essais menés dans l'enceinte expérimentale. Tout le comportement des aérosols et l'essentiel du processus thermohydraulique pour les essais de KAEVER sont modélisés dans les codes utilisés. Ces essais ont fourni des bases de données expérimentales pour l'ISP-44 afin de comparer la réponse de divers codes (NAUA, ASTEC, COCOSYS, CONTAIN, MELCOR et MOD2/REMOVAL) sur le comportement des aérosols dans une enceinte pour des conditions thermohydrauliques représentatives d'accident grave. L'accord des résultats avec les mesures n'est pas aussi bon qu'attendu. En particulier, la modélisation de la condensation sur les aérosols et les conditions thermohydrauliques devraient être améliorées. Les expériences dans KAEVER effectuées pour ISP-44 avaient quelques incertitudes de mesure (l'humidité relative, la dimension des gouttelettes, la masse d'aérosols injectée). Dans l'avenir, la précision des mesures des paramètres importants devrait être accrue.

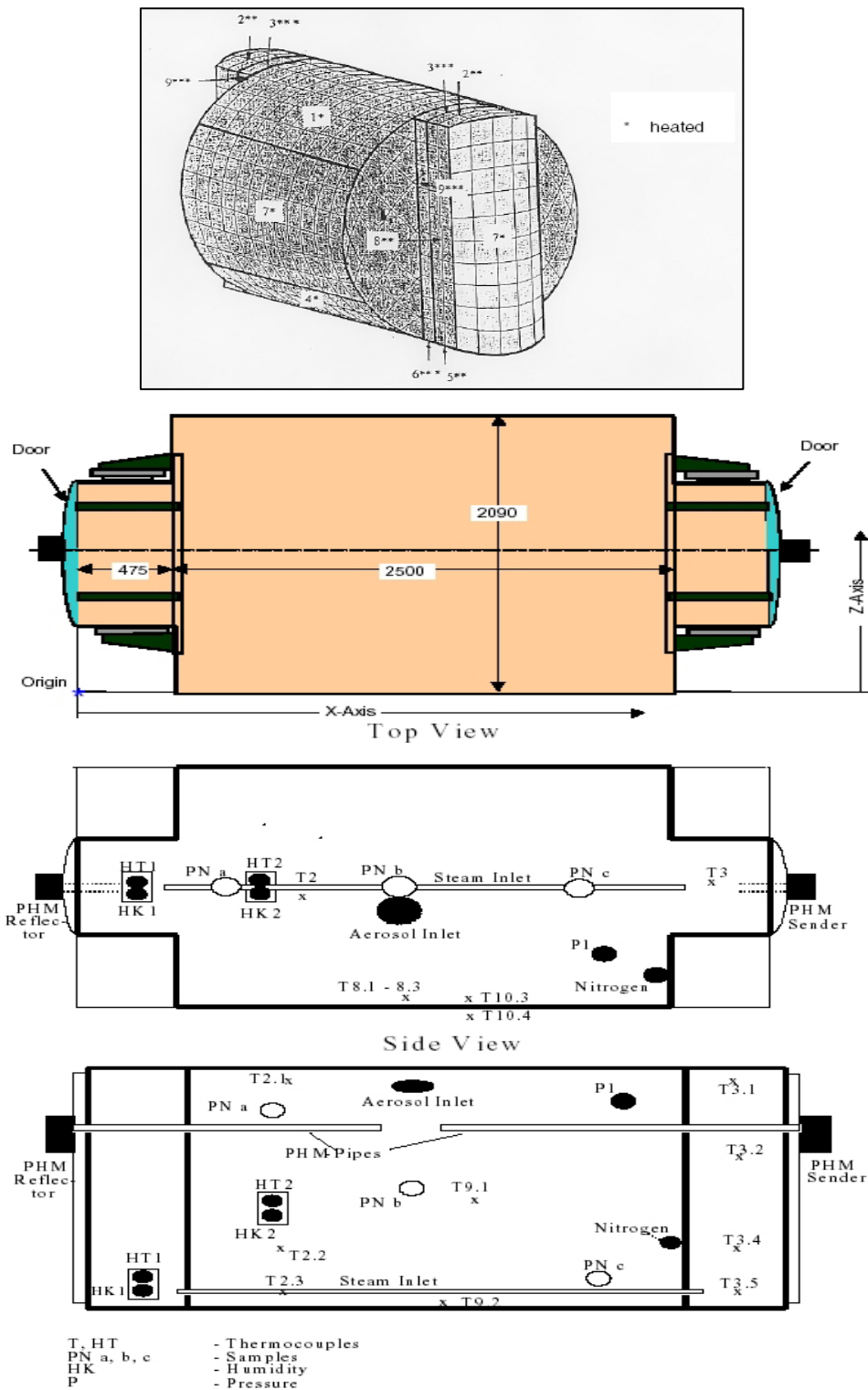


Fig. 1-13 KAEVER (Scheibel et al., 1992)

La diminution de la concentration d'aérosols par sédimentation dans une atmosphère condensante est transcrite dans les modèles des codes utilisés pour les installations nucléaires. Mais la situation de ces installations est cependant caractérisée par un spectre beaucoup plus large de conditions : une complexité de la géométrie, des conditions thermohydrauliques évolutives et une génération d'aérosols variable sont à considérer. De plus, il y a d'autres phénomènes importants, comme par exemple la remise en suspension humide et sèche des particules, le comportement des produits de fission multi composants, le rabatement d'aérosols par l'aspersion, etc. qui doivent être pris en compte.

#### 1.2.4.4. Caractérisation du Rabattement des Aérosols et de l'iode par un Dispositif d'Aspersion (CARAIDAS)

Les travaux de R&D les plus récents ont été focalisés sur le rabattement des aérosols par l'aspersion, afin de quantifier la cinétique et l'efficacité limite de rabattement vis-à-vis des aérosols et de l'iode gazeux pour les réacteurs actuels et d'optimiser la fonction de rabattement de l'aspersion pour les futurs réacteurs. L'expérience CARAIDAS (Ducret et al., 1996; Ducret et al., 1998b) a été développée à l'IRSN au SERAC dans le but de caractériser le rabattement des produits de fission et de l'iode gazeux par un train de gouttes.

Le principe est d'injecter des gouttes d'eau froide indépendantes et monodispersées en faible quantité dans une enceinte contenant un mélange air-vapeur et des aérosols ou de l'iode en concentration homogène. Ces gouttes, dont le diamètre est mesuré à trois altitudes (au point d'injection, à mi-hauteur et au point de collecte), sont ensuite collectées pour une analyse de la quantité d'aérosols ou d'iode piégée. Le banc d'essai CARAIDAS (Fig. 1-14) se compose de six parties :

- Une enceinte expérimentale dans laquelle sont obtenues les conditions thermodynamiques,
- un générateur d'aérosols,
- un générateur de gouttes,
- un système de mesure de la taille des gouttes,
- un générateur de vapeur,
- une instrumentation de prélèvement.

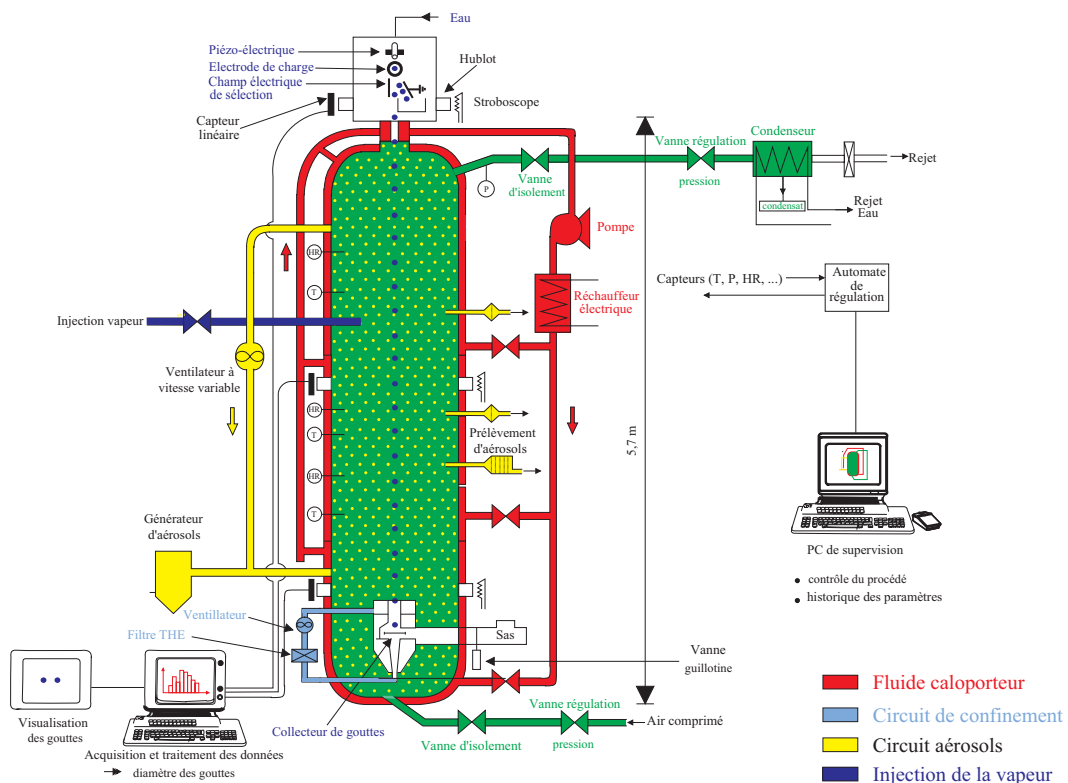


Fig. 1-14 Schéma de CARAIDAS (Ducret et al., 1998b)

L'enceinte expérimentale, de forme cylindrique ( $D_{int} = 0,6 \text{ m}$  ;  $H = 5,7 \text{ m}$ ) dont le volume interne est de  $1,395 \text{ m}^3$ , est constituée d'une double enveloppe permettant la circulation d'un fluide caloporteur. La double enveloppe se décompose en trois parties indépendantes afin d'assurer l'homogénéité de la température sur toute la hauteur de l'enceinte.

Les paramètres caractéristiques des conditions nominales de chacun des essais, avec leurs gammes de variations, sont les suivants :

- Pression absolue : 1 à 7 bar
- Température : 20 à 160 °C
- Taux d'humidité : 0 à 95 %
- Diamètre des aérosols : 0,4 à 4 µm (diamètres aérodynamiques de 0,5 à 8 µm)
- Concentration en aérosols : 1 à 10 mg/m<sup>3</sup>
- Diamètre des gouttes entre 200 et 700 µm

Le pH est considéré comme constant car les gouttes sont tamponnées par de l'acide borique.

Les essais (Vendel et Droulas, 2001) ont consisté à déterminer les efficacités élémentaires de collecte des aérosols par une goutte pour les deux mécanismes principaux de collecte : les effets mécaniques et les effets phorétiques (cf. §1.3). Les conditions expérimentales des essais, visant à déterminer la seule efficacité de collecte liée aux effets mécaniques, sont une température ambiante et proche de la saturation afin d'éviter toute évaporation des gouttes. Les effets mécaniques et phorétiques sont obtenus lors d'essais avec condensation de la vapeur sur les gouttes. L'efficacité de collecte liée aux seuls effets phorétiques est alors calculée par la différence entre l'efficacité des effets mécaniques déduite des premiers essais et l'efficacité totale obtenue lors des essais avec condensation.

Au total 45 essais ont été réalisés, 34 essais ont été retenus pour la détermination des efficacités de collecte par les effets mécaniques et 6 essais pour les essais phorétiques. Cette campagne Aérosols a permis de mesurer des efficacités de collecte des aérosols comprises entre  $7 \cdot 10^{-4}$  et  $3 \cdot 10^{-1}$ . Les résultats obtenus pour des gouttes de diamètre inférieur à 500 µm sont en accord avec ceux du code de calcul ACACIA (Ducret et Vendel, 1998). Ceux obtenus pour des gouttes de diamètre supérieur à 650 µm et pour des aérosols de petit diamètre ( $< 1 \mu\text{m}$ ) sont inférieurs aux prévisions. En outre, cette expérience a permis d'obtenir des résultats expérimentaux pour valider des codes (ACACIA, CPA) développés au sein de l'IRSN.

### 1.2.5. CONCLUSION

Tous ces programmes ont montré l'intérêt des expériences pour obtenir des bases de données afin de valider les codes et permettre des inter-comparaisons des modèles définis dans ceux-ci. Le manque de maîtrise des conditions thermohydrauliques ainsi que de données locales fines des expériences décrites dans la littérature montrent la nécessité de développer des expériences complémentaires. Il apparaît un réel besoin de données expérimentales permettant de valider finement les modèles implantés dans les codes de calcul existant sur le rabattement des aérosols par les gouttes d'eau de l'aspersion au cours d'un accident grave de réacteur. Afin d'établir ces bases de données, la mise au point d'expériences représentatives des conditions d'accident grave (conditions thermohydrauliques et densité de gouttes) est nécessaire afin de déterminer les paramètres influençant les modèles existants.

Jusqu'à présent, la démarche de l'IRSN a été d'étudier successivement chacun des différents effets et paramètres découplés sur le comportement et le rabattement des aérosols dans une enceinte de confinement. Afin de coupler les phénomènes et après les programmes CONDENSATION puis ASPERSION, le programme expérimental AEROSOLS (Porcheron, 2006) est en cours sur l'expérience TOSQAN et s'inscrit dans une démarche qui consiste à complexifier peu à peu l'étude de la collecte des aérosols par une pulvérisation de gouttelettes en se rapprochant des conditions rencontrées dans une enceinte de confinement en situation accidentelle, tout en gardant un fort niveau d'instrumentation. Les résultats obtenus permettront d'avoir des bases de données expérimentales validantes pour les codes.

Afin d'élaborer la grille d'essais et de s'assurer de la pertinence des essais à réaliser, une étude bibliographique est effectuée dans la partie suivante, sur la modélisation du rabattement des aérosols par

les gouttes d'eau d'un spray. Ensuite, une étude de sensibilité à différents paramètres est réalisée à l'aide d'un code de calcul. Ces deux études aideront à définir la grille des essais à réaliser dans TOSQAN.

### **1.3. MODELISATION DU RABATTEMENT DES AEROSOLS PAR DES GOUTTES D'EAU**

L'objectif premier de l'aspersion est d'éviter une montée en pression trop importante dans l'enceinte de confinement. Ce système s'avère également capable de faire chuter rapidement la concentration des aérosols en suspension. Le rabattement d'aérosols par des gouttes d'eau entre dans beaucoup d'applications.

Pour décrire les mécanismes de capture des aérosols par les gouttes, il est nécessaire de caractériser l'écoulement du fluide entourant la gouttelette et ensuite d'examiner les trajectoires des aérosols sur lesquels les forces extérieures du fluide agissent.

Dans le passé, des modèles simples basés sur l'utilisation d'une constante de temps étaient utilisés. Des études plus récentes ont permis une meilleure description physique des phénomènes mis en jeu. Des modèles mathématiques ont été développés pour décrire ces phénomènes. Si ces calculs sont réalisables, il apparaît alors envisageable de prédire les efficacités de rabattement. L'objet de ce paragraphe est d'exposer les paramètres à prendre en compte dans la modélisation de la capture des aérosols par des gouttes d'eau.

#### **1.3.1. ASPERSION : GRANULOMETRIE, VITESSE**

Comme l'efficacité de rabattement des aérosols dépend de la distribution granulométrique des gouttelettes balayant l'atmosphère de l'enceinte, il est nécessaire de considérer le fait que les caractéristiques des gouttes peuvent changer au cours de leur chute. En effet, les gouttelettes du spray peuvent accroître leur diamètre suite à la condensation de la vapeur ou aux interactions de goutte à goutte (coalescence). Au vu de la dimension des particules capturées ( $< 5 \mu\text{m}$ ), la collecte de aérosols par les gouttes ne changera pas la dimension des gouttes d'eau (Grist, 1982). Dans le cas réacteur, la coalescence des gouttes est le phénomène primordiale dans les possibles variations du diamètre des gouttes au cours de leur chute (Plumecocq, 1997).

La saturation de l'atmosphère est un autre point essentiel à prendre en compte. Dans le cas d'une atmosphère saturée, la goutte atteint un état d'équilibre cinétique et thermique, par contre elle tend vers un régime stationnaire d'évaporation dans le cas d'une atmosphère sous saturée.

La vitesse des gouttes est aussi un paramètre important car les gouttes de tailles différentes tombent avec des vitesses différentes ce qui favorise leur coalescence (Powers et Burson, 1993a). Les gouttes ne balayent pas que des aérosols mais aussi d'autres gouttes de diamètre différent. Le plus important est que les petites gouttes, lesquelles semblent plus efficaces pour la capture des aérosols comme nous le verrons au paragraphe suivant, sont balayées par la chute des plus grosses gouttes. Ainsi, la capacité d'un spray à rabattre les aérosols de l'enceinte diminue quand la distance de chute augmente. Powers note aussi que la contamination des gouttes par certains aérosols va modifier leur tension de surface prévoyant ainsi une distorsion plus prononcée de la forme des gouttes.

D'autre part, dans une situation réacteur, l'estimation de la distance moyenne entre gouttelettes est de l'ordre de 1 cm (Plumecocq, 1997). On peut donc négliger les effets multi-gouttes. Ces interactions devraient être prises en compte lors du processus de coalescence. Une estimation simple montre cependant que, même si l'agglomération est loin d'être négligeable, le nombre de gouttelettes situées en moyenne à une distance d'une goutte donnée telle que l'interaction soit effective, est très petit devant l'unité.

### 1.3.2. TAUX DE RABATTEMENT $\lambda$

Le calcul précis du rabatement des produits de fission par l'aspersion nécessite de connaître la répartition granulométrique et spatiale des aérosols et des gouttes d'eau, ainsi que les conditions thermodynamiques qui règnent dans l'enceinte au moment du déclenchement de l'aspersion.

Dans la région où a lieu le rabatement, toutes les gouttes sont supposées avoir un mouvement vertical descendant. La position des gouttes est mesurée depuis un plan origine horizontal situé au niveau des rampes d'aspersion jusqu'à la base de l'enceinte située à la hauteur  $h$ . De plus, les aérosols sont supposés être répartis de façon homogène dans l'enceinte de volume  $V_e$ . L'équation différentielle, donnée par Powers (Powers et Burson, 1993a), décrivant la décroissance de la masse d'aérosols présente dans l'enceinte de confinement au cours du temps est la suivante :

$$\frac{dm_p(t)}{dt} = -\lambda_m m_p(t) + \frac{dS_{inj}}{dt} - \frac{dR_{perte}}{dt} \quad \text{Eq. (1.1)}$$

Avec :

$m_p(t)$  : masse d'aérosols en suspension dans l'enceinte à l'instant  $t$  (kg)

$\lambda_m$  : taux de collecte en masse des aérosols ( $s^{-1}$ )

$\frac{dS_{inj}}{dt}$  : débit massique d'injection d'aérosols dans l'enceinte ( $kg \cdot s^{-1}$ )

$\frac{dR_{perte}}{dt}$  : débit massique de perte des aérosols par d'autres mécanismes (hors collecte) ( $kg \cdot s^{-1}$ )

Les pertes des aérosols dans l'enceinte par la collecte liée à l'aspersion sont bien supérieures à celles dues aux mécanismes naturels (sédimentation, diffusiophorèse et de dépôts sur les parois) compte tenu de la différence des temps caractéristiques. Ainsi, le terme  $\frac{dR_{perte}}{dt}$  de l'équation Eq. (1.1) peut être négligé. La

source  $\left(\frac{dS_{inj}}{dt}\right)$  varie d'un scénario d'accident à l'autre et d'un réacteur à l'autre. Dans le cas où l'on

considère  $\frac{dS_{inj}}{dt}$  comme petit ou nul, c'est-à-dire le cas où la source d'aérosols est supposée être nulle au moment de la mise en fonction du système d'aspersion, il est alors facile de déterminer le facteur de décontamination (FD). Celui-ci correspond au rapport entre la masse initiale  $m_p(0)$  des aérosols en suspension sur la masse  $m_p(t)$  au temps  $t$  en suspension :

$$FD = \frac{m_p(0)}{m_p(t)} = \exp \int_0^t \lambda_m dt \quad \text{Eq. (1.2)}$$

Une relation permet de relier une constante de rabatement des aérosols  $\lambda_s$  aux paramètres du spray et à l'efficacité de collecte d'une goutte en considérant le spray comme un assemblage de gouttes mono dispersées qui balaye tout le volume de gaz. L'équation liée est (Postma et al., 1978) :

$$\frac{dC}{C} = \lambda_s dt = \frac{Q_{asp}}{d_w} \frac{3h}{2V} E dt \quad \text{Eq. (1.3)}$$

avec :  $C$  : concentration en aérosol ( $\text{kg.m}^{-3}$ )       $V$  : volume de la phase gazeuse ( $\text{m}^3$ )  
 $\lambda_s$  : constante de rabatement des aérosols ( $\text{s}^{-1}$ )       $h$  : hauteur de chute (m)  
 $d_w$  : diamètre moyen des gouttes (m)       $E$  : efficacité de collecte par une goutte  
 $Q_{asp}$  : débit d'aspersion ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )

Les quantités  $h$ ,  $Q_{asp}$  et  $V$  sont des paramètres du système de confinement et d'aspersion. Le diamètre des gouttes  $d_w$  est déterminé par le type de buse et les conditions expérimentales. Le paramètre le plus difficile à obtenir est l'efficacité de collecte ( $E$ ) par une goutte. Cette équation Eq. (1.1) peut être extrapolée au cas d'un spray de gouttes poly dispersées rabattant des aérosols faiblement poly dispersés, mais cette extrapolation engendre des erreurs sur les valeurs du taux de rabatement obtenues en fonction des scénarios accidentels.

Dans le cas d'un REP, la population d'aérosols est dispersée et peut être décrite par une fonction de distribution. De même, dans le cas d'un spray réel de REP, la population des gouttes à l'injection est dispersée et peut être bien représentée par une loi de distribution log-normale. En pratique, une normalisation permet d'obtenir une expression théorique (Layly, 2004) de la constante de rabatement en fonction des distributions des gouttes et des aérosols mais le bilan initial de masse est plus compliqué à obtenir pour plusieurs raisons :

- atmosphère inhomogène en température et en humidité,
- variation de la dimension des gouttes à cause de la condensation et de la coalescence,
- différence entre la vitesse à l'injection et la vitesse terminale des gouttes,
- effets phorétiques non constants, ils ne se produisent que pendant la phase de relaxation des gouttes (mise à l'équilibre en vitesse et température, cf. §1.3.4.2).

Au cours du temps, les modifications de la granulométrie des aérosols du terme source mèneront ainsi au changement, en général total ou partiel, de la valeur de taux de collecte  $\lambda_s$  pendant une séquence accidentelle.

### 1.3.3. DEFINITION DE L'EFFICACITE DE COLLECTE E

En général, l'efficacité de collecte d'une classe d'aérosol par une goutte est définie comme la somme des efficacités élémentaires relatives aux différents phénomènes contribuant à la collecte des aérosols. Les mécanismes considérés sont : l'impaction ( $\mathcal{E}_{imp}$ ), l'interception ( $\mathcal{E}_{int}$ ), la diffusion brownienne ( $\mathcal{E}_{db}$ ), la diffusiophorèse ( $\mathcal{E}_{difph}$ ) et la thermophorèse ( $\mathcal{E}_{thermph}$ ).

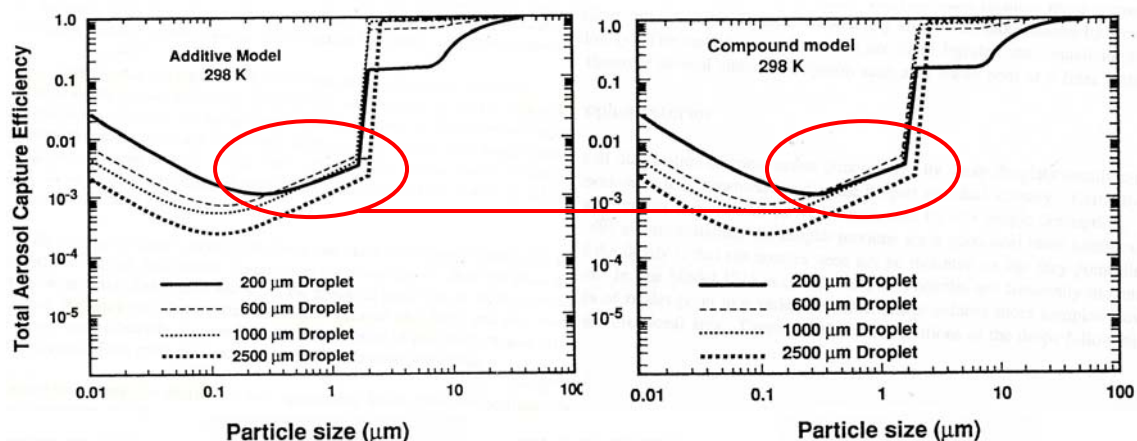
$$E_{total} = \mathcal{E}_{imp} + \mathcal{E}_{int} + \mathcal{E}_{db} + \mathcal{E}_{difph} + \mathcal{E}_{thermph} \quad \text{Eq. (1.4)}$$

Cette équation (Eq. (1.4)) suppose que les mécanismes élémentaires de collecte soient complètement indépendants, ce qui n'est pas totalement vrai. Ceci implique que la combinaison des effets des divers mécanismes de collecte des aérosols doit aussi être prise en compte. Dans la réalité, il apparaît manifestement qu'ils ne sont pas totalement indépendants et qu'en première approximation, pour les aérosols de dimension correspondant au minimum d'efficacité (typiquement de  $0,1 \mu\text{m}$  à  $0,5 \mu\text{m}$ , Fig. 1-15), les mécanismes devraient être décrits de façon couplés, mais ce problème serait excessivement complexe. Sans résoudre réellement le problème, Strauss (Strauss, 1966) utilise une approximation qui revient à supposer que les différents mécanismes agissent en série. Alors dans ce cas, pour comparer la théorie et la pratique, un écoulement potentiel autour de la goutte est utilisé. De là découle une expression alternative (de type combinatoire) de l'efficacité de collecte :

$$E_{total} = 1 - (1 - \mathcal{E}_{imp})(1 - \mathcal{E}_{int})(1 - \mathcal{E}_{db})(1 - \mathcal{E}_{difph})(1 - \mathcal{E}_{thermph}) \quad \text{Eq. (1.5)}$$



Une représentation des deux expressions de l'efficacité totale pour les effets mécaniques (modèle additif et modèle combinatoire) pour divers diamètres de gouttes est présentée sur la figure suivante :



**Fig. 1-15 Efficacité mécanique totale de collecte en fonction de la taille des particules (Powers et Burson, 1993a)**

Comme noté précédemment, l'efficacité totale de collecte par effet mécanique présente un minimum (Fig. 1-15). A ce minimum, les aérosols sont trop « gros » pour être affectés significativement par le mouvement brownien responsable de la collecte par diffusion comme cela sera présenté par la suite. Cependant, il faut mentionner que ce minimum est dépendant de la dimension des gouttes : plus le diamètre des gouttes augmente plus ce minimum se décale vers les petits aérosols. Ceci montre que, bien que les sprays soient des systèmes efficaces pour nettoyer une atmosphère chargée en aérosols, ils peuvent être moins efficaces pour le rabattement d'aérosols dont les diamètres sont proches de ce minimum.

Les prédictions des performances du spray dépendront conjointement du diamètre moyen des aérosols et de l'écart-type de la distribution. De plus, le spray va modifier la distribution en taille des aérosols au cours du temps et, son efficacité de rabattement va décroître. C'est à ce minimum d'efficacité qu'il convient de s'intéresser de près pour le rabattement des aérosols issus des PF. Il constitue la partie du terme source qui est susceptible d'être relâchée en cas de possible brèche dans l'enceinte de confinement. Une grande partie de l'étude sera centrée sur cette gamme d'aérosols de diamètre autour de 1 μm.

#### **1.3.4. MECANISMES ELEMENTAIRES DE COLLECTE**

Cette section a pour objet de décrire les mécanismes élémentaires de collecte des aérosols par une gouttelette isolée et fournir le bilan des connaissances actuelles sur ces mécanismes. Dans un premier temps, ils sont considérés individuellement. On discute ensuite du problème posé par la superposition des effets mécaniques et phorétiques.

L'approche actuelle est limitée au cas mono-gouttelette. L'application à un système d'aspersion de type réacteur est alors réalisée simplement par la prise en compte de la distribution en taille et de la densité des gouttelettes. On analyse donc brièvement l'effet des interactions entre gouttelettes. Le rabattement des aérosols par l'aspersion dépend des caractéristiques des gouttes, en particulier de leur masse, de leur vitesse et de leur température au cours de leur chute. Les évolutions dépendent des phénomènes d'évaporation et de condensation, ainsi que de la coalescence des gouttes. Les modèles de collecte des aérosols sont basés sur des corrélations semi-empiriques ou théorique afin de calculer l'efficacité élémentaire de collecte par chacun de ces différents phénomènes.

Les mécanismes de collecte des aérosols par les gouttes comprennent principalement :

- **la capture inertielle et l'interception** : les particules suffisamment grosses qui ne suivent pas les lignes de courant ou celles qui ne peuvent pas en être suffisamment déviées pour répondre à l'accélération de la goutte et éviter la rencontre avec les gouttes ; **la diffusion brownienne**, mécanisme surtout efficace pour les petites particules au voisinage des gouttes ;
- **la capture phorétique**, liée au mouvement des particules dans la couche limite de la goutte induit par un champ de température ou un gradient de vapeur avec incondensables, surtout efficace en partie haute de l'enceinte avant que les gouttes atteignent l'équilibre thermique avec l'atmosphère.

#### 1.3.4.1. Les effets mécaniques

La collecte des aérosols par effets mécaniques est liée aux champs de vitesse de l'écoulement autour de la goutte et aux vitesses de glissement des aérosols par rapport au fluide (impaction, interception et diffusion).

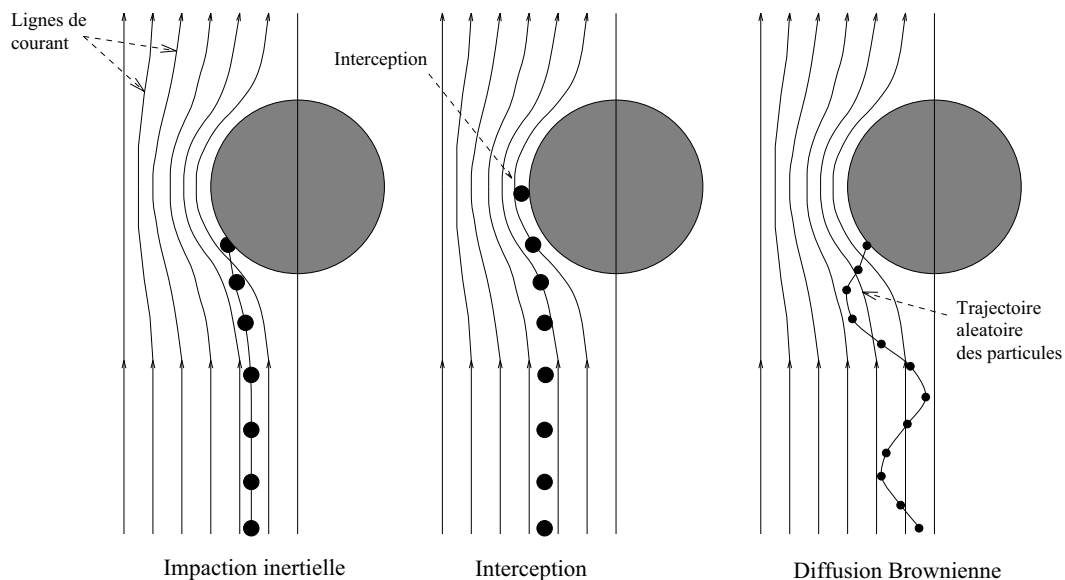


Fig. 1-16 Effets mécaniques

- **Dépôt par diffusion (diffusion brownienne)**

A l'exception de la convection, la diffusion est le mécanisme de dépôt prépondérant pour les particules de diamètre inférieur à  $0,1 \mu\text{m}$  (Plumecocq, 1997). Il est responsable de la collecte de ces particules dans le cas où la distance de transport est petite soit au voisinage immédiat de la surface de la goutte. En effet, le coefficient de diffusion  $D_p$  varie comme l'inverse du rayon de la particule. Le brassage provoqué par l'écoulement autour de la gouttelette maintient une concentration de particules homogène sauf dans une fine couche autour de la goutte.

Généralement, l'efficacité de collecte par diffusion est liée au nombre de **Reynolds** qui caractérise la structure de l'écoulement autour de la goutte et au nombre de **Peclet** qui compare la vitesse caractéristique de convection des particules à la vitesse de diffusion moléculaire. Le nombre de **Schmidt** est égal au rapport entre de la viscosité cinématique et la diffusivité massique. Il est utilisé pour caractériser les écoulements de fluides dans lesquels interviennent simultanément viscosité et diffusion. Plus le nombre de Peclet est grand, plus l'efficacité de collecte par diffusion est petite (Rimberg et Peng, 1977) :

$$Pe = Re_w Sc_p = \left( \frac{d_w v_w \rho_g}{\eta_g} \right) \left( \frac{\eta_g}{\rho_g D_p} \right) = \frac{d_w v_w}{D_p} \quad \text{Eq. (1.6)}$$

où  $D_p$  est le coefficient de diffusion de Stokes-Einstein des aérosols corrigé du facteur de glissement de Cunningham qui dépend du libre parcours moyen des molécules  $\lambda$  :

$$D_p = \frac{k_b T_g C_u}{3\pi \eta_g d_p} \quad \text{Eq. (1.7)}$$

$k_b$  est la constante de Boltzmann ( $1,3806503 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ),  $\mu_g$  la viscosité dynamique du gaz,  $d_p$  le diamètre de l'aérosol,  $T_g$  la température du gaz et  $C_u$  est le facteur de Cunningham :

$$C_u = 1 + Kn \left( 1,257 + 0,4 \exp\left(-\frac{1,1}{Kn}\right) \right) \quad \text{Eq. (1.8)}$$

$Kn$  étant le nombre de Knudsen :  $Kn = \frac{2\lambda}{d_p}$

$\lambda$  est le libre parcours moyen des molécules du gaz, qui est bien représenté par :  $\lambda = \frac{3 \mu_g}{\rho_g \bar{v}_g}$

$\rho_g$  est la densité du gaz et  $\bar{v}_g$  la vitesse moléculaire moyenne donnée par :  $\bar{v}_g = \sqrt{\frac{8 R T_g}{\pi M_g}}$

où  $R$  est la constante des gaz parfaits ( $8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) et  $M_g$  la masse molaire du gaz.

Parsly (Parsly, 1971a) montre qu'en faisant l'hypothèse que la couche limite de concentration est identique à la couche limite hydrodynamique, on obtient une formulation du nombre de Sherwood identique à la formulation de Ranz et Marshall (Ranz et Wong, 1952) dans laquelle le coefficient de diffusion moléculaire est remplacé par le coefficient de diffusion des aérosols ( $D_p$ ). Le coefficient de transfert de masse s'écrit :

$$k'_p = \frac{D_p}{d_w} \left( 2 + 0,6 Re_w^{\frac{1}{2}} Sc^{\frac{1}{3}} \right) \quad \text{Eq. (1.9)}$$

Lorsque l'on est loin de l'écoulement sphérique ( $Re_w$  élevé), ceci conduit à la formulation :

$$\mathcal{E}_{db} = 2,4 Re_w^{\frac{1}{6}} Pe^{-\frac{2}{3}} \quad \text{Eq. (1.10)}$$

La validité de cette équation (Eq. (1.10)) reste ouverte à discussion, mais elle a été établie pour les gaz et la vapeur dans laquelle le nombre de Schmidt  $Sc$  est proche de 1. Pour des particules, à cause de leur faible coefficient de diffusion, le nombre de Schmidt est plus important.

Hilliard (Hilliard et al., 1970) met lui en évidence une équation en fonction du coefficient de transfert de masse des aérosols  $k'_p$  et de la vitesse de sédimentation de la goutte  $v_w$  :

$$\mathcal{E}_{db} = \frac{4 k_p'}{v_w} = \frac{4 Sh_g}{Pe} \quad \text{Eq. (1.11)}$$

L'importance de la diffusion par rapport à la convection augmente lorsque le nombre de Peclet décroît. Dans le cas d'écoulement sphérique avec des petites gouttes soit à nombre de Reynolds faible, le nombre de Sherwood tend vers 2 d'où :

$$\mathcal{E}_{db} = \frac{8}{Pe} \quad \text{Eq. (1.12)}$$

Pour des nombres de Reynolds supérieurs à 500 et dans le cas d'un régime intermédiaire Postma (Postma, 1975) propose une formulation plus générale sous une forme dans laquelle l'épaisseur de la couche limite massique de concentration est corrigée afin de prendre en compte la dimension de la particule :

$$\mathcal{E}_{db} = 3,02 Re_w^{\frac{1}{6}} Pe^{-\frac{2}{3}} + 1,14 I Re_w^{\frac{1}{3}} Pe^{-\frac{1}{3}} + 0,57 I^2 Re_w^{\frac{1}{2}} \quad \text{Eq. (1.13)}$$

où I est le rapport du diamètre de l'aérosol sur le diamètre de la gouttelette :  $I = \frac{d_p}{d_w}$

Cette formulation est obtenue en utilisant la théorie du film dans laquelle l'épaisseur de la couche de concentration est réduite du diamètre de la particule et en faisant un développement au deuxième ordre en I. Si le diamètre de la gouttelette est grand devant celui des aérosols, nous avons ( $I \rightarrow 0$ ) :

$$\mathcal{E}_{db} = 3,02 Re_w^{\frac{1}{3}} Pe^{-\frac{2}{3}} \quad \text{conditions : } Re_w > 500 \quad \text{Eq. (1.14)}$$

On retrouve une formulation proche de celle de Parsly (Parsly, 1971a), ce qui tend à prouver que la couche limite de concentration est bien identique à la couche limite hydrodynamique, la différence entre le coefficient 3,02 et celui de l'expression (Eq. (1.10)) représentant l'écart par rapport à cette hypothèse.

Les premières corrélations énoncées par Prupacher et Klett (1978) suggéraient de modéliser les phénomènes par les équations suivantes, dépendantes du nombre de Reynolds, du nombre de Peclet et du nombre de Schmidt pour la gamme de Reynolds suivante :

$$\text{Pour } Re_w < 1 : \quad \mathcal{E}_{db} = 4 \frac{2}{Pe} \left( 1 + 0,5 Re_w^{\frac{1}{3}} Sc_p^{\frac{1}{3}} \right) \quad \text{Eq. (1.15)}$$

$$\text{Pour } Re_w > 1 : \quad \mathcal{E}_{db} = 4 \frac{2}{Pe} \left( 1 + 0,3 Re_w^{\frac{1}{2}} Sc_p^{\frac{1}{3}} \right) \quad \text{Eq. (1.16)}$$

D'autres expressions de l'efficacité de collecte par diffusion sont présentées dans un bilan établi par Ring et Peng (Rimberg et Peng, 1977) et modifiées par Powers (Powers et Burson, 1993a) en fonction du régime d'écoulement :

Régime d'écoulement potentiel (fort  $Re_p$ ,  $Re_w > 500$ ) :

$$\mathcal{E}_{db} = 2,18Pe^{-\frac{1}{2}} \text{ conditions : } \frac{d_p}{d_w} \leq 0,3Pe^{-\frac{1}{2}} \quad \text{Eq. (1.17)}$$

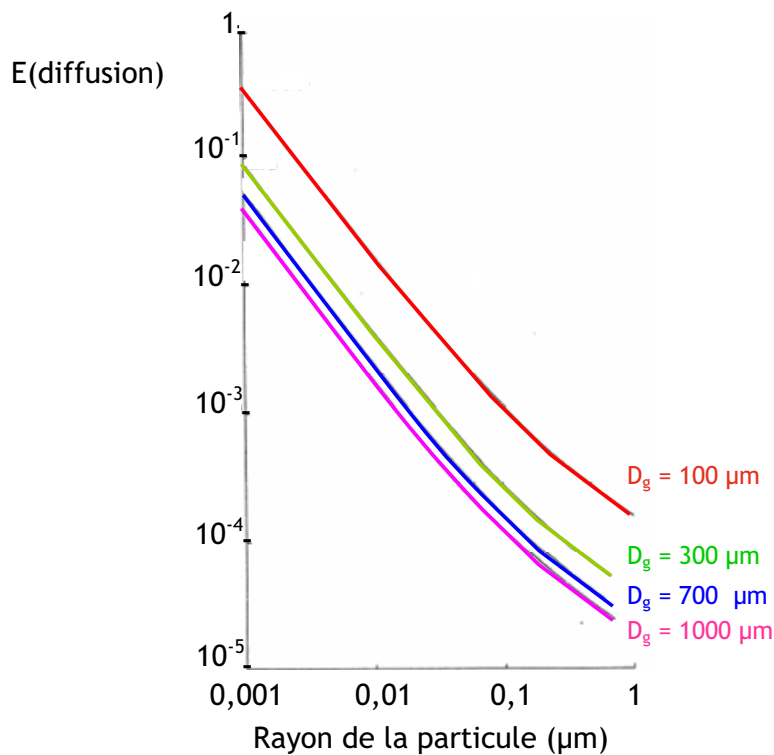
Régime d'écoulement transitoire (faible  $Re_p$ ) :

$$\mathcal{E}_{db} = (2Ped_w)^{-\frac{1}{2}} \quad \text{Eq. (1.18)}$$

$$\mathcal{E}_{db} = \frac{4}{Pe} \left( 2 + 0,557Re_w^{\frac{1}{2}} Sc^{\frac{3}{8}} \right) \text{ conditions : } Re_p < 1 \quad \text{Eq. (1.19)}$$

Régime d'écoulement visqueux :

$$\mathcal{E}_{db} = 3,18Pe^{-\frac{2}{3}} \text{ conditions : } Re_p \rightarrow 0 \quad \text{Eq. (1.20)}$$



**Fig. 1-17 Variations de l'efficacité de collecte par diffusion Brownienne en fonction du diamètre des gouttes  $D_g$  (Grist, 1982)**

En conclusion, il est important de noter que ces phénomènes de dépôt par diffusion sont prépondérants pour de très petits aérosols de diamètre inférieur à  $0,1 \mu m$ . De plus, l'efficacité de collecte diminue lorsque le diamètre des gouttes augmente (voir Fig. 1-17).

- **Impaction**

La chute des gouttes induit des variations de l'écoulement du fluide gazeux qui modifient les lignes de courant aux abords des gouttes en développant autour d'elles un contre-écoulement du fluide qui assure la conservation du volume.

Les aérosols, alors présents dans le volume balayé par la gouttelette, ne seront pas tous capturés par celle-ci du fait de la présence de ce contre-écoulement qui tend à les en éloigner. Certains d'entre-eux suivront les lignes de courant du gaz, tandis que d'autres, trop massifs, avec une trop grande inertie pour répondre à une soudaine accélération due à l'écoulement gazeux à proximité de la gouttelette, quitteront les lignes de courant pour venir impacter la surface de la gouttelette.

Le contact entre la gouttelette et l'aérosol est supposé suffisant pour contraindre la capture de celui-ci du fait des forces de Van der Waals et de la tension de surface de la goutte (Powers et Burson, 1993a).

L'efficacité de collecte par impaction inertielle est exprimée en fonction du nombre adimensionnel de Stokes caractéristique des mouvements curvilignes :

$$Stk = \frac{d_p^2 \rho_p v_w C_u}{9\eta_g d_w} \quad \text{Eq. (1.21)}$$

où  $\rho_p$  est la masse volumique de l'aérosol. Pour les aérosols dont la dimension est représentative de la population produite dans un réacteur lors d'un accident grave (de l'ordre du micron) et pour les conditions dans l'enceinte correspondant à cette situation, le facteur de Cunningham  $C_u$  (Eq. (1.8)) est pris égal à l'unité. Ainsi le nombre de Stokes se met sous la forme simple :

$$Stk = \frac{d_p^2 \rho_p v_w}{9\eta_g d_w} = \frac{2 Re_w \rho_p d_p^2}{9 \rho_g d_w^2} = \frac{L_s}{\frac{d_w}{2}} \quad \text{Eq. (1.22)}$$

Ecrit sous cette forme, le nombre de Stokes devient le rapport entre la distance d'arrêt de la particule  $L_s$  (Murata et al., 1997) et le rayon de la gouttelette ( $d_w/2$ ). La distance d'arrêt est définie comme étant la distance maximale que parcourt dans un gaz au repos, une particule ayant une vitesse initiale  $v_w$  et comme unique force extérieure la force de viscosité.

Le calcul théorique de l'efficacité de collecte repose sur la description de l'écoulement et sur le calcul des trajectoires des aérosols dans cet écoulement. Etant donné que les équations décrivant le mouvement des particules autour d'une gouttelette ne peuvent être résolues analytiquement, des méthodes numériques doivent être employées.

Des corrélations ont été établies dans les cas extrêmes où l'écoulement est supposé visqueux ( $Re_w \rightarrow 0$ ) ou potentiel ( $Re_w \rightarrow \infty$ ). Une formulation communément utilisée pour décrire l'efficacité de collecte par impaction inertielle est celle de Langmuir (Langmuir, 1948), établie à partir de simulations numériques, et qui présente l'avantage de pouvoir couvrir l'ensemble des trois régimes d'écoulement (Rimberg et Peng, 1977; Powers et Burson, 1993a; Brockmann, 1998) :

### Régime visqueux

$$\mathcal{E}_{imp,vis} = 0 \quad \text{pour } Stk \leq 1,124 \quad \text{Eq. (1.23)}$$

$$\mathcal{E}_{imp,vis} = \left[ 1 + \frac{0,75 \ln(2Stk)}{Stk - 1,214} \right]^{-2} \quad \text{pour } Stk \geq 1,124 \quad \text{Eq. (1.24)}$$

### Régime potentiel

$$\mathcal{E}_{imp,pot} = 0 \quad \text{pour } Stk \leq \frac{1}{12} \quad \text{Eq. (1.25)}$$

$$\mathcal{E}_{imp,pot} = 8,57 \left[ \frac{Stk}{Stk + 0,5} \right]^2 (Stk - 0,083336) \quad \text{pour } \frac{1}{12} < Stk \leq 0,2 \quad \text{Eq. (1.26)}$$

$$\mathcal{E}_{imp,pot} = \left[ \frac{Stk}{Stk + 0,5} \right]^2 \quad \text{pour } Stk \geq 0,2 \quad \text{Eq. (1.27)}$$

Ensuite, avec une formulation d'interpolation (Langmuir, 1948) valable quel que soit le régime, on peut écrire l'équation suivante :

$$\mathcal{E}_{imp} = \frac{\mathcal{E}_{imp,vis} + Re_w \frac{\mathcal{E}_{imp,pot}}{60}}{1 + \frac{Re_w}{60}} \quad \text{Eq. (1.28)}$$

Pour la distribution en taille de gouttelettes qui nous intéresse, le nombre de Reynolds, basé sur le diamètre de la gouttelette est à la fois trop grand pour considérer le cas d'un fluide visqueux et pas suffisamment élevé pour pouvoir affirmer que nous avons un écoulement potentiel. Pemberton (Pemberton, 1960) suggère que, compte tenu de la différence entre la dimension des aérosols (diamètre inférieur à 10  $\mu\text{m}$ ) et la dimension des gouttelettes d'aspersion (supérieure à 100  $\mu\text{m}$ ), l'écoulement autour de la gouttelette peut quand même être bien évalué par un écoulement potentiel. D'autres auteurs ((Washington et al., 1991) et (Langmuir, 1948)) jugent nécessaire d'interpoler entre les deux régimes pour prédire réellement le facteur de décontamination comme cela est présenté à l'aide de l'équation Eq. (1.28).

Ces équations montrent un nombre de Stokes critique pour lequel aucune impaction n'a lieu. La valeur du nombre de Stokes critique, égale à  $Stk_{crit} = \frac{1}{12}$  pour un écoulement potentiel, a été établie théoriquement (Fuchs, 1964). Ainsi dans un écoulement potentiel, l'efficacité de collecte par impaction pour des aérosols dont le diamètre est inférieur au diamètre critique  $d_{crit}$  Eq. (1.29) est nulle :

$$d_{crit} = \left[ \frac{3\eta_g d_w}{4\rho_p C_u v_w} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Eq. (1.29)}$$

Dans les conditions d'un écoulement potentiel, Parsly (Parsly, 1971a) note que pour des gouttes d'un diamètre de 1000  $\mu\text{m}$  dans une enceinte de confinement à 130 °C, l'efficacité de collecte sera nulle pour des particules de diamètre inférieur à 3  $\mu\text{m}$ .

L'efficacité de collecte donnée par le modèle en régime visqueux (Eq. (1.24)) sera inférieure à celle du modèle en régime potentiel (Eq. (1.27)). Postma (Postma, 1975) suggère que le régime potentiel soit utilisé pour les conditions d'un APRP (Accident Perte de Réfrigérant Primaire) mais Parsly (Parsly, 1971a) note que les gouttes, dans la gamme dont la dimension est représentative des sprays produits par les buses d'aspersion, suivront probablement un comportement intermédiaire entre les régimes potentiel et visqueux. Dans ce cas, la modélisation dans les codes de calcul sera opérée suivant deux modèles : un premier basé sur l'hypothèse que l'écoulement réel est assimilable à un régime potentiel (Eq. (1.27)), un second (Eq. (1.28)) construit comme combinaison intermédiaire entre les deux régimes. Une comparaison est mise en évidence sur la Fig. 1-18 :

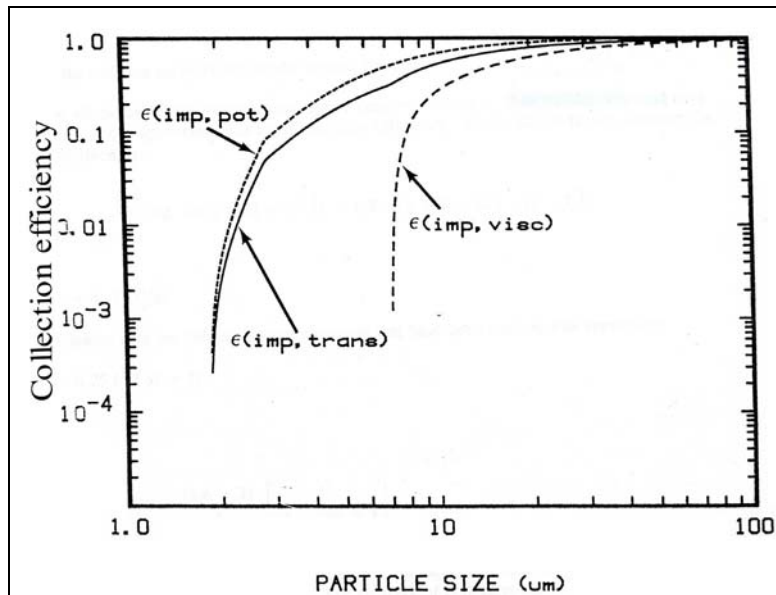


Fig. 1-18 Efficacité de collecte par impaction en fonction de la taille des aérosols (Powers et Burson, 1993a)

En conclusion, il faut retenir que les aérosols ayant une inertie significative sont collectés par impaction. Le paramètre caractéristique de ce mécanisme est le nombre de **Stokes**, et l'efficacité de collecte est une fonction croissante de ce nombre. L'efficacité de ce mécanisme augmente avec la vitesse des gouttes et la masse des aérosols.

- **Interception**

Dans le paragraphe précédent, l'analyse ne prenait pas en compte le diamètre fini des aérosols. En tenant compte de la dimension réelle des aérosols, sans prendre en compte leur masse, le mécanisme d'interception devient modélisable. Dans ce cas, les aérosols dont le diamètre est compris entre 0,1  $\mu\text{m}$  et 1  $\mu\text{m}$  vont suivre les lignes de courant du gaz autour de la gouttelette. Pour les aérosols qui ont leur centre de gravité situé sur une ligne de courant proche de la gouttelette, à une distance inférieure au rayon de l'aérosol  $\left(\frac{d_p}{2}\right)$ , ils vont toucher la goutte et être interceptés. Le mécanisme d'interception sera d'autant plus important que les particules seront non sphériques.

### Régime potentiel

Ranz et Wong (Ranz et Wong, 1952) ont montré que dans ce régime le minimum d'efficacité de collecte pour un aérosol sphérique suivant le ligne de courant d'une goutte s'exprime par :

$$\mathcal{E}_{int.pot} = \left(1 + \frac{d_p}{d_w}\right)^2 - \left(1 + \frac{d_p}{d_w}\right)^{-1} \quad \text{Eq. (1.30)}$$

si  $d_p \ll d_w$  cette équation Eq. (1.30) peut être réduite (Hilliard et al., 1970) à :

$$\mathcal{E}_{int.pot} \cong 3 \frac{d_p}{d_w} \quad \text{Eq. (1.31)}$$



## Régime visqueux

L'efficacité d'interception est donnée par Fuchs (Fuchs, 1964) :

$$\mathcal{E}_{int,vis} = (1+I)^2 \left( 1 - \frac{1,5}{1+I} + \frac{1}{2(1+I)^3} \right) \quad \text{Eq. (1.32)}$$

avec  $I = \gamma \frac{d_p}{d_w}$  et  $\gamma$ , compris entre 1 et 4, le facteur de forme de collision pour les aérosols et typiquement pris peu différent de 1 (Powers et Burson, 1993a).

Après simplification suivant le degré d'approximation du terme I faite sur l'expression issue de l'équation Eq. (1.32), on peut écrire :

$$\mathcal{E}_{int,vis} = \left( 1 + \frac{d_p}{d_w} \right)^2 - \frac{3}{2} \left( 1 + \frac{d_p}{d_w} \right) + \frac{1}{2 \left( 1 + \frac{d_p}{d_w} \right)} \quad \text{Eq. (1.33)}$$

Lee et Gieseke (Lee et Gieseke, 1980) ont passé en revue diverses approximations pour l'expression de l'efficacité d'interception sous un écoulement de Stokes en faisant le développement en série des termes  $(1+I)^n$  de l'équation Eq. (1.32), ce qui conduit à l'expression suivante :

$$\mathcal{E}_{int,vis} = \frac{3}{2} \left( \frac{d_p}{d_w} \right)^2 \left( 1 + \frac{d_p}{d_w} \right)^{-\frac{1}{3}} \quad \text{Eq. (1.34)}$$

De plus si  $d_p \ll d_w$ , l'équation Eq. (1.34) peut être réduite (Layly, 2004) à :

$$\mathcal{E}_{int,vis} \cong \frac{3}{2} \left( \frac{d_p}{d_w} \right)^2 \quad \text{Eq. (1.35)}$$

De même que pour l'impaction inertielle, Langmuir et Blodgett (Langmuir, 1948) proposent une formulation intermédiaire de l'efficacité de collecte par interception qui couvre toute la gamme des nombres de Reynolds :

$$\mathcal{E}_{int} = \frac{\mathcal{E}_{int,vis} + \frac{Re_w \mathcal{E}_{int,pot}}{60}}{1 + \frac{Re_w}{60}} \quad \text{Eq. (1.36)}$$

Sur la figure suivante (Fig. 1-19), sont reportées les évolutions de l'efficacité de collecte par interception en fonction du diamètre des aérosols, pour différents diamètres de gouttes, obtenue avec les formulations précédentes (Eq. (1.31), Eq. (1.35) et (Eq. (1.36)).

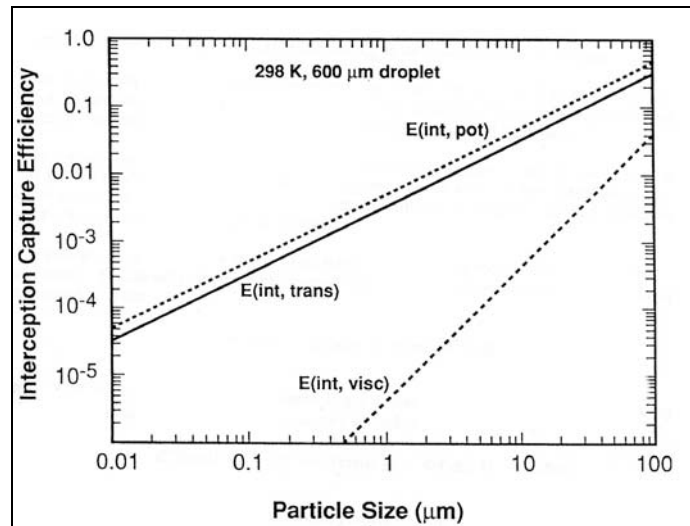


Fig. 1-19  $\mathcal{E}_{int,pot}$  et  $\mathcal{E}_{int,vis}$  en fonction de la taille des aérosols (Powers et Burson, 1993a)

En conclusion, il est important de noter que la collecte par interception, qui est de nature géométrique, se produit lorsque la trajectoire d'un aérosol passe à une distance de la goutte inférieure au rayon de la particule. Le paramètre caractéristique de ce mécanisme est le nombre d'interception  $\frac{d_p}{d_w}$  ou rapport du diamètre des aérosols au diamètre des gouttes.

#### 1.3.4.2. Les effets phorétiques

Comme présenté au paragraphe 1.3.1, la vapeur d'eau présente dans l'enceinte va pouvoir se condenser sur les gouttes d'aspersion en fonction du régime.

Pendant la relaxation des gouttelettes, ce phénomène qui réduit la pression partielle de vapeur d'eau et la température de l'enceinte, va modifier la collecte des aérosols (Gauchet et al., 1997).

Des forces d'origine phorétique vont naître dans la couche limite des gouttes. Les effets phorétiques sont exprimés en termes de vitesse de dérive des aérosols dans la couche limite de la goutte en faisant l'hypothèse de goutte sphérique.

Ces effets dépendent des gradients thermiques et de la concentration en vapeur due à l'évaporation ou la condensation et servent de supports pour les forces de thermophorèse et diffusiophorèse.

On peut montrer, selon la définition de l'efficacité de collecte (Plumecocq, 1997), que celle-ci peut être exprimée pour les effets phorétiques comme :  $E_{ph} = 4 \frac{V_{ph}}{U_\infty}$  Eq. (1.37)

Avec  $V_{ph}$  la vitesse de dépôt par les effets phorétiques et  $U_\infty$  la vitesse des gouttes.

- **Thermophorèse**

La thermophorèse est un mécanisme de collecte qui résulte d'un gradient thermique au sein du gaz autour de la goutte. Les chocs des molécules de gaz sur l'aérosol étant asymétriques, une force, dite de thermophorèse, s'exerce sur la particule laquelle est repoussée par les gradients thermiques. Pour

traduire ceci, le nombre adimensionnel de **Knudsen** défini comme le rapport du libre parcours moyen des molécules de gaz  $\lambda$  au rayon de la particule  $r_p$  est introduit :

$$Kn = \frac{2\lambda}{d_p} \quad \text{Eq. (1.38)}$$

Les trajectoires des particules sont influencées par le mouvement brownien des molécules de gaz dont l'intensité croît avec la température du gaz. Lorsqu'il existe un gradient thermique dans un gaz, les particules subissent une force dans la direction des températures décroissantes les entraînant d'une zone chaude vers la zone froide. Les gouttes étant plus froides que le gaz, il existe donc un gradient thermique dans la couche de gaz entourant la goutte. Le mouvement des particules est le résultat de cette force appelée **force de thermophorèse** ou **force thermophorétique**.

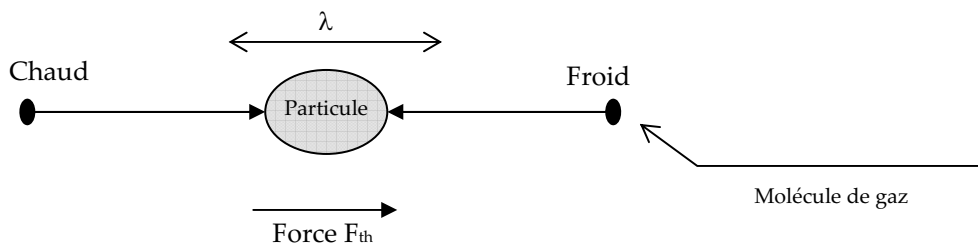


Fig. 1-20 Schéma explicatif de la thermophorèse

### Force de thermophorèse

La force de thermophorèse appliquée à la particule est obtenue par intégration sur sa surface de la quantité de mouvement totale qui est transférée par les molécules de gaz. La difficulté du problème est de calculer les fonctions de distribution des vitesses des molécules incidentes et réfléchies. On distingue en fonction du nombre de Knudsen, le régime moléculaire libre ( $Kn \gg 1$ ), le régime intermédiaire ( $Kn \approx 1$ ) et le régime continu ( $Kn \ll 1$ ).

Dans tous les cas, cette force est de la forme :  $\vec{F}_{thermph} = C_{thermph} \vec{\nabla} T$  Eq. (1.39)

Avec  $C_{thermph}$  dépendant du diamètre des particules et des conditions thermodynamiques.

Les aspects théoriques de la thermophorèse sont développés notamment dans la thèse de Montassier (Montassier, 1990). D'une façon générale, les vitesses de phorèse sont étudiées pour les cas d'une paroi plane ou cylindrique (dépôt dans les tubes), c'est-à-dire pour lesquels on peut obtenir une expression théorique du gradient de température ou de concentration. Dans le cas d'une gouttelette chutant à vitesse élevée, on obtient ces gradients par l'approximation du film, c'est-à-dire que l'on définit un rayon extérieur de la couche limite supposée sphérique tel que les nombres de Nusselt et Sherwood soient égaux à leur valeur expérimentale (Abramzon et Sirignano, 1987).

Brock (Brock, 1962) propose l'expression suivante de la force de thermophorèse qui couvre tout le domaine des nombres de Knudsen :

$$\vec{F}_{th} = -12C_s \pi \frac{\eta_g}{\rho_g T_g} r_p \left[ \frac{1}{1 + 3C_m Kn} \frac{\frac{k_g}{k_p} + C_i Kn}{1 + 2 \frac{k_g}{k_p} + 2C_i Kn} \right] \vec{\nabla} T \quad \text{Eq. (1.40)}$$

où  $C_s$  est le coefficient de glissement tangentiel, compris entre 1 et 1,2,  $C_m$  le coefficient de glissement mécanique, compris entre 1 et 1,27,  $C_t$  le coefficient de glissement thermique de l'ordre de 2,2,  $\mu_g$  la viscosité dynamique du gaz de densité  $\rho_g$ ,  $k_p$  et  $k_g$  respectivement le coefficient de conductivité thermique de la particule et de l'atmosphère gazeuse. D'autres coefficients  $C_{thermoph}$  (ou notés  $K$ ) pour différentes conditions sont récapitulés dans la thèse de Montassier (Montassier, 1990). Ceci permet de déduire la vitesse de thermophorèse.

### Vitesse de thermophorèse

L'expression souvent utilisée pour déterminer l'efficacité est celle de Talbot (Talbot et al., 1980). Il utilise comme expression de la force de viscosité, celle de Stokes-Cunningham pour  $d_p > \lambda$  :

$$\vec{F}_v = \frac{6\pi\mu_g r_p}{C_u} \vec{v}_{th} \quad \text{Eq. (1.41)}$$

La vitesse de thermophorèse s'exprime alors de façon suivante :

$$\vec{v}_{th} = -K_{TA} \frac{\mu_g}{\rho_g T_g} \vec{\nabla} T \quad \text{Eq. (1.42)}$$

avec :

$$\begin{aligned} K_{TA} &= 2C_s \frac{Cu \left[ \frac{k_g}{k_p} + C_t Kn \right]}{[1 + 3C_m Kn] \left[ 1 + 2 \frac{k_g}{k_p} + 2C_t Kn \right]} \\ &= 2C_s \frac{\left[ 1 + Kn \left( 1,257 + 0,4e^{-\frac{1,1}{Kn}} \right) \right] \left[ \frac{k_g}{k_p} + C_t Kn \right]}{[1 + 3C_m Kn] \left[ 1 + 2 \frac{k_g}{k_p} + 2C_t Kn \right]} \end{aligned} \quad \text{Eq. (1.43)}$$

et  $C_s = 1,17$ ,  $C_m = 1,14$ ,  $C_t = 2,18$  quelle que soit la valeur du nombre de Knudsen.

Pour les conditions de l'enceinte que l'on peut rencontrer lors d'un accident grave, le libre parcours moyen des molécules du gaz est de l'ordre de  $0,015 \mu\text{m}$  (Plumecocq, 1997). Par conséquent, la différence entre la formulation de Talbot et celle de Brock n'est sensible que pour de très petits aérosols.

Enfin, afin de déterminer les corrélations de l'efficacité de collecte par thermophorèse, on définit un facteur de ventilation  $f_h$  (Pruppacher et Klett, 1978) et un choix du coefficient de thermophorèse  $K$  fonctions des conditions.

$$\text{Pour } \text{Re}_w^{\frac{1}{2}} \text{Pr}_g^{\frac{1}{3}} < 1,4 \quad f_h = 2 \left( 1 + 0,108 \left( \text{Re}_w^{\frac{1}{2}} \text{Pr}_g^{\frac{1}{3}} \right)^2 \right) \quad \text{Eq. (1.44)}$$

$$\text{Pour } \text{Re}_w^{\frac{1}{2}} \text{Pr}_g^{\frac{1}{3}} \geq 1,4 \quad f_h = 2 \left( 0,78 + 0,308 \text{Re}_w^{\frac{1}{2}} \text{Pr}_g^{\frac{1}{3}} \right) \quad \text{Eq. (1.45)}$$

Remarque : le facteur 2 de ces corrélations est dû au fait que l'on considère le diamètre de la goutte et non son rayon pour calculer l'efficacité de collecte par thermophorèse.

L'expression retenue pour le coefficient de thermophorèse  $K_{TA}$  qui est un facteur proportionnel au rapport de la conductivité thermique de l'atmosphère à la conductivité thermique des particules, et au rapport du libre parcours moyen moléculaire sur le rayon des particules, est donnée par Tablot (Eq. (1.43)).

L'équation Eq. (1.37) permet de déduire l'expression de l'efficacité de collecte par thermophorèse (Ducret et al., 1998a) :

$$\mathcal{E}_{thermph} = 4K_{TA} \times f_h(T_{gaz} - T_d) \frac{\eta_g}{\rho_g T_g v_d d_w} \quad \text{Eq. (1.46)}$$

### Taux de dépôt par thermophorèse (Plumecocq, 1997)

Le taux moyen de dépôt en nombre des aérosols d'une classe de taille donnée, est obtenu à partir de sommations sur toute la distribution de taille des gouttelettes et sur la hauteur de chute, soit :

$$\lambda_{th} = \frac{1}{h} \iint f(z, r_w) 4\pi r_w^2 v_{th}(z, r_p) dr_w dz \quad \text{Eq. (1.47)}$$

avec  $f$  la fonction de distribution des gouttes.

Il est intéressant de comparer sur le Tableau 1-1 les vitesses de sédimentation et les vitesses de thermophorèse en fonction du diamètre des aérosols (Renoux et Boulaud, 2000) :

**Tableau 1-1 Comparaison entre les vitesses de thermophorèse et de sédimentation**

$\nabla T_\infty = 1 \text{ K.cm}^{-1}$ et $T = 293 \text{ K}$ ; $k_p = 10 \text{ k}_g$		
Diamètre des aérosols ( $\mu\text{m}$ )	Vitesse limite de sédimentation (cm/s)	Vitesse de thermophorèse (cm/s)
0,01	$6,7 \cdot 10^{-6}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$
0,10	$8,6 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$
1,00	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$
10,0	$3,1 \cdot 10^{-1}$	$7,8 \cdot 10^{-5}$

On constate qu'au-dessus d'une valeur comprise entre 0,1 et 1  $\mu\text{m}$  (typiquement prise égale à 0,5  $\mu\text{m}$ ) la sédimentation l'emporte sur la thermophorèse.

La vitesse de dérive due à la thermophorèse est donnée par les relations proposées par Brock et Talbot. On peut dire que dans le cas d'une goutte d'eau à 20 °C plongée dans un mélange air/vapeur d'eau saturé à 140 °C, la force de thermophorèse est dirigée vers la goutte : le gradient de température crée la force qui conduit les particules vers la goutte froide. La thermophorèse pourra ainsi faire migrer des aérosols à travers les lignes de courant. Il s'avère que la thermophorèse permet un dépôt plus important que la diffusion en ce qui concerne les aérosols de diamètre supérieur à 0,2  $\mu\text{m}$  dans les premiers centimètres de chute de la goutte mais ce terme est négligeable par rapport aux autres effets mécaniques.

- **Diffusiophorèse**

Les gradients de concentration des espèces chimiques dans un mélange isotherme de gaz mais de constitutions inhomogènes sont connus pour induire le mouvement des aérosols. Dans notre cas d'étude, ces effets sont maximum dans la couche limite de la goutte.

Du fait de cette différence entre les masses moléculaires et les gradients de concentration, l'impulsion transférée à l'aérosol par les molécules du gaz n'est pas homogène sur toute la surface de l'aérosol.

Le mouvement des particules se nomme généralement mécanisme de **diffusiophorèse** et la force produisant le mouvement est connue en tant que **force de diffusiophorèse**. Comme pour la thermophorèse, la vitesse de dérive est stable lorsque la force de diffusiophorèse est compensée par les forces de friction. Le mécanisme de diffusiophorèse se produit dans différents régimes d'écoulement, qui peuvent être caractérisés par le nombre de Knudsen défini précédemment (Eq. (1.38)).

Lorsque de la vapeur d'eau se condense sur une surface froide en présence de gaz incondensables, le débit de condensation est limité par la diffusion de la vapeur à travers ces gaz. Il en résulte une accumulation des gaz incondensables près de la surface froide. En régime stationnaire de condensation, un écoulement s'établit de la surface vers l'atmosphère (écoulement de Stefan) constitués par les gaz incondensables de façon à compenser le débit de diffusion.

Dans le cas d'un mélange air/vapeur d'eau, la force de diffusiophorèse agit en sens inverse de l'écoulement de Stefan. La vitesse de dépôt est la somme algébrique de la vitesse de Stefan et de la vitesse de diffusiophorèse. Dans le cas qui nous concerne, elle est donc inférieure à la vitesse de Stefan. Le terme de « collecte par diffusiophorèse » apparaît donc comme négatif dans la mesure où ce mécanisme tend à éloigner les aérosols de la gouttelette.

### Vitesse de dépôt par diffusiophorèse

De la même manière que pour la thermophorèse, la force de diffusiophorèse est obtenue à partir de l'évaluation de la fonction de distribution des vitesses par un développement au premier ordre. Ce développement est réalisé dans un référentiel mobile à la vitesse de l'écoulement de Stefan.

Waldmann et Schmitt (Waldmann et Schmitt, 1966) proposent l'expression suivante de la force de diffusiophorèse :

$$\vec{F}_{diffph} = C_{diffph} \vec{\nabla} X_i \quad \text{Eq. (1.48)}$$

Avec  $C_{diffph}$  un coefficient de diffusiophorèse.

La vitesse de dépôt par diffusiophorèse  $V_d$  dépend de la dimension des particules comparativement au libre parcours moyen des molécules environnantes.

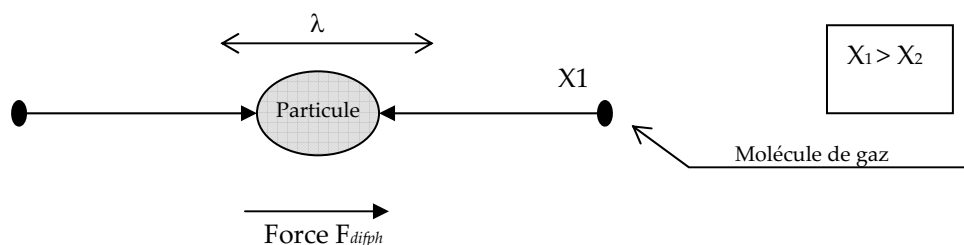


Fig. 1-21 Schéma pour la diffusiophorèse

La théorie de diffusiophorèse a été développée principalement pour  $Kn \ll 1$  et  $Kn \gg 1$ . Pour le cas de particules sphériques plus petites que le libre parcours moyen des molécules de gaz ( $Kn \gg 1$ ), Waldmann (Waldmann et Schmitt, 1966) au moyen de la méthode de transfert des moments et, Bakanov et Derjaguin (Bakanov et Derjaguin, 1960), à l'aide de la thermodynamique des processus irréversibles,

obtiennent dans le cas d'un mélange binaire isotherme avec la vitesse moléculaire moyenne nulle, la vitesse de dérive  $V'_d$  :

$$V'_d = -\frac{\sqrt{M_1} - \sqrt{M_2}}{X_1 \sqrt{M_1} + X_2 \sqrt{M_2}} D_{12} \nabla X_2 \quad \text{Eq. (1.49)}$$

avec  $M$  la masse moléculaire,  $X$  la fraction molaire,  $D_{12}$  le coefficient de diffusion mutuelle pour les deux composants,  $\nabla X_2$  le gradient de la fraction molaire à une grande distance de la particule. Les indices inférieurs 1 et 2 sont relatifs aux composants du gaz (air, vapeur).

Par conséquent,  $V'_d$  dépend du gradient de concentration, de la masse moléculaire des gaz, du coefficient de diffusion mutuelle pour les deux composants dans la couche limite, mais est indépendante du rayon des particules. Selon Eq. (1.49) les aérosols se déplacent dans la direction du flux diffusif du composant le plus « lourd ». Dans un mélange de gaz avec des masses moléculaires équivalentes, il n'y aura aucun mouvement de petite particule en suspension lié à la diffusiophorèse. Les résultats expérimentaux (Waldmann et Schmitt, 1966) sur la diffusiophorèse dans un mélange binaire de gaz confirment l'équation Eq. (1.49), c'est-à-dire que la vitesse de diffusion est indépendante du nombre de Knudsen donc du diamètre des particules.

Dans l'atmosphère quand les molécules de vapeur diffusent dans de l'air au repos, la vitesse de dépôt a une expression simple dans le cas d'une surface plane et d'un écoulement sphérique. La masse moyenne et les vitesses moléculaires sont alors différentes de zéro et un écoulement de Stefan (écoulement hydrodynamique compensateur) existe. En effet, on peut alors relier la vitesse de l'écoulement moléculaire moyen au gradient  $\partial X_s / \partial r$  (écoulement de Stefan). Par définition de l'écoulement de Stefan opposé à l'écoulement diffusif d'air, le débit total d'incondensables est nul, et la vitesse de Stefan s'écrit :

$$V_s = -\left(\frac{D_{12}}{p_2}\right) \nabla p_1 \quad \text{Eq. (1.50)}$$

Avec  $D_{12}$  le coefficient de diffusion de la vapeur dans le gaz, et  $p_1$  et  $p_2$  respectivement la pression partielle de vapeur et du gaz porteur.

Dans le cas de petits aérosols, si dans un mélange binaire de gaz leur vitesse issue du procédé de diffusion (voir Eq. (1.49)) est additionnée à la vitesse de Stefan, l'équation régissant la vitesse de dépôt par diffusiophorèse est (Waldmann et Schmitt, 1966) :

$$\begin{aligned} V_d = V_s + V'_d &= \frac{\sqrt{M_v}}{X_i \sqrt{M_i} + X_v \sqrt{M_v}} V_s \\ &= -\frac{\sqrt{M_v}}{X_i \sqrt{M_i} + X_v \sqrt{M_v}} \left(\frac{D_{iv}}{p_2}\right) \nabla p_1 \\ &= -\frac{X_v \sqrt{M_v}}{X_i \sqrt{M_i} + X_v \sqrt{M_v}} \frac{\dot{m}_v}{A_v \rho_i} \end{aligned} \quad \text{Eq. (1.51)}$$

où  $M_v$  est la masse moléculaire de l'eau,  $M_i$  la masse moléculaire du gaz porteur,  $p_1$  la pression partielle de gaz,  $X_v$  la fraction molaire de vapeur,  $X_i$  la fraction molaire de gaz, et  $\nabla p_1$  le gradient de pression partielle de vapeur. Le débit massique de condensation sur une gouttelette de surface  $A_v$  est donné par :

$$\dot{m}_v = A_v \frac{\rho_v}{X_v} \frac{D_{iv}}{1 - X_v} \frac{\partial X_v}{\partial r} \quad \text{Eq. (1.52)}$$

De plus, l'effet de diffusion des particules a un effet réducteur sur la vitesse de l'écoulement de Stefan pouvant aller jusqu'à environ 20 %.

Schmitt et Waldmann (Waldmann et Schmitt, 1966) ont précisé que cette équation (Eq. (1.51)) peut également être appliquée aux aérosols dont la dimension est supérieure au libre parcours moyen avec une exactitude d'environ 9 %. En substituant dans l'équation Eq. (1.50) pour la diffusion de vapeur dans l'air dans les conditions standards de température et pression ( $D = 0,24 \text{ cm}^2/\text{s}$  ;  $p_2 = 990 \text{ mbar}$ ), l'équation suivante est obtenue, avec  $\nabla p_i$  exprimé en Pa/m :

$$V_s = -1,9 \cdot 10^{10} \nabla p_i \quad \text{Eq. (1.53)}$$

Par conséquent, la recherche théorique précédente accentue généralement l'indépendance de  $V'_d$  et de  $V_d$  sur la dimension des particules et leur nature. Un rapport linéaire entre la vitesse du dépôt et le gradient de pression d'eau-vapeur devrait exister, si la température était constante. Des vérifications expérimentales ont eu lieu dans les travaux de Derjaguin, Yalamov, Yu and Storozhilova (1966), Goldsmith and May (1966), Derjaguin and Yalamov (1972) et plus récemment Kousaka and Endo (1993) cités dans une synthèse réalisée par Prodi (Prodi et al., 2002).

Après intégration de la vitesse de dépôt par diffusiophorèse donnée par l'équation Eq. (1.51), sur toute la surface de la goutte et en se rapportant au volume balayé, l'efficacité de collecte par diffusiophorèse est exprimée par (Ducret et al., 1998a) :

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{diff} &= 4 \cdot f_h \frac{\sqrt{M_v}}{X_i \sqrt{M_i} + X_v \sqrt{M_v}} \frac{D_{iv}}{v_v \cdot d_w} \ln \left( \frac{P - P_{sat}}{P_{air}} \right) \\ &\approx 4 \cdot f_h \frac{\sqrt{18}}{\frac{P_{air}}{P} \sqrt{28,9} + \frac{P - P_{air}}{P} \sqrt{18}} \frac{D_{iv}}{v_v \cdot d_w} \ln \left( \frac{P - P_{sat}}{P_{air}} \right) \end{aligned} \quad \text{Eq. (1.54)}$$

avec des facteurs de ventilation  $f_h$  (Pruppacher et Klett, 1978) fonction des conditions :

$$\text{Pour } \text{Re}_w^{\frac{1}{2}} \text{Sc}_{g,v}^{\frac{1}{3}} < 1,4 \quad f_h = 2 \left( 1 + 0,108 \left( \text{Re}_w^{\frac{1}{2}} \text{Sc}_{g,v}^{\frac{1}{3}} \right)^2 \right) \quad \text{Eq. (1.55)}$$

$$\text{Pour } \text{Re}_w^{\frac{1}{2}} \text{Sc}_{g,v}^{\frac{1}{3}} \geq 1,4 \quad f_h = 2 \left( 0,78 + 0,308 \text{Re}_w^{\frac{1}{2}} \text{Sc}_{g,v}^{\frac{1}{3}} \right) \quad \text{Eq. (1.56)}$$

Remarque : le facteur 2 de ces corrélations est dû fait que l'on considère le diamètre de la goutte et non son rayon pour calculer l'efficacité de collecte par thermophorèse.

### Taux de dépôt par diffusiophorèse

Grist (Grist, 1982) définit la constante de taux de collecte par diffusiophorèse comme :

$$\lambda'_{diff} = \frac{\sqrt{M_v}}{X_v \sqrt{M_v} + X_i \sqrt{M_i}} \frac{\dot{m}_v}{V \cdot C_v} \quad \text{Eq. (1.57)}$$

Avec  $C_v$  la concentration de vapeur,  $V$  le volume de l'enceinte.



Enfin, le taux moyen de dépôt en nombre par diffusiophorèse est donné par (Plumecocq, 1997) :

$$\lambda_{dif} = \frac{X_v \sqrt{M_v}}{X_v \sqrt{M_v} + X_i \sqrt{M_i}} \frac{\iint \dot{m}_v(r_w) f(r_w) dr_w dx}{\rho_v h} \quad (\text{s}^{-1}) \quad \text{Eq. (1.58)}$$

Le mécanisme de collecte par diffusiophorèse est important dans les conditions thermodynamiques des accidents graves du fait des forts flux de condensation. De manière analogue à la thermophorèse, la diffusiophorèse en tant que telle, est une force résultant des gradients de concentration des différentes espèces gazeuses. Les différences de masse molaire des espèces en présence et leurs gradients de concentration conduisent à un flux de quantité de mouvement agissant sur la particule. Dans le cas particulier de la condensation de la vapeur d'eau dans un mélange air-vapeur, la force de diffusiophorèse s'oppose à la collecte des aérosols. Par contre, la condensation induit l'établissement d'un écoulement dirigé vers la goutte (écoulement de Stefan) entraînant la collecte des aérosols. Ainsi, la vitesse de dérive des aérosols est la somme algébrique de la vitesse de Stefan et de la vitesse de diffusiophorèse proprement dite. Ceci montre que la contribution de la diffusiophorèse est indépendante du diamètre des gouttes.

#### 1.3.4.3. Autres mécanismes

Il existe par ailleurs d'autres moyens de collecte d'aérosols par des gouttes d'eau.

Si un rayon lumineux arrive sur des aérosols, ceux-ci peuvent, suivant les cas, être attirés ou repoussés. Toute apparition d'une distribution non uniforme de la température sur la surface d'un corps en suspension dans un gaz à une pression donnée donne naissance à une force. Lorsque ces inégalités de température qui se développent à l'intérieur de la particule sont dues à la lumière, on dit qu'il y a photophorèse (Fuchs, 1964). Suivant les cas, on peut donc observer une photophorèse positive ou une photophorèse négative, quelles que soient les dimensions des particules. Par contre, si une particule est fortement absorbante, l'échauffement est toujours plus important sur la face exposée à la lumière : la photophorèse est alors toujours positive (c'est-à-dire dans le même sens que la lumière). La force maximale observée serait de l'ordre de  $4 \cdot 10^{-10}$  dyn ( $4 \cdot 10^{-15}$  N) pour une particule de  $r_p = 0,4 \mu\text{m}$ . Le phénomène peut être perturbé par la présence d'un champ électrique ou magnétique. Cependant, il n'y a pas d'application pratique de ce phénomène dans notre domaine d'étude.

Un autre mécanisme est l'électrophorèse. C'est ce procédé qui est utilisé dans les filtres servant à dépoussiérer les fumées. Il s'agit d'un champ électrostatique qui ionise les particules. Se trouvant polarisées, elles seront attirées vers les particules de signe opposé. Mais ces mécanismes sont inexistantes dans notre cas d'étude.

Enfin, dernière possibilité de collecte de particules, il s'agit de la capture par hydrodynamique arrière observée par Pruppacher et Klett (Pruppacher et Klett, 1978). Il s'avère que pour des gouttes possédant un nombre de Reynolds compris entre 30 et 400, il se forme un tourbillon derrière la goutte. Il arrive que certaines particules se fassent alors capturer par le sillage de la goutte et se retrouvent projetées sur celle-ci mais ceci reste marginal. Peu d'études sur ces phénomènes existent dans la littérature.

#### 1.3.4.4. Synthèse en situation réacteur

Dans ce qui précède, et en conclusion de ce paragraphe sur la modélisation du rabattement des aérosols par des gouttes d'eau, il faut noter qu'il est souvent d'usage d'ajouter la collecte due aux effets phorétiques à celle due aux effets mécaniques. Dans les formules Eq. (1.47) et Eq. (1.58) la vitesse de dépôt est considérée calculée dans l'approximation potentielle.

Cette formulation revient à additionner les efficacités de collecte. L'additivité consiste donc à supposer d'une part que l'efficacité de collecte mécanique n'est pas affectée par la condensation de la vapeur, d'autre part que dans le cas d'un écoulement non sphérique, on peut appliquer le même facteur  $\alpha$  en ne prenant en compte la diffusiophorèse que dans le cas d'un écoulement de Stefan.

En ce qui concerne les effets inertiels, la première hypothèse est raisonnable car la vitesse de dépôt par diffusiophorèse (entre 2 et  $4 \cdot 10^{-3}$  m.s<sup>-1</sup>) est très inférieure à la vitesse de l'écoulement de l'ordre du mètre par seconde.

En revanche, la vitesse de dépôt par diffusion dans le cas sphérique, estimée à partir des corrélations du paragraphe §1.3.4.1, est de l'ordre de  $10^{-7}$  m.s<sup>-1</sup>.

Il est alors plus pertinent de traiter les effets diffusifs et les effets phorétiques de façon couplée. De plus, l'addition algébrique des efficacités de collecte peut conduire à une valeur négative en cas d'évaporation des gouttelettes. Dans ce cas, l'efficacité de collecte est prise égale à zéro d'où l'intérêt d'une formulation continue et des simulations effectuées. Finalement, étant donné que la collecte par diffusion ( $\mathcal{E}_{db}$ ) n'intervient que pour les petits aérosols là où la collecte mécanique par impaction et interception est négligeable, on peut écrire :

$$E_{\text{total}} = 1 - (1 - \mathcal{E}_m)(1 - \mathcal{E}_{ph}) + (1 - \mathcal{E}_{db}) \quad \text{Eq. (1.59)}$$

où  $\mathcal{E}_m$  contient les deux termes : le dépôt par inertie et l'impaction, et  $\mathcal{E}_{ph}$  les effets de collecte par thermophorèse et par diffusiophorèse.

En envisageant la collecte des aérosols par une gouttelette isolée et lorsque les gouttelettes sont suffisamment proches, l'écoulement autour d'une gouttelette peut être modifié par le sillage de celle qui la précède, par la présence de gouttelettes voisines dans un plan horizontal ou par la déformation des lignes de courant due à une gouttelette plus grosse qui la suit. Powers (Powers et Burson, 1993a) indique que cet effet contribue à réduire l'efficacité de collecte par diffusion. Cependant, seule une simulation numérique pour deux sphères immobiles est disponible (Gauchet, 1999). En ce qui concerne les effets d'interception, il propose une correction valable uniquement en régime visqueux et dépendant de la fraction de volume des collecteurs. Ce problème est marginal car dans une situation réacteur, le rapport du volume liquide au volume de l'atmosphère est inférieur à un pour mille.

Enfin pour terminer cette revue des modèles, la Fig. 1-22 présente l'efficacité de collecte calculée pour des conditions typiques d'accident grave dans lequel l'aspersion est continue (les caractéristiques des gouttes ne sont pas précisées dans le rapport (Murata et al., 1997)).

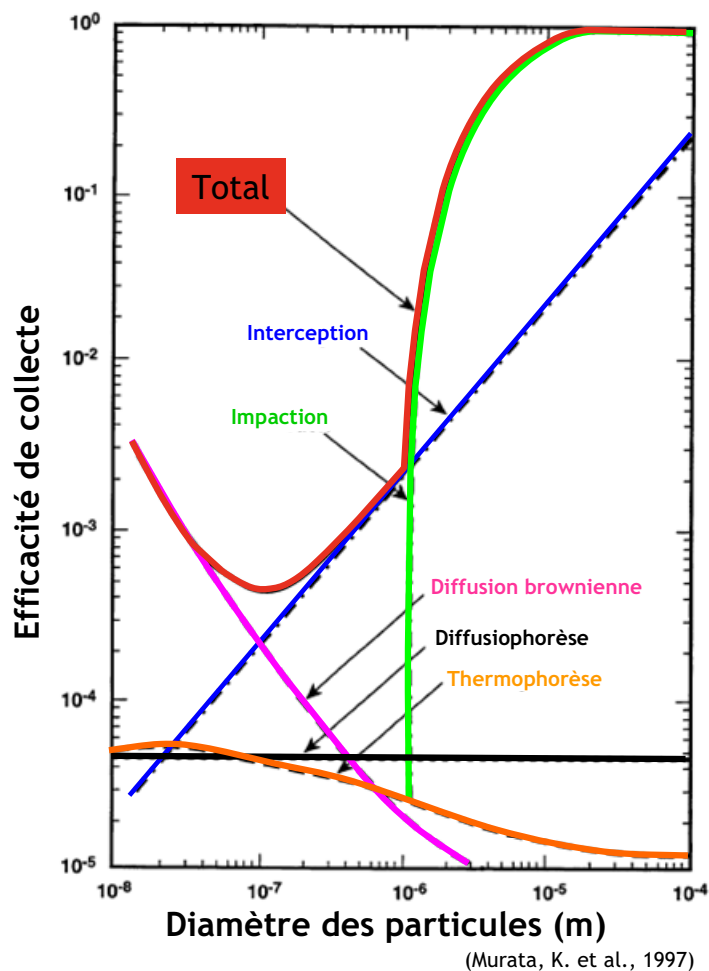


Fig. 1-22 Comparaison qualitative de l'efficacité de collecte des aérosols

### 1.3.5. LA MODELISATION DE LA COLLECTE DANS LES CODES DE CALCUL

Une approche à deux niveaux est en général menée sur la simulation numérique des accidents graves :

- les codes intégraux ou systèmes de codes qui simulent en un faible temps de calcul l'ensemble de l'accident depuis l'événement initiateur jusqu'au possible rejet des radionucléides à l'extérieur de l'enceinte de confinement en incluant les principaux systèmes de sécurité ;
- les codes détaillés (multidimensionnels, 3D) simulent plus finement les phénomènes intervenant sur une partie de l'accident au mépris du temps d'exécution du code lié à de la puissance de calcul nécessaire.

Ils sont utilisés pour les études de sûreté des réacteurs, et notamment pour l'évaluation du « terme source », pour les EPS<sup>5</sup> -2, ainsi que pour les études menées en support de la gestion de l'accident (prévention et limitation des conséquences).

<sup>5</sup> Evaluations Probabilistes de Sûreté

La démarche de validation de ces codes par comparaison avec des résultats expérimentaux est identique et souvent intégrée dans des benchmarks ou ISP<sup>6</sup> :

- d'une part la qualification sur des essais analytiques « à effets séparés » ou « à effets couplés », portant sur un ou quelques phénomènes physiques ou sur la réponse des composants du système,
- d'autre part la vérification sur des expériences globales ou essais à effets intégraux, souvent menés sur des installations à grande échelle, permettant de vérifier que le couplage des phénomènes est correctement traité et qu'aucun d'entre eux n'a été oublié.

De nombreux codes existent comme par exemple CONTAIN (Washington et al., 1991; Murata et al., 1997), MELCOR (Kmetyk, 1994), MAAP4 (Jones et al., 2003) et ASTEC (Allelein et al., 2005). On utilisera le plus évolué en terme de collecte des aérosols par l'aspersion et disponible à l'IRSN : le code ASTEC.

#### **1.3.5.1. Le module CPA du code intégral ASTEC**

Le code ASTEC (Accident Source Term Evaluation Code) est développé en commun par l'IRSN et par son homologue allemand (GRS) depuis 1994. Le but de cette collaboration est la création d'un code intégral, courant et rapide pour simuler l'ensemble des phénomènes se produisant lors d'un accident grave dans un réacteur à eau légère (LWR), depuis l'événement initiateur jusqu'à l'éventuel relâchement de produits radioactifs à l'extérieur de l'enceinte de confinement. ASTEC est le logiciel européen de référence dans le réseau d'excellence SARNET<sup>7</sup>. Les domaines d'application sont l'évaluation des rejets de produits radioactifs (« terme source »), les EPS de niveau 2, la gestion des accidents graves et le support aux programmes expérimentaux. Le développement du code suit le processus habituel conforme aux normes d'assurance qualité des logiciels :

- spécifications générales de modélisation ;
- codage informatique du modèle ;
- validation par comparaison avec les résultats de programmes expérimentaux réalisés dans des installations en pile ou hors pile, à des échelles variées, et par comparaison (appelée "benchmark") sur des calculs de "scénarios-réacteurs" avec d'autres codes internationaux de référence.

Afin d'entreprendre des études de scénarios-réacteurs avec un niveau de confiance acceptable, une réflexion détaillée a porté sur la définition d'une douzaine de séquences accidentelles couvrant différents types de réacteurs (les REP 900 et 1 300 français, le REP Konvoi 1 300 allemand, les VVER 440 et 1000 russe) ainsi que la plupart des phénomènes et systèmes de sûreté dans des conditions aussi représentatives que possible de ces réacteurs. Cette batterie de calculs est régulièrement utilisée pour vérifier chaque version du code à sa livraison. ASTEC qui couvre la quasi-totalité de la phénoménologie des accidents graves (hors l'explosion vapeur) a une structure modulaire (cf. Fig. 1-23). Celle-ci facilite la qualification d'un module par comparaison aux expériences. Chaque module traite les phénomènes intervenant dans une partie du réacteur ou une étape de l'accident, par exemple : thermohydraulique diphasique pour les écoulements dans le circuit primaire ; approche par volumes 0D (dite « lumpedparameter ») pour le comportement thermohydraulique et aérosols de l'enceinte ; chimie à l'équilibre des produits de fission en phase gaz dans le circuit, interaction corium-béton dans le puisard, etc. Les modèles de dégradation du cœur sont directement issus de ceux du logiciel mécaniste ICARE2 de l'IRSN. La difficulté est de trouver le compromis entre la précision des modèles et la rapidité d'exécution. Le calcul d'une séquence complète d'accident sur un réacteur doit être réalisé en moins de 12 h sur un ordinateur de type « standard ».

---

<sup>6</sup> International Standard Problem

<sup>7</sup> Severe Accident Research NETwork ([www.sar-net.org](http://www.sar-net.org))

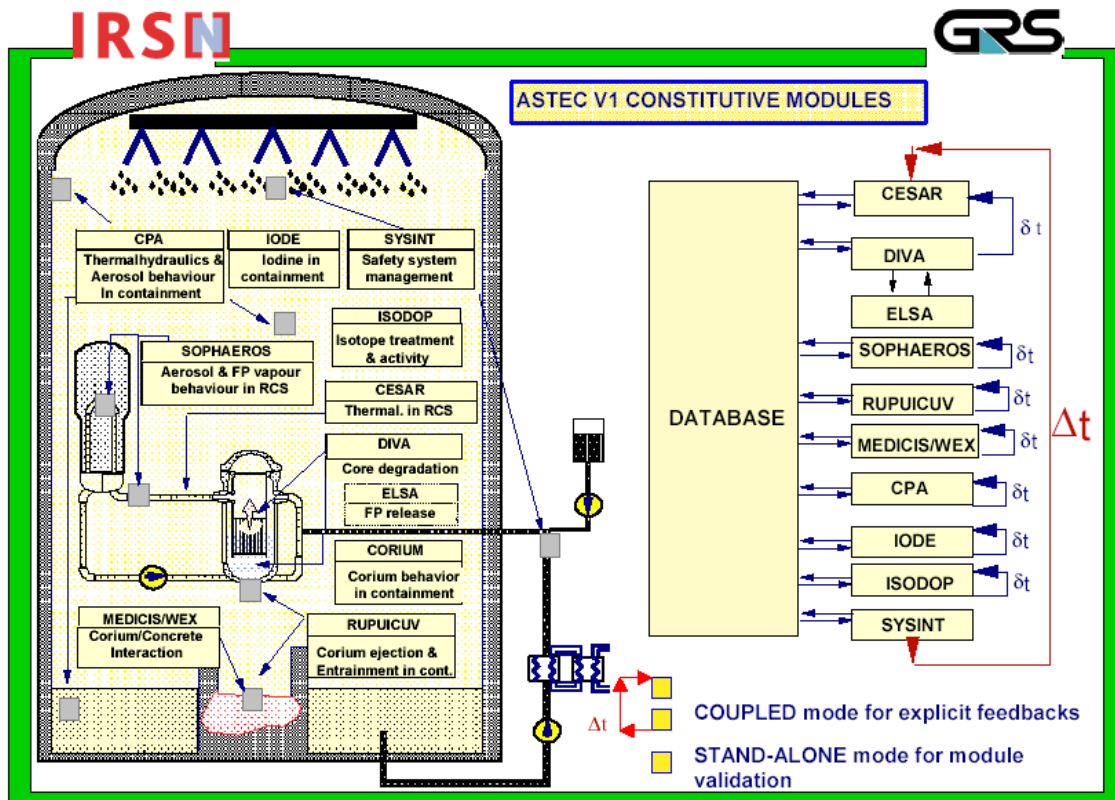


Fig. 1-23 Schéma de la structure d'ASTEC V1

Le module intéressant pour la collecte des aérosols par les gouttes du spray est le module CPA qui traite de la thermohydraulique enceinte et du comportement des aérosols. Dans un premier temps, le module CPA du code ASTEC V1.2 nous permet de faire des essais de sensibilité afin de pré-calculer la grille d'essais puis permettra de confronter les résultats expérimentaux à ceux issus des simulations numériques.

Description du module CPA (Containment Part of ASTEC): (Bestele et Klein-Heßling, 2000; Plumecocq et al., 2005)

L'objectif principal du module CPA est de décrire tous les phénomènes physiques intervenant dans l'enceinte de confinement des réacteurs à eau légère lors d'un accident grave. Dans la logique de la description multi-compartiment, les conditions et la composition de l'atmosphère, ainsi que la concentration et la distribution en taille des aérosols sont supposées spatialement homogènes dans chaque compartiment.

Le système complet de CPA se compose de plusieurs modules, utilisant les différents phénomènes suivants :

- le module CPA-THY (Thermal-HYdraulic) : les modèles thermohydrauliques équilibre et non équilibre,
- le module CPA-AFP (Aerosol Fission Product) : les modèles d'aérosols décrivent le comportement d'une population polydispersée d'aérosols à l'intérieur d'un volume.

## CPA-THY

Les types d'objets principaux employés pour décrire les séquences accidentelles ou d'autres processus sont : les zones, les jonctions, les structures. Les compartiments de l'installation considérée doivent être subdivisés en volumes de contrôle (les zones). L'état thermodynamique d'une zone est défini par sa température et les masses des composants spécifiques.

### Les objets de type « zones » :

Chacune des zones peut être divisée en partie de zone. Les parties de zones gazeuses peuvent contenir des particules liquides ou solides (brouillard ou poussière), les parties de zone liquides peuvent contenir des gaz dissous et des particules solides, et les parties de zone solides peuvent contenir des gaz et des liquides dissous. Toutes les variables relatives aux zones sont basées sur cette structure (composants, zone de parties, zones). Quatre modèles différents de zone sont implémentés dans CPA. Dans le cadre de notre étude, seulement deux peuvent être intéressants à utiliser :

#### **modèle de zone équilibre**

Tous les composants (eau liquide, vapeur et autres gaz incondensables) sont supposés être mélangés de façon homogène avec pour résultat une température homogène distribuée en volume et identique entre la phase liquide et la phase gazeuse induisant aucune évaporation. Les atmosphères surchauffées ne peuvent pas contenir d'eau liquide. Dans ce cas, l'eau est drainée immédiatement dans d'autres zones.

#### **modèle de zone non-équilibre**

En utilisant ce modèle, la zone est subdivisée en deux parties : une partie atmosphère semblable au modèle de zone équilibre et une partie « puisard » (si existant) indiquée par la masse et la température de l'eau. Entre ces deux parties l'échange thermique par des corrélations de convection et de condensation (ou évaporation) est possible.

### Les objets de type « jonctions » :

Les jonctions décrivent l'interaction d'écoulement entre différentes zones. Du point de vue de la structure de données, chaque jonction peut avoir plusieurs entrées et sorties (utilisées par exemple dans des systèmes de pompe). Dans CPA la simulation de l'écoulement de gaz et du drainage de l'eau est fortement séparée.

### Les objets de type « structures » :

Les murs, les planchers et les plafonds du bâtiment considéré sont représentés par des objets de type structure. Le calcul de flux de la chaleur est unidimensionnel, résolu par l'équation de Fourier. Le mur entier peut être subdivisé en plusieurs couches. Leur état thermodynamique est défini par une température à l'épaisseur de la structure. L'arrangement des couches peut être choisi librement. L'échange thermique entre les structures et leurs zones assignées est calculé par l'intermédiaire des corrélations de transfert thermique par convection, par condensation ou par rayonnement (mur à mur y compris). Dans ces corrélations, des propriétés moyennes des composants indiqués sont utilisées. Le profil de température initial et les conditions aux limites des zones peuvent être directement définis par l'utilisateur.

## CPA-AFP

Les modèles d'aérosols décrivent le comportement d'une population homogène et polydispersée d'aérosols à l'intérieur d'une zone. L'agglomération, la condensation, le dépôt, les sources existantes d'aérosols (comme des injections) et les pertes sont calculés. Chaque classe de taille peut être composée de huit composants chimiques au maximum.

### ➤ le processus d'agglomération

Le processus désigné sous le nom de l'agglomération ou de la coagulation décrit ce qui se produit quand deux particules ou plus se heurtent ou se collent entre elles et forment une plus grosse particule. Le taux d'agglomération augmente quadratiquement avec la concentration en nombre des particules. Dans une enceinte de LWR, des taux considérables d'agglomération peuvent être attendus pour une concentration en aérosols minimale d'environ 1 g/m<sup>3</sup>. (Plumecocq, 1997) Quatre processus d'agglomération différents d'aérosols sont modélisés. Les deux premiers processus sont dominants :

- agglomération brownienne,
- agglomération gravitationnelle,
- agglomération turbulente de cisaillement,
- agglomération à inertie turbulente.

L'agglomération est l'effet dominant dans l'enceinte pour les petits aérosols. Il est proportionnel au facteur d'agglomération et inversement proportionnel au facteur de forme. Avec ces facteurs, tous les types de particules peuvent être pris en considération. Pour les particules sphériques, le facteur d'agglomération et le facteur de forme sont égaux à 1.

L'agglomération gravitationnelle tient compte de la collision entre les grandes et les petites particules qui chutent à des vitesses différentes. Les différentes relations exprimant l'efficacité de collision sont disponibles dans CPA-AFP : relation de Fuchs, relation de Pruppacher-Klett et une relation originale nommée MAEROS. Le taux d'agglomération croît avec l'augmentation de l'efficacité de collision et du facteur d'agglomération mais diminue avec l'augmentation du facteur de forme.

### ➤ le processus de dépôt

Les modèles d'aérosols prennent en compte les procédés de dépôt suivants :

- sédimentation,
- dépôt diffusif,
- thermophorèse,
- diffusiophorèse,
- interaction avec le spray.

La sédimentation est le dépôt des particules sur des surfaces de type « plancher » par gravitation. Le dépôt par la diffusion est dû au mouvement brownien et au gradient de concentration en proche paroi d'une surface. L'utilisateur du code doit fournir l'épaisseur de couche limite de proche paroi. Le dépôt des aérosols par thermophorèse est engendré par le gradient de température de la couche limite sur un mur froid. Le dépôt par diffusiophorèse a lieu par la condensation de vapeur sur un mur froid provoquée par l'écoulement de Stefan et les gradients de concentration.

➤ le rabatement

Enfin l'interaction des aérosols avec le spray et le rabatement des aérosols est obtenue par le modèle aspersion (interaction avec le spray) basé sur le modèle standard du code CASPER développé dans le cadre de la thèse de Plumecocq (Plumecocq, 1997).

➤ méthode de condensation MGA

La condensation sur les particules est calculée avec la méthode moving-grid appelée MGA (Moving-Grid-Analysis). Elle réduit les temps de calcul ainsi que la diffusion numérique et les instabilités numériques, une fois comparée à la méthode de grille fixe. La méthode MGA consacrée à la condensation sur des particules a été développée par F. Gelbard aux Sandia National Laboratories (Washington et al., 1991; Kousaka et Endo, 1993). Le modèle thermohydraulique (CPA-THY) et les modèles aérosols (CPA-AFP) ont leur propre temps d'intégration dans le code mais sont étroitement couplés entre eux.

Pendant l'étape de condensation, les conditions thermohydrauliques demeurent constantes. Elles sont seulement mises à jour avant la prochaine étape. Cependant, la méthode MGA exécute intérieurement un calcul thermohydraulique simplifié. L'agglomération et le dépôt des gouttelettes sont calculés comme si elles étaient des particules solides. Dans la méthode de MGA, les taux de croissance et de décroissance des particules sont donnés par l'équation de Mason (Washington et al., 1991).

### 1.3.5.2. Les modèles de collecte utilisés

Concernant la partie interaction aérosols/spray, une description fine des phénomènes de collecte conduit à des difficultés numériques liées au couplage de la dynamique des gouttelettes avec les conditions de l'atmosphère. Un modèle utilisable en configuration multi-compartiments et intégrant tous les phénomènes cités (cf. §1.3) a été développé et intégré dans le module CPA du code ASTEC avec une méthode numérique qui permet de s'affranchir de ces difficultés.

La méthode consiste à résoudre dans un premier temps la relaxation des gouttelettes pour chaque classe de taille, ce qui permet de décrire la fonction de distribution par rapport à une grille mobile en fonction de la hauteur. Ayant l'évolution des gouttes, cette description est ensuite utilisée pour effectuer les bilans de masse résultant de la coalescence. Ensuite le taux de rabatement par les gouttes de l'aspersion calculé dans CPA prends en compte les effets mécaniques (impaction, interception et diffusion) et phorétiques (diffusiophorèse et thermophorèse).

Dans un compartiment et, pour une classe d'aérosol, ce taux nécessite de connaître les efficacités élémentaires de collecte déterminées précédemment pour être ensuite introduites dans l'équation de masse dans CPA. L'efficacité utilisée est définie par la non additivité de l'Eq. (1.59). L'efficacité de collecte par effet mécanique,  $\mathcal{E}_m$  contient deux termes, reliées par la formule  $\mathcal{E}_m = 1 - (1 - \mathcal{E}_{int})(1 - \mathcal{E}_{imp})$ , le premier décrivant le dépôt par inertie des particules ponctuel (Beard, 1974), associé à une correction pour des particules avec une petite inertie, y compris l'effet d'interception (Layly et Plumecocq, 2004). Le dernier exige la connaissance de la première dérivée de la fonction aérodynamique, qui est exprimée dans (Layly et Plumecocq, 2004).

L'efficacité de collecte  $\mathcal{E}_b$  résultant de la diffusion brownienne est exprimée dans (Layly et Plumecocq, 2004) et permet de déterminer l'efficacité total de collecte par effet mécanique  $\mathcal{E}_{m2}$  Eq. (1.60) :

$$\mathcal{E}_{m2} = 1 - (1 - \mathcal{E}_m)(1 - \mathcal{E}_b) \quad \text{Eq. (1.60)}$$



L'efficacité de collecte  $\mathcal{E}_{ph}$  résultant de la capture phorétique des aérosols ou de la condensation de la vapeur est exprimée au paragraphe §1.3.4.2) et permet, associée à celle des effets mécaniques, de déterminer l'efficacité totale de collecte  $\mathcal{E}_{tot}$ .

$$\mathcal{E}_{tot} = \mathcal{E}_{m2} + \mathcal{E}_{ph} \quad \text{Eq. (1.61)}$$

### 1.3.5.3. Les validations réalisées et les manques actuels

Des validations de la partie thermohydraulique et du comportement des aérosols de CPA ont eu lieu ainsi que des comparaisons avec le code CONTAIN ou COCOSYS (Allelein et al., 2003; Allelein et al., 2005) sur diverses expériences telles que VANAM M2\*/M3 (cf. §1.2.4.2), EREC T5 (Allelein et al., 2003) ou KAEVER (cf. §1.2.4).

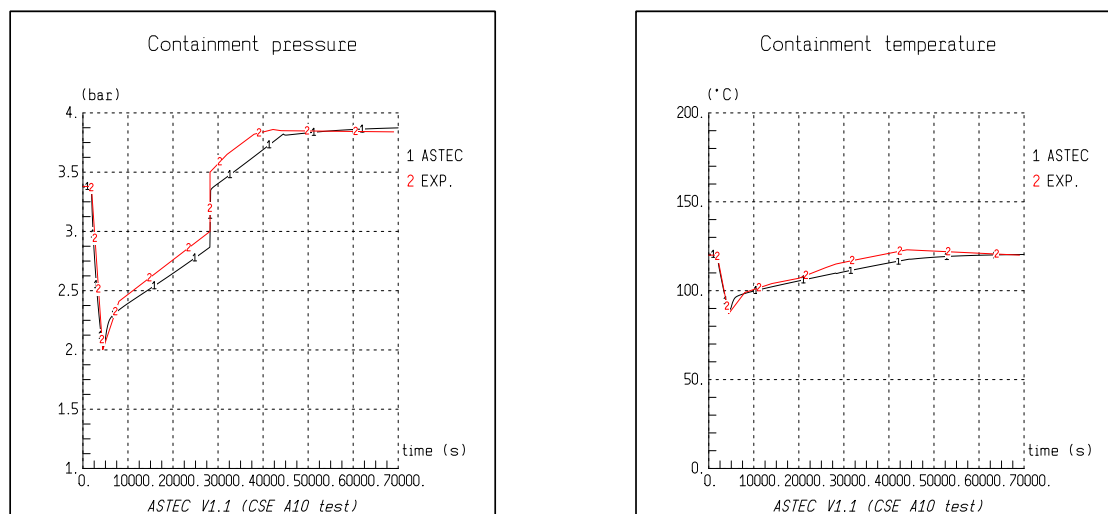
Une qualification du modèle de CPA interaction aérosols/spray avec les résultats issus des expériences CSE (cf. §1.2.3.1) a été réalisée pour les aspects de thermohydrauliques et de la collecte des aérosols par le spray.

Les résultats ont montré un bon accord pour la dépressurisation de l'enceinte CSE durant les deux modes d'opération de l'aspersion, injection directe et recirculation.

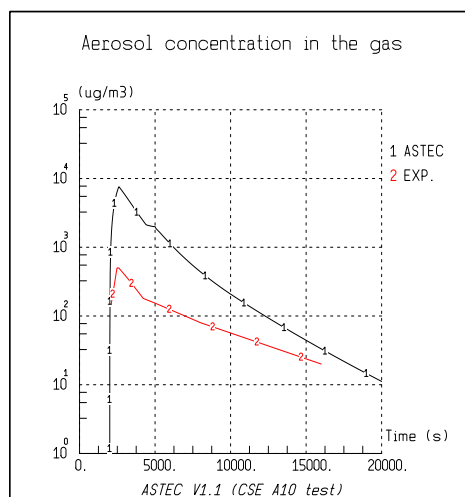
Pour ce qui concerne le rabattement des aérosols, l'interprétation des essais CARAIDAS (cf. §1.2.4.4) a rendu nécessaire le développement de nouveaux aspects de la modélisation de la collecte par les effets mécaniques (cf. §1.3.5.2), qui ont été intégrés dans CPA.

Une qualification sur les expériences CSE a été réalisée.

Voici succinctement les comparaisons réalisées sur les résultats expérimentaux issus des expériences CSE et CARAIDAS (Layly, 2004; Layly et Plumecocq, 2004; Plumecocq et al., 2005). Premièrement, les présentations des conditions thermohydrauliques au cours d'un essai et la concentration en aérosols dans le gaz pour l'essai CSE-A10 (Fig. 1-24 et Fig. 1-25) :



**Fig. 1-24 Comparaison des conditions thermohydrauliques au cours d'un essai CSE-A10 (Plumecocq et al., 2005)**



**Fig. 1-25 Comparaison de la concentration en aérosols dans le gaz pour l'essai CSE-A10 (Plumecocq et al., 2005)**

Le taux de rabattement calculé est en accord avec celui mesuré pour les modes d'injection d'aspersion direct ou indirect. Néanmoins, la concentration maximum calculée à la fin du relâchement des aérosols est beaucoup trop importante. Plusieurs explications sont possibles :

- réduction du transfert convectif dû au spray,
- beaucoup d'incertitudes sur la distribution et l'hygroscopicité des particules existent,
- une partie des aérosols de Cs a pu être déposée sur les murs de l'enceinte.

Deuxièmement, une comparaison des modèles d'efficacité de collecte élémentaire avec les données de CARAIDAS est présentée sur la Fig. 1-26.

L'efficacité de collecte peut couvrir plus de deux décades. La plupart des essais de collecte d'aérosol ont été faits à une pression de 1 bar et une température de 20 °C. Ils peuvent être regroupés en quatre familles, à savoir les essais avec des gouttes dont le diamètre est de 700 µm et des aérosols dont le diamètre aérodynamique médian en masse est compris entre 2 µm et 4 µm (3 - cercles rouges), les essais avec des gouttes dont le diamètre est de 300 µm et des particules dont le diamètre aérodynamique médian en masse est compris entre 2 µm et 4 µm (4 - triangles bleus), des essais avec respectivement des petites (2 - trapèzes verts) et des grosses (1 - carrés roses) gouttes, et des particules dont le diamètre aérodynamique médian en masse est compris entre 1 µm et 1,5 µm. Les croix bleues ciel (5) indiquent des essais réalisés dans des conditions plus réalistes par rapport aux calculs d'accidents de réacteur avec une pression plus élevée (2 à 4 bar) et une température plus élevée (120 à 140 °C). Malheureusement, le dernier ensemble d'essais présente des incertitudes expérimentales trop grandes, principalement dues aux difficultés non expliquées de piégeage de la goutte dans le collecteur au fond de l'enceinte. En conséquence, la dispersion des résultats est importante.

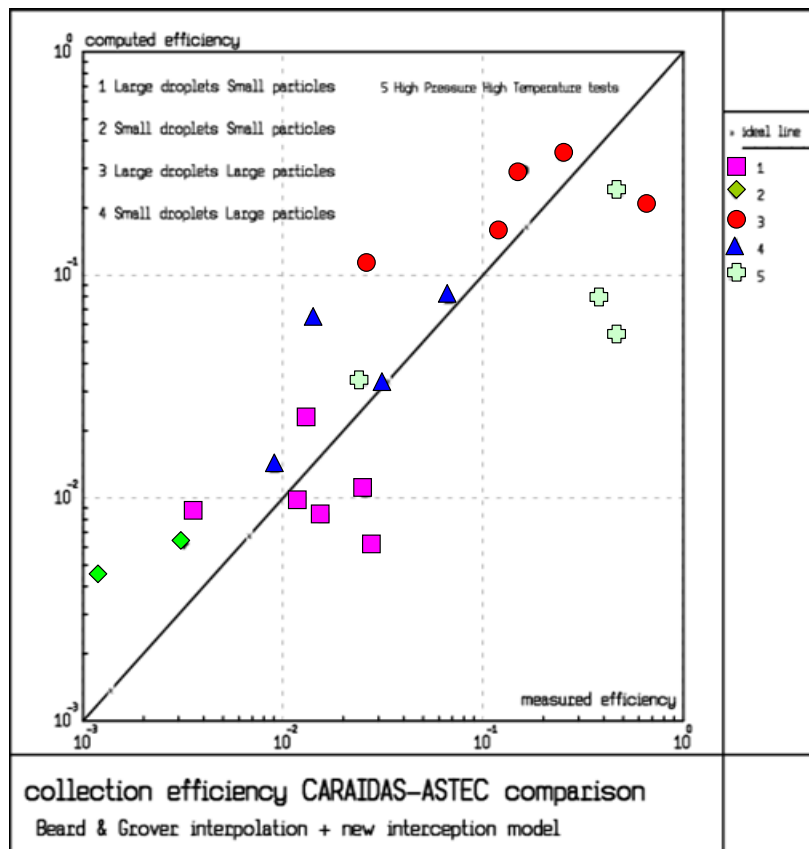


Fig. 1-26 Comparaison des modèles d'efficacité élémentaire de collecte avec les données de CARAIDAS (Plumecocq et al., 2005)

Cependant, les prédictions du modèle, qui fournissent un bon ordre de grandeur de l'efficacité de collecte sur trois décades, sont jugées acceptables pour une application dans un code d'accident grave devant être rapide.

Les validations de la partie interaction aérosol et spray ont donc porté sur des cas académiques ou des expériences avec une faible instrumentation. Des essais dans TOSQAN permettront d'étudier un cas de plus proche du REP avec pulvérisation de gouttelettes et des conditions thermohydrauliques bien contrôlées. Les premières simulations effectuées sur le cas TOSQAN seront présentées dans le chapitre suivant (cf. Chapitre 3) pour pré-calculer et définir la grille d'essais.

#### 1.3.5.4. Mise à jour envisageable

L'ensemble des recherches menées sur les phénomènes physiques liés aux accidents graves a permis de développer des codes intégraux simulant en un faible temps de calcul un tel accident depuis l'événement initiateur jusqu'au possible rejet des radionucléides à l'extérieur de l'enceinte de confinement, et ce, en incluant les principaux systèmes de sûreté.

Les mises à jour concernent la possibilité d'affiner les modèles implantés dans le code ainsi que l'obtention d'une base de données qui devrait permettre d'améliorer les connaissances des mécanismes de collecte des aérosols par une pulvérisation de gouttes d'eau en situation accidentelle afin de permettre ensuite de confronter les modèles implantés dans CPA dans ce cas.

## 1.4. CONCLUSION

Les phénomènes gouvernant le comportement des aérosols dans l'enceinte de confinement sont généralement bien connus et des modèles physiques ont été élaborés, pour les décrire, souvent à partir de données obtenues en dehors du domaine du nucléaire. Les phénomènes de dépôt les plus importants tels que la diffusiophorèse et la sédimentation ont fait l'objet d'expérimentations spécifiques dans le passé à des fins de validation. Valider les modèles de collecte des aérosols par les gouttes de l'aspersion sur des essais plus représentatifs d'un accident grave est encore nécessaire.

Au cours de cette étude bibliographique, il ressortait que les produits de fission pouvaient être relâchés sous forme d'aérosols et d'espèces gazeuses. Au cours de la thèse, n'est étudié que la partie rabattement des aérosols et plus particulièrement le choix d'aérosols insolubles et non hygroscopiques a donc été fait principalement liées aux contraintes expérimentales qui seront développées au Chapitre 3.

# CHAPITRE 2. CPA ET GRILLE D'ESSAIS

## 2.1. INTRODUCTION

Maintenant que le contexte, l'état de l'art bibliographique, la modélisation du rabattement des aérosols par les gouttes d'eau et le module CPA du code ASTEC ont été présentés, le dimensionnement de la grille d'essais est réalisé dans ce chapitre. L'étude bibliographique a mis en avant, que dans les conditions thermohydrauliques représentatives d'un accident grave dans une enceinte de confinement, deux familles distinctes de mécanismes de rabattement des aérosols, les effets mécaniques et les effets phorétiques. A partir de ces mécanismes, une étude de sensibilité (Marchand, 2006) est réalisée en étudiant la variation des paramètres pilotant les conditions thermohydrauliques de l'enceinte, et ceux liés aux caractéristiques de l'aspersion et des aérosols. De plus, une étude de sensibilité au maillage de l'enceinte.

La finalité de cette étude est la définition de la grille d'essais à réaliser dans TOSQAN.

## 2.2. SIMULATION D'UN ESSAI AVEC CPA

Ce paragraphe permet de transcrire la configuration expérimentale d'un essai vis-à-vis de sa définition à partir du module CPA, ainsi que d'estimer les limites utilisables dans le code.

### 2.2.1. LE SPRAY

CPA étant un code 0D, le spray est défini en termes de section de spray avec un parcours dans une ou plusieurs zones du maillage vers une surface finale. Il est possible de déterminer une fraction du spray qui pourra impacter les parois au cours de la chute des gouttes. Cette section du spray sera prise correspondante à la section du spray impactant la surface horizontale constituant le fond du puisard de l'enceinte TOSQAN et les gouttes n'impacteront pas les parois verticales de l'enceinte. Elle détermine les limites du code au niveau de la modélisation de la géométrie du spray par un cylindre.

Les conditions initiales du spray sont définies par chacun des paramètres suivants :

- par une vitesse initiale identique pour chacune des gouttes,
- par un débit massique d'eau injecté dans cette surface de spray,
- par des gouttes mono dispersées ou par des gouttes polydispersées suivant une loi de type log normale, et par un diamètre médian en masse.

La distribution en taille des gouttelettes est décrite à partir d'une distribution de type log-normale, dont la formulation générale est (Plumecocq, 1997) :

$$f(r) = \frac{n_0}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma r} \exp\left(-\frac{\left(\ln \frac{r}{r_g}\right)^2}{2 (\ln \sigma)^2}\right) \quad \text{Eq. (2.1)}$$

Cette fonction est entièrement définie à partir de la connaissance de deux moments, le rayon géométrique de la goutte  $r_g$  et la déviation standard  $\sigma$ , et  $n_0$  est la concentration en nombre des gouttes. Cette hypothèse est envisagée en regardant la distribution présentée au paragraphe 3.4 qui a bien l'aspect d'une distribution log-normale. Pour une distribution log-normale, le rayon médian en masse ( $R_{50}$ ) est directement relié au rayon géométrique par les relations de (Hatch et Choate, 1929) adaptées par (Hinds, 1999):

$$R_{50} = r_g \exp(3(\ln \sigma)^2) \quad \text{Eq. (2.2)}$$

Le diamètre médian en masse noté DMM est :  $\text{DMM} = 2.R_{50}$

Le code recalcule automatiquement la densité numérique surfacique de gouttes injectées à partir des paramètres entrés.

### **2.2.2. LES AÉROSOLS**

Les aérosols sont définis par un diamètre médian en masse (DMM) et une masse volumique. Ils sont représentés par une distribution granulométrique de type log normale (Eq. (2.1)) sur une plage de diamètres fixée par l'utilisateur au début de l'essai.

La condition limite d'injection est fixée par une masse totale d'aérosols injectée dans l'enceinte dans une zone pour ensuite obtenir une concentration en aérosols homogène à l'instant du déclenchement de l'aspersion, dans chaque zone du maillage de l'enceinte.

### **2.2.3. DEFINITION DU MAILLAGE DE L'ENCEINTE**

L'impact du maillage est en premier lieu étudié afin de déterminer le plus pertinent à utiliser pour la suite de l'étude.

Trois types de maillage (symétrique par rapport à l'axe z) sont étudiés pour définir le volume et les parois de l'enceinte TOSQAN :

- M1. Un volume simple de type « cylindre », où l'enceinte TOSQAN et le puisard ne sont maillés que par une zone (Fig. 2-1(a)).
- M2. Un volume où un puisard est défini en raffinant le maillage des parois de celui-ci en 3 murs (Fig. 2-1(b)).
- M3. Le découpage du volume de TOSQAN en 3 zones afin de mieux définir la zone de spray centrale et les zones situées hors du spray, en périphérie (Fig. 2-2).

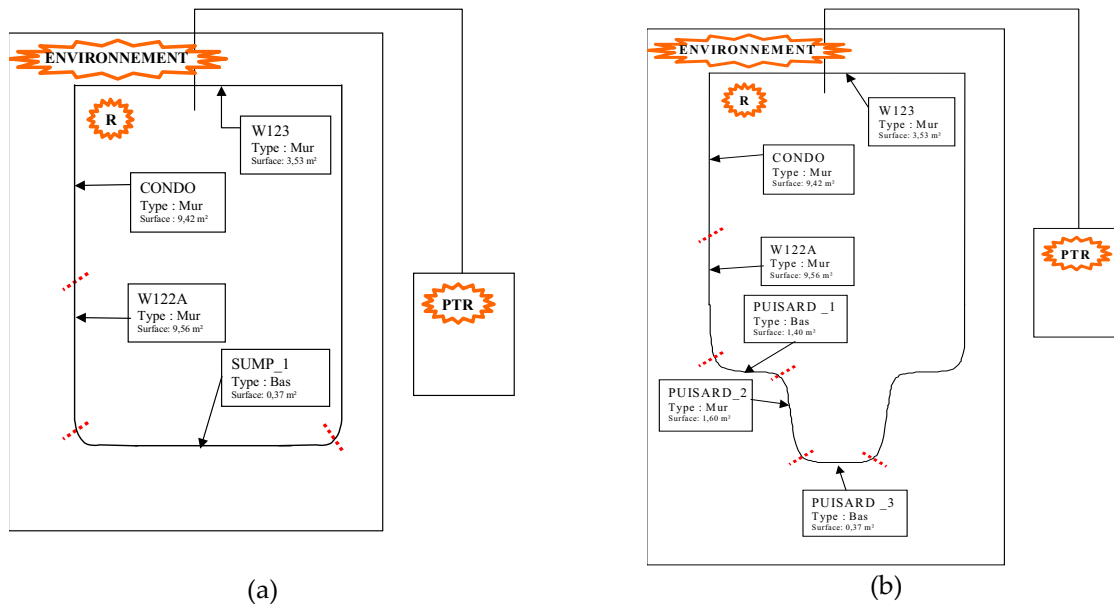


Fig. 2-1 (a) Maillage 1 (M1) et (b) Maillage 2 (M2)

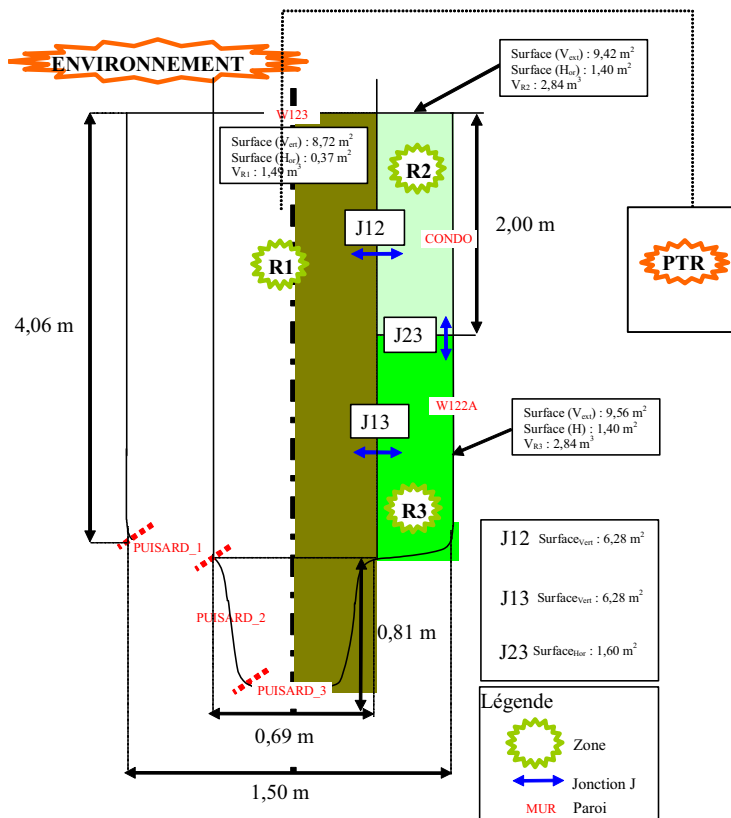


Fig. 2-2 Maillage 3 (M3)

Deux séries de simulations sont réalisées avec ces maillages : une sans aspersion et une avec aspersion. Les conditions, résumées dans le Tableau 2-1, sont celles de l'essai de référence avec aspersion. La température de l'eau d'aspersion est de 25 °C, le diamètre des gouttes est fixé à 100 µm et la section du spray est égale à 0,37 m<sup>2</sup> ce qui représente 20 % de la section de l'enceinte.

**Tableau 2-1 Essai de référence**

	Thermohydrauliques			Aspersion			Aérosols		
	$P_{abs}$	$T_{gaz}$	s	$Q_{asp}$	$T_{asp,inj}$	$d_{goutte,inj}$	Section du spray	$m_{aérosols,init}$	DMM
	(bar)	(K)		(g/s)	(K)	( $\mu\text{m}$ )	( $\text{m}^2$ )	(g)	( $\mu\text{m}$ )
<b>Essai de référence</b>	<b>1,5</b>	<b>363</b>	<b>0,57</b>	<b>10</b>	<b>298</b>	<b>100</b>	<b>0,37</b>	<b>2</b>	<b>1</b> <b>(<math>\sigma = 1,5</math>)</b>

Le maillage (M1), formé d'un seul volume ne modélise pas le puisard et impose une concentration en gouttelettes sur la section du spray, mais en revanche, les bilans relatifs aux aérosols sont faits de manière uniforme sur l'ensemble du volume gazeux de l'enceinte. Par conséquent, le maillage (M1) ne peut pas prendre en compte les transferts d'aérosols entre les zones de spray et celles en dehors du spray, induits par les mécanismes d'entraînement.

Une correction du maillage (M1) vers le maillage (M2) permet de définir le puisard.

En revanche, le maillage (M2) ne modélise pas le fait que le spray n'occupe pas tout le volume de l'enceinte expérimentale. Il ne prend pas en compte la zone hors spray ce qui induit un biais dans l'évaluation des dépôts sur les parois verticales et ne permet pas la prise en compte des transferts d'aérosols dans l'enceinte.

Or, dans notre configuration d'injection de l'aspersion, la section du spray est petite devant celle de l'enceinte et par conséquent la dynamique du rabattement des aérosols par les gouttes d'aspersion est limitée par la dynamique de réalimentation en aérosols de la zone de spray du fait des phénomènes d'entraînement. Ce maillage (M2) ne peut prendre en compte cela pour étudier le rabattement des aérosols car il est non adapté à la configuration d'un spray conique étroit. Pour la suite de l'étude, ce maillage ne sera donc plus utilisé ainsi mais sera raffiné en un nouveau maillage (Fig. 2-2) définissant 3 zones afin de mieux prendre en compte la zones de spray et les transferts entre les zones de spray et les zones hors du spray.

Les résultats des calculs utilisant les maillages (M2) et (M3) montrent que l'évolution des conditions thermohydrauliques est quasi similaire pour ces deux maillages. Une légère baisse de la pression du régime permanent est observée dans le cas du maillage (M3) par rapport au maillage (M2). Cette différence est liée au fait que le rapport entre le volume du spray et le volume de l'enceinte est plus important dans le cas du maillage (M3).

Par la suite, le maillage (M3) sera toujours utilisé dans cette étude de sensibilité ainsi que pour les comparaisons au Chapitre 4 entre les résultats issus du code et ceux issus des expériences réalisées dans TOSQAN.

## **2.3. DESCRIPTION D'UN ESSAI DE TYPE REFERENCE**

### **2.3.1. COMPORTEMENT DU GAZ ET DES GOUTTES D'ASPERSION**

Nous avons vu (cf. §1.1.2.2) que la température du gaz dans l'enceinte de confinement au cours d'un accident grave serait de l'ordre de 120 °C. Le but des essais réalisés dans le cadre de cette thèse est d'aborder l'étude du rabattement des aérosols avec une approche analytique afin d'étudier le plus séparément possible les différents mécanismes de collecte. Au vue de cette considération et des contraintes expérimentales (cf. §3.2.1), nous avons fixé la température des parois de l'enceinte à une température de consigne de 90 °C.



Nous allons dans un premier temps présenter l'analyse à l'aide du module CPA de l'essai de référence dont les caractéristiques sont présentées dans le Tableau 2-1, à l'aide du module CPA.

Les caractéristiques physiques des aérosols sont représentatifs, en terme de diamètre aérodynamique, des produits de fission (Femandjian, 1984; Powers et Burson, 1993b; Clement et al., 2005) pouvant être libérés dans l'enceinte de confinement en situation accidentelle. La masse volumique des aérosols est égale à 3,2 g/cm<sup>3</sup> avec une distribution granulométrique de type log-normale répartie entre 10<sup>-2</sup> µm et 10 µm (Tableau 2-2). Lors des calculs c'est le diamètre moyen de la classe qui est considéré.

**Tableau 2-2 Distribution granulométrique des aérosols dans CPA**

Classe	[µm]				
DIAM01	0,010 – 0,014	DIAM07	0,080 – 0,112	DIAM14	0,891 – 1,258
DIAM02	0,014 – 0,020	DIAM08	0,112 – 0,158	DIAM15	1,258 – 1,778
DIAM03	0,020 – 0,030	DIAM09	0,160 – 0,224	DIAM16	1,778 – 2,511
DIAM04	0,030 – 0,040	DIAM10	0,224 – 0,316	DIAM17	2,511 – 3,548
DIAM05	0,040 – 0,056	DIAM11	0,316 – 0,446	DIAM18	3,548 – 5,011
DIAM06	0,056 – 0,080	DIAM12	0,446 – 0,630	DIAM19	5,011 – 7,079
		DIAM13	0,630 – 0,891	DIAM20	7,079 – 10,00

L'angle de spray défini étroit est représenté par un cylindre de section de 0,37 m<sup>2</sup>, impliquant que les gouttelettes n'impactent pas les parois verticales dans l'enceinte. Les gouttes d'aspersion sont considérées comme étant mono-dispersées. Ceci implique qu'il n'y a pas de coalescence des gouttes, étant donné le principe du modèle de coalescence implanté dans le module CPA qui est basé sur la seule hypothèse que si deux gouttes ayant des vitesses verticales différentes se rencontrent, elles coalescent. De plus, la composante radiale de la vitesse des gouttes est nulle.

Le scénario de calcul utilisé dans le module CPA est le suivant :

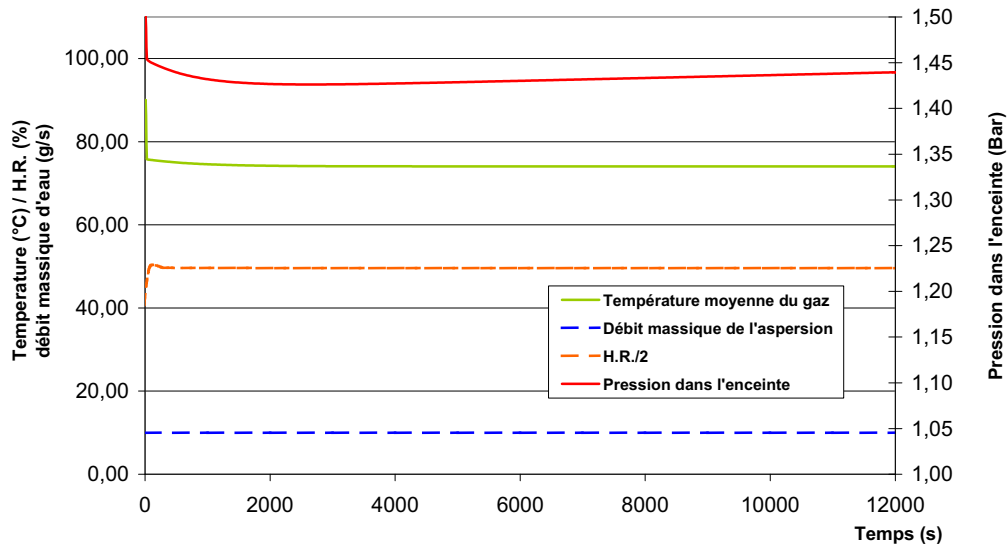
L'enceinte qui contient initialement un mélange air/vapeur, estensemencée en aérosols, puis l'aspersion est déclenchée.

La Fig. 2-3 présente l'évolution temporelle de la pression, de l'humidité relative, de la température moyenne du gaz dans l'enceinte et du débit massique d'eau d'aspersion injecté au cours de l'essai. Le temps de référence t = 0 s correspond à l'activation du spray.

Les gouttelettes injectées à une température de 25 °C sont le siège de transferts de masse et de chaleur avec l'atmosphère gazeuse environnante. Ces transferts ont pour résultat de faire chuter la pression et la température de l'atmosphère gazeuse.

Globalement, le déclenchement de l'aspersion induit une dépressurisation de l'enceinte dont la pression se stabilise autour de 1,45 bar. A l'équilibre, l'énergie fournie aux gouttelettes par le gaz est compensée par celle fournie par les parois de l'enceinte au gaz.

Les conditions thermodynamiques de l'essai de référence permettent d'obtenir une faible dépressurisation de l'enceinte ainsi que l'atteinte rapide d'un régime permanent, conditions recherchées pour notre étude analytique. De plus, l'humidité relative tend rapidement vers 98 % (Fig. 2-3). Ainsi, si l'atmosphère est surchauffée, c'est à dire si la pression de saturation de la gouttelette est inférieure à celle du gaz, les gouttelettes atteignent rapidement au cours de leur chute leur température de saturation alors inférieure à celle du gaz et commencent à s'évaporer. L'évaporation a pour conséquence un accroissement du taux d'humidité dans l'enceinte. Si au contraire l'atmosphère est saturée ou sursaturée, la vapeur condense à la surface des gouttelettes et ce, tant que le gradient de température entre la gouttelette et l'atmosphère gazeuse est non nul.



**Fig. 2-3 Evolution temporelle de la température et de la pression pour l'essai de référence pour l'étude de sensibilité**

Dans le module CPA, la relaxation d'une gouttelette est obtenue par la résolution du système d'équations couplées pour les bilans de masse, d'impulsion et d'énergie. Concernant les échanges de quantité de mouvement entre le gaz et la goutte ils sont pris en compte dans le module CPA, mais en supposant que le gaz est au repos à chaque pas de temps. Les bilans sont comptés positivement dans le sens du gain par la goutte, c'est-à-dire qu'un transfert de quantité de mouvement du gaz vers la goutte est compté positif. Un coefficient adimensionnel (Plumecocq, 1997) qui caractérise l'intensité du transfert de masse entre la goutte et le gaz environnant (analogue au nombre de Spalding  $B_M$ ). Ce nombre est positif lorsque la vapeur se condense sur la goutte et négatif lorsque la goutte s'évapore.

Il est défini par la relation suivante :

$$K_{B_M} = \frac{X_{s_{oz}} - X_{s_w}}{1 - X_{s_w}} \quad \text{Eq. (2.3)}$$

$X_{s_{oz}}$ ,  $X_{s_w}$  sont respectivement la fraction molaire de la vapeur d'eau loin de la gouttelette et à la surface de cette dernière.

Sur la Fig. 2-4 on remarque que le coefficient  $K_{B_M}$  est positif sur le début de la chute (sur une distance de 0,25 m), ce qui implique une courte zone de condensation de la vapeur sur les gouttes induisant une augmentation du diamètre de ces dernières (Fig. 2-5), puis, passé cette zone, les gouttes s'évaporent. La durée de cette phase correspond au temps mis par la goutte pour atteindre sa température de saturation (Fig. 2-4). La goutte continuant à s'échauffer par l'intermédiaire du flux convectif, un flux d'évaporation se crée en contre-sens du flux convectif, ayant pour conséquence la diminution de la taille de la goutte (Fig. 2-5). Le flux d'énergie perdu par la goutte est strictement égal au flux d'énergie thermique transmis à la goutte par convection (ceci explique pourquoi rapidement la température de la goutte est constante en phase évaporation). Les gouttes atteignent rapidement leur vitesse terminale de chute dans les premiers centimètres (entre 0,3 m et 0,5 m), celle-ci étant identique pour toutes gouttes monodispersées (Fig. 2-5).

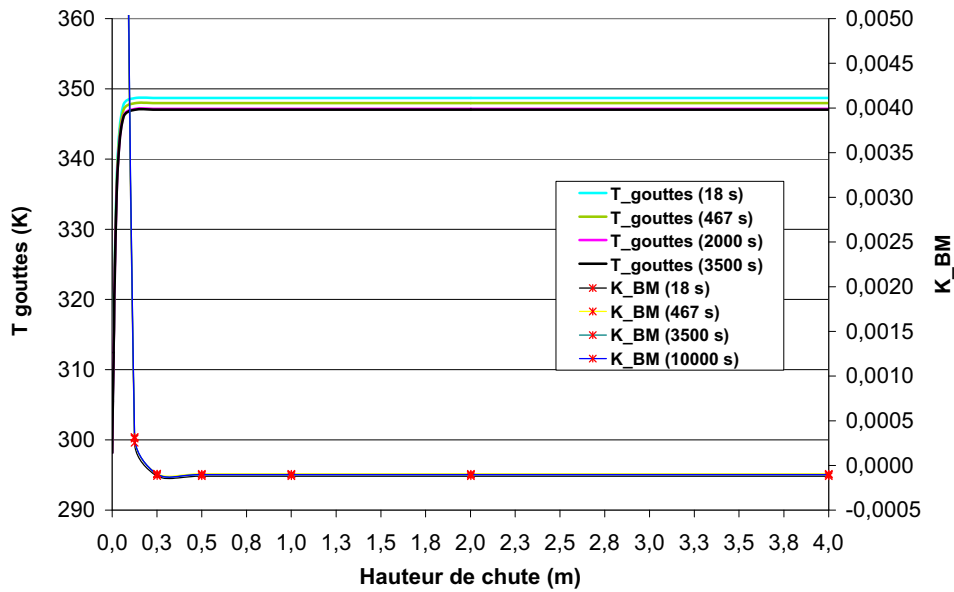


Fig. 2-4 Evolution de la température des gouttes et de leur coefficient de transfert de masse en fonction de la hauteur de chute

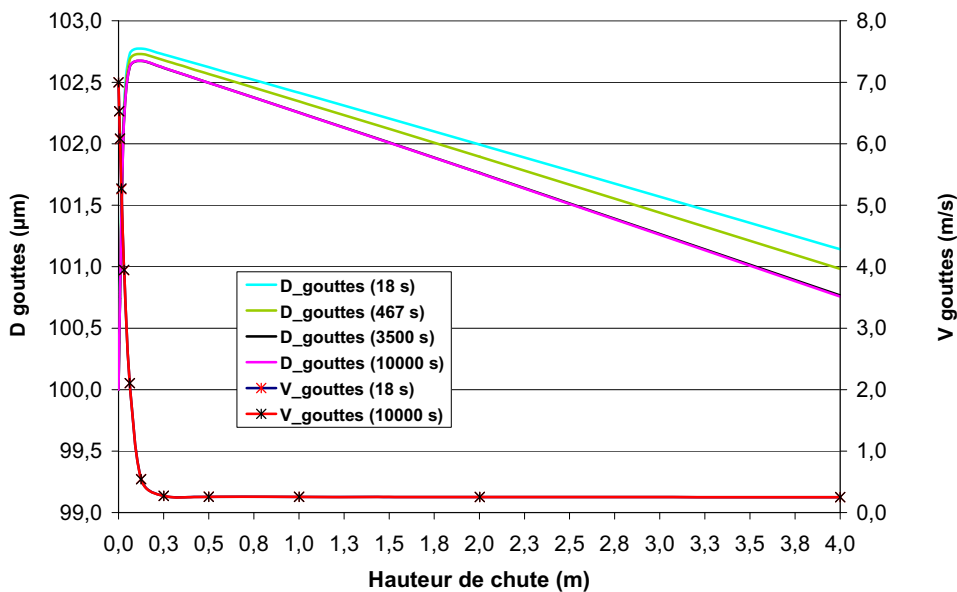


Fig. 2-5 Evolution du diamètre et de la vitesse des gouttes en fonction de la hauteur de chute

### 2.3.2. COMPORTEMENT DES AEROSOLS

Dans ce paragraphe, on se concentre sur le comportement des aérosols dans l'enceinte pendant l'aspersion. Premièrement, sont présentés les efficacités élémentaires de collecte de la goutte en fonction de la hauteur de chute et du temps, pour les différentes classes de taille des aérosols. Ensuite les évolutions temporelles des masses d'aérosol en suspension dans le gaz et déposées sur les parois sont analysées.

L'efficacité de collecte d'une goutte à une hauteur donnée est peu dépendante du temps dans notre configuration d'étude et on pourra la considérer constante au cours du temps. En revanche,

l'efficacité de collecte d'une goutte varie en fonction de la hauteur de chute de la goutte comme ceci est illustré par les figures suivantes.

Les Fig. 2-6 et Fig. 2-7 présentent les efficacités de collecte par effet mécanique diffusif et par effets mécaniques d'interception-impaction. On notera la diminution de l'efficacité de collecte au cours de la chute de la goutte pour chacun des mécanismes (sauf la diffusion) principalement lié à la relaxation de la gouttes qui atteint sa vitesse de chute terminale à une distance comprise entre 0,3 m et 0,5 m (Fig. 2-5). La faible valeur de la vitesse à tendance à écarter les ligne de courant de la goutte rendant l'efficacité de collecte par interception nulle une fois la vitesse terminale de la goutte atteinte. De plus, nous avons vu qu'il existait un diamètre critique en dessous duquel l'impaction est nulle (cf. §1.3.4.1). Ce diamètre critique augmente avec la hauteur de chute lié à la diminution de la vitesse des gouttes ainsi que de la faible diminution du diamètre des gouttes.

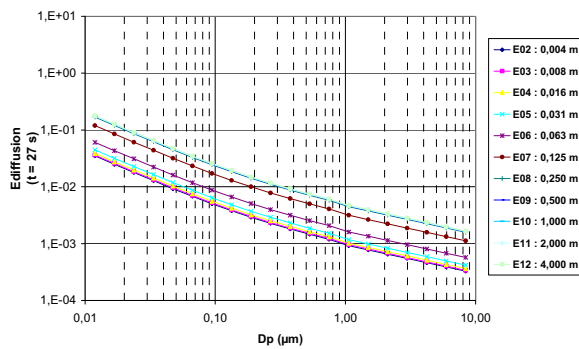


Fig. 2-6 Efficacité de collecte par mécanisme diffusif en fonction de la hauteur de chute des gouttes

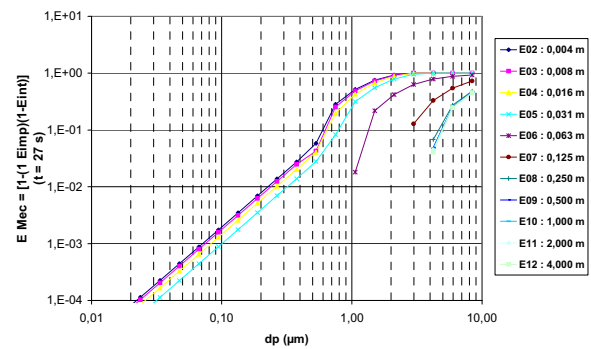


Fig. 2-7 Efficacité de collecte par mécanismes d'interception et d'impaction en fonction de la hauteur de chute des gouttes

La Fig. 2-8 présente la combinaison linéaire entre les effets diffusif et interception-impaction reliée par la formule suivante :

$$EMeca2 = 1 - (1 - EMec)(1 - Edif) \quad \text{Eq. (2.4)}$$

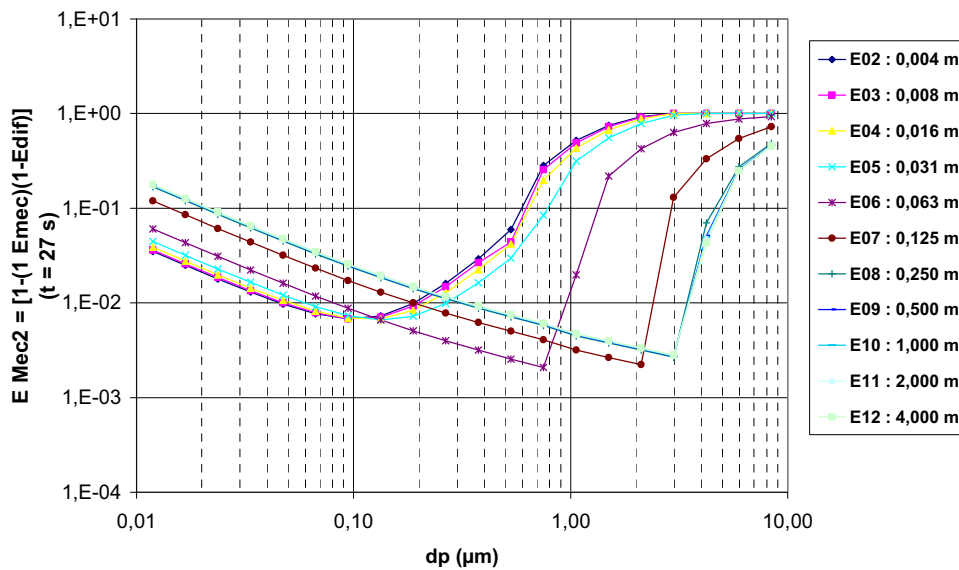


Fig. 2-8 Efficacité de collecte par tous les effets mécaniques en fonction de la hauteur de chute des gouttes

On notera, Fig. 2-9, que l'évolution spatiale des effets phorétiques est décroissante avec la hauteur de chute. L'efficacité de collecte par le mécanisme de diffusiophorèse et de thermophorèse deviennent nulles quand la vapeur ne se condense plus sur la goutte c'est à dire quand le coefficient de transfert de masse de la goutte et l'atmosphère environnant deviens négatif (Fig. 2-4 après 0,125 m).

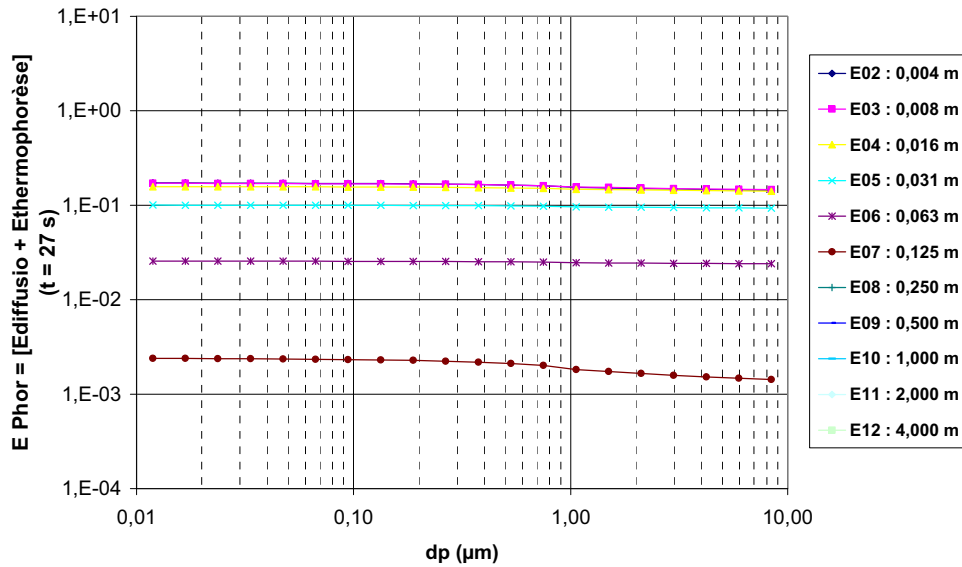


Fig. 2-9 Efficacité de collecte par effets phorétiques en fonction de la hauteur de chute des gouttes

A titre d'exemple, la contribution des différents mécanismes de collecte et l'efficacité totale calculés à une distance de 6 cm de la buse d'injection, sont représentés sur la Fig. 2-10. On notera l'influence des effets phorétiques sur le rabattement des aérosols dont le diamètre est inférieur à 0,8 µm.

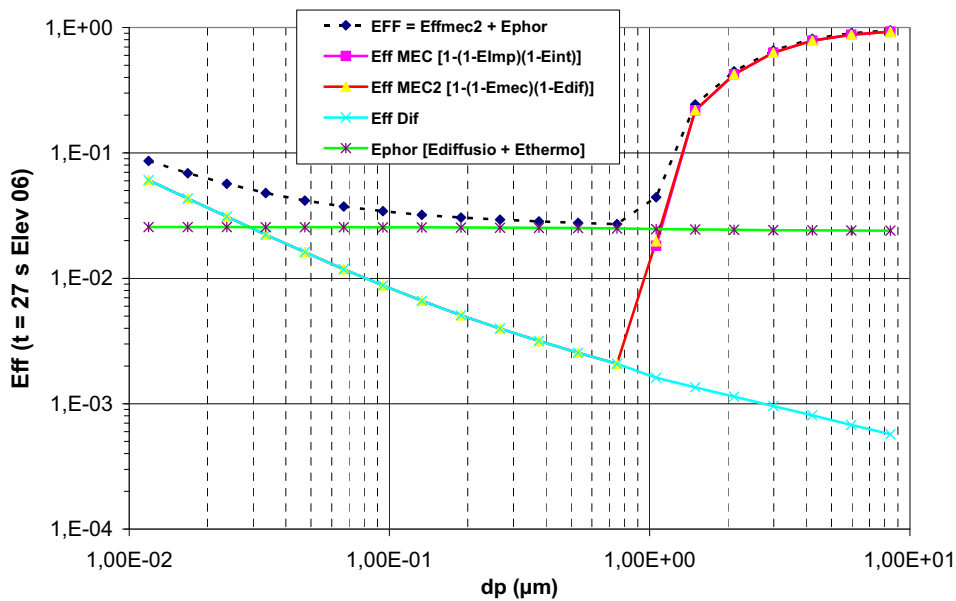


Fig. 2-10 Contribution des différents mécanismes de l'efficacité totale à la hauteur E06 = 0,063 m

Enfin, l'évolution de l'efficacité totale (*Eff*) de collecte d'une goutte en fonction de la hauteur de chute (Fig. 2-11) montre, qu'au fur et à mesure de la chute, le minimum d'efficacité tend à se décaler vers les aérosols de diamètre plus important. On peut remarquer sur la courbe Fig. 2-11, que pour les aérosols

de diamètre supérieur à 2  $\mu\text{m}$ , la combinaison linéaire des effets mécaniques de diffusion et d'interception-impaction et des effets phorétiques, implantée dans le module CPA, peut conduire à obtenir des efficacités supérieures à 1. Il faut tout de même signaler que cela n'influe que peu sur la masse d'aérosols en suspension, du fait du faible nombre d'aérosols concernés, et qui de plus, compte tenu de leur diamètre, sont rapidement collectés.

$$Eff = EMeca2 + Ephor \quad \text{Eq. (2.5)}$$

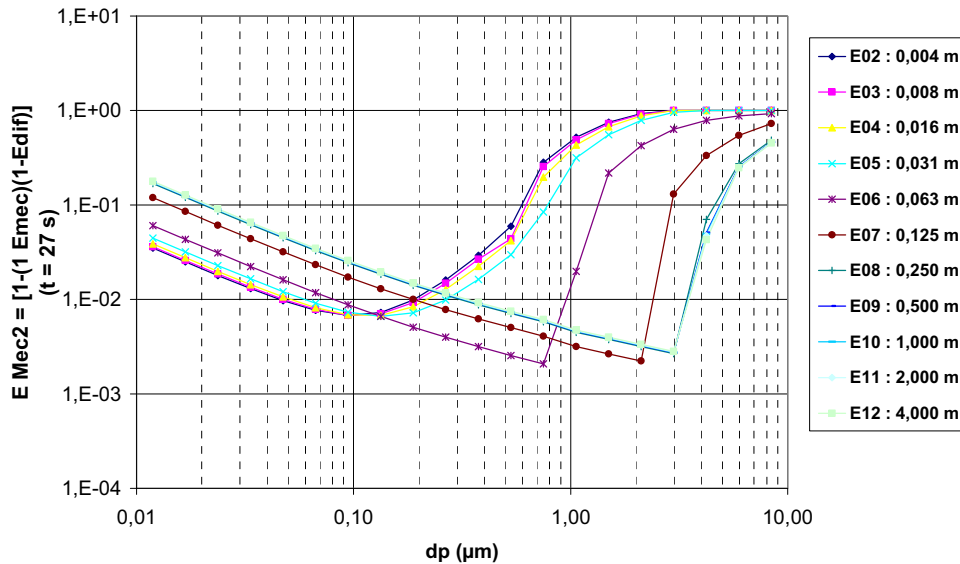


Fig. 2-11 Efficacité de collecte par effets mécaniques et par effets phorétiques en fonction de la hauteur de chute des gouttes

L'efficacité de collecte au cours de la chute des gouttes est présentée sur les Fig. 2-12 et Fig. 2-13 pour deux classes de taille d'aérosol [0,224 – 0,316  $\mu\text{m}$ ] et [3,548 – 5,012  $\mu\text{m}$ ], ceci pour chaque mécanisme. Cette comparaison permet de mettre en évidence la prépondérance de certains mécanismes de collecte après une distance de chute des gouttes de 0,5 m. Sur la Fig. 2-14 sont représentées les évolutions spatiales de l'efficacité de collecte totale, pour différentes classes de taille d'aérosol. Ces résultats montrent que, quelque soit la classe de taille d'aérosol considérée, l'efficacité totale est constante après une distance de chute égale à 0,5 m.

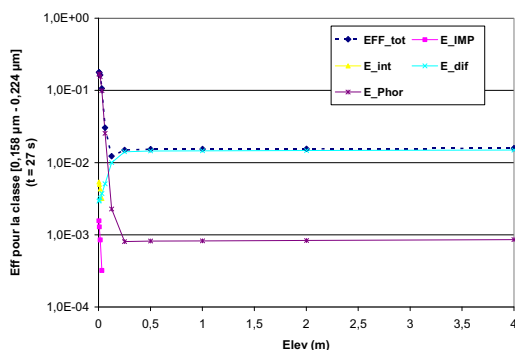


Fig. 2-12 Evolution spatiale des efficacités de collecte pour la classe de tailles d'aérosols DIAM 09

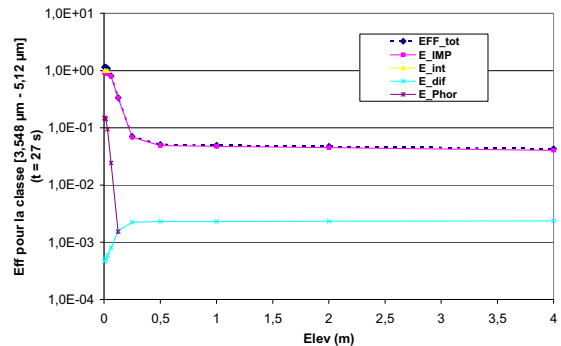
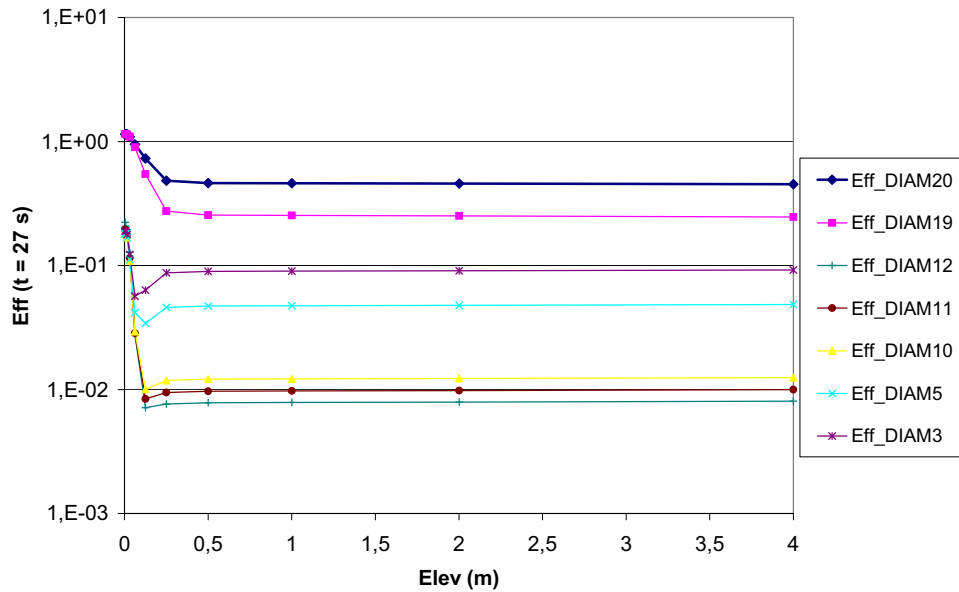
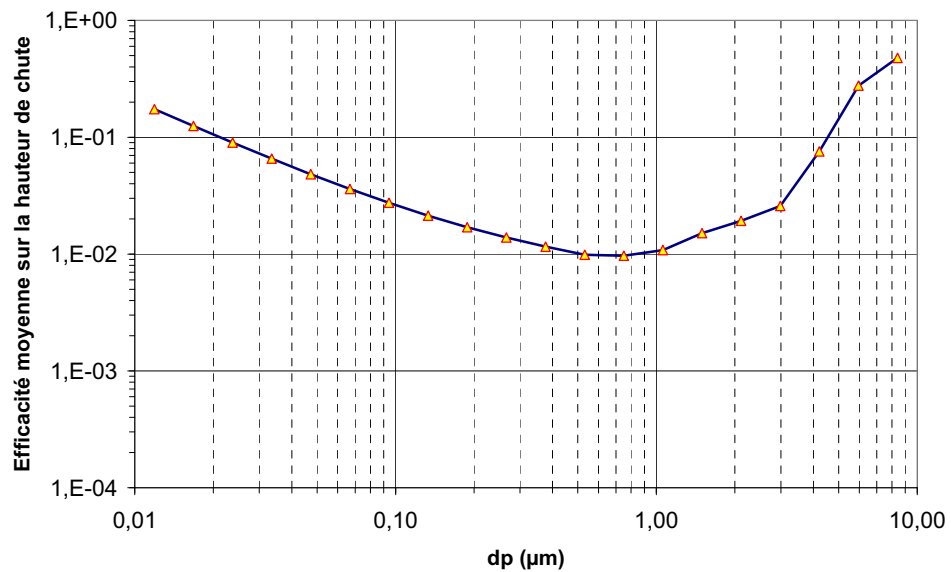


Fig. 2-13 Evolution spatiale des efficacités de collecte pour la classe de tailles d'aérosols DIAM 17



**Fig. 2-14 Evolutions spatiales de l'efficacité totale de collecte pour diverses classes de taille d'aérosol**

L'efficacité de collecte d'une goutte moyennée sur la hauteur totale de chute est présentée sur la Fig. 2-15. La valeur du minimum d'efficacité est obtenue pour des diamètres d'aérosols compris entre 0,6  $\mu\text{m}$  et 0,8  $\mu\text{m}$ . Signalons que ce minimum d'efficacité évolue peu au cours du temps.

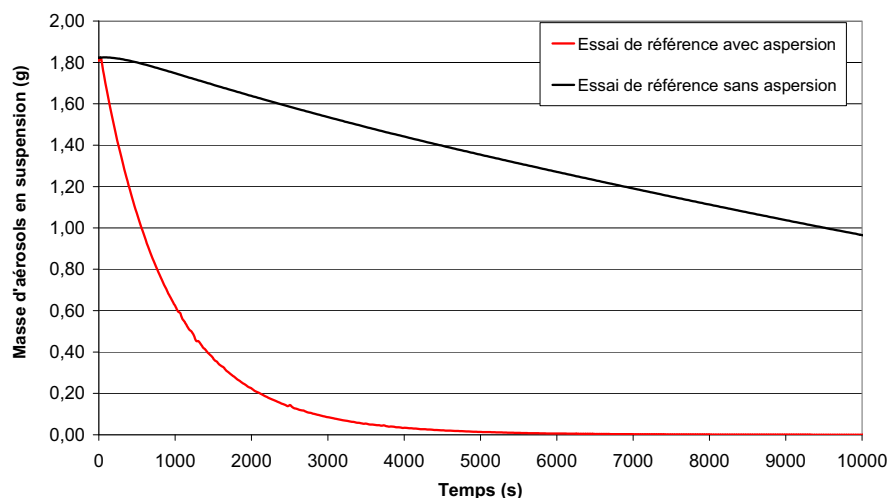


**Fig. 2-15 Efficacité de collecte moyennée sur la hauteur totale de chute**

Après avoir étudié les mécanismes élémentaires de collecte, nous allons présenter une comparaison des évolutions temporelles de la masse d'aérosols en suspension et de la masse d'aérosols déposée sur les différentes parois de l'enceinte pour un essai de référence (Fig. 2-16, Fig. 2-17, Fig. 2-18, Fig. 2-19 et Fig. 2-20). A titre de comparaison, le cas réalisé sans aspersion est présenté sur l'ensemble des figures (essai à même conditions thermohydrauliques mais sans déclenchement d'aspersion).

L'influence de l'aspersion sur le rabattement des aérosols et sur la diminution de la masse en suspension, visible Fig. 2-16, est indéniable. Elle permet une réduction de la masse de moitié ( $T_{\text{masse}1/2}$ ) en

600 s alors que pour l'essai de référence sans aspersion cette réduction de la masse de moitié n'est même pas atteinte en 7000 s.



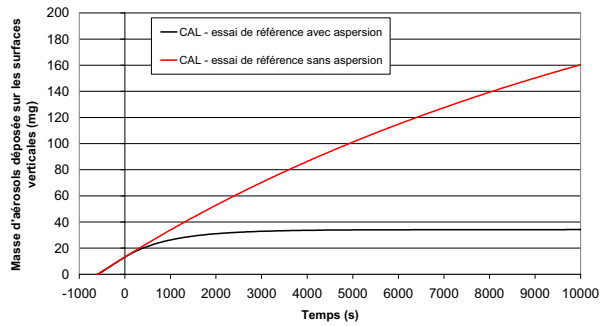
**Fig. 2-16 Evolutions temporelles des masses d'aérosols en suspension dans le gaz pour l'essai de référence avec et sans aspersion**

En revanche, on peut observer qu'à partir du moment où l'aspersion est déclenchée, le dépôt d'aérosols devient négligeable sur les parois verticales et sur les parois horizontales situées hors de la zone de couverture du spray (Fig. 2-20 et Fig. 2-18).

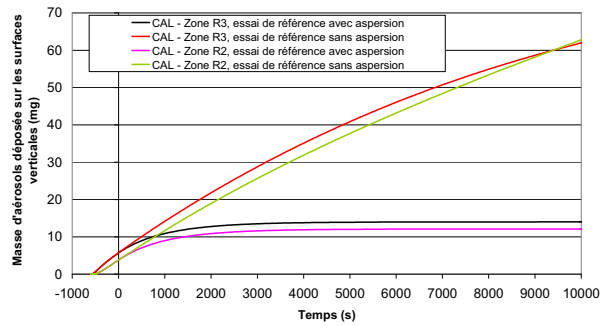
En effet, les temps caractéristiques liés au dépôt diffusif impliquant les petites classes d'aérosols dont le diamètre est inférieur à  $0,1 \mu\text{m}$ , et ceux liés à la sédimentation, sont bien supérieurs aux temps caractéristiques liés à la collecte des aérosols par les gouttes d'aspersion.

Concernant l'essai sans aspersion, le principal mécanisme impliqué dans la perte de masse des aérosols en suspension est lié à la sédimentation. En effet, à chaque pas de temps, sur la Fig. 2-19, on observe une différence de masse d'aérosols déposée entre les zones R2 et R3 (cf. Fig. 2-2) principalement du au fait que la zone R3 n'a pas de « support » pour les dépôts par sédimentation. Les dépôts se font uniquement par diffusion sur les parois verticales dans la zone R2 alors qu'au contraire, dans la zone R3, les mécanismes qui ont lieu sont les dépôts diffusifs sur les parois verticales et les dépôts par sédimentation sur les parois horizontales, ce qui augmente ainsi les dépôts massiques globaux.

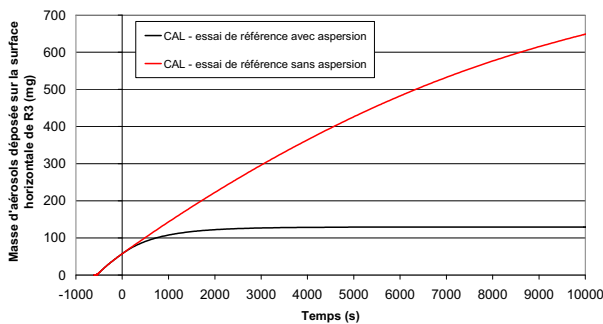




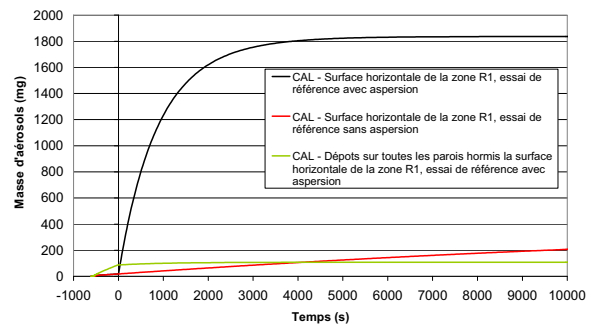
**Fig. 2-17 Evolutions temporelles des dépôts massiques totaux d'aérosols sur les surfaces verticales pour les essais de référence avec et sans aspersion**



**Fig. 2-19 Evolutions temporelles des dépôts massiques d'aérosols sur les surfaces verticales des zones R2 et R3 pour les essais de référence avec et sans aspersion**



**Fig. 2-18 Evolutions temporelles des dépôts massiques d'aérosols sur les surfaces horizontales de la zone R3 pour les essais de référence avec et sans aspersion**



**Fig. 2-20 Evolutions temporelles des dépôts massiques d'aérosols sur la surface horizontale de la zone R1 pour les essais de référence avec et sans aspersion**

La Fig. 2-20 présente les dépôts massiques d'aérosols sur la surface horizontale R1 (« symbolisant » le puisard). Dans le cas de l'essai avec aspersion, l'augmentation de ces dépôts sur la surface R1 traduit simplement le fait que les aérosols sont collectés par les gouttes qui impactent la surface horizontale du puisard et y déposent les aérosols.

Un bilan général des dépôts massiques d'aérosols permet de montrer que les pertes d'aérosols par dépôt (hors collecte des aérosols par les gouttes qui sont comptés sur la surface horizontale de R1) sont inférieures à 10 % au cours de l'aspersion pour nos essais.

Sur la Fig. 2-21 pour l'essai de référence avec aspersion, on observe que l'évolution temporelle du nombre d'aérosols dans le gaz, normé par le nombre d'aérosols initialement présent au déclenchement de l'aspersion, n'est pas la même pour chaque classe de taille d'aérosol. Comme cela a été illustré dans le chapitre précédent, cette différence provient du fait que les principaux mécanismes de collecte (cf. §2.3.2 et §1.3.4) dépendent du diamètre des aérosols. La décroissance est donc la plus lente pour les aérosols dont le diamètre est proche du minimum d'efficacité qui est de l'ordre de  $0,8 \mu\text{m}$  dans le cas présent.

Le diamètre critique pour le mécanisme d'impaction obtenu à l'aide de l'Eq. (1.29), est tracé sur la Fig. 2-22. Il varie en fonction de la hauteur de chute mais est peu dépendant du temps pour une hauteur de chute considérée. Pour des aérosols de diamètre inférieurs, l'efficacité de collecte par impaction est nulle.

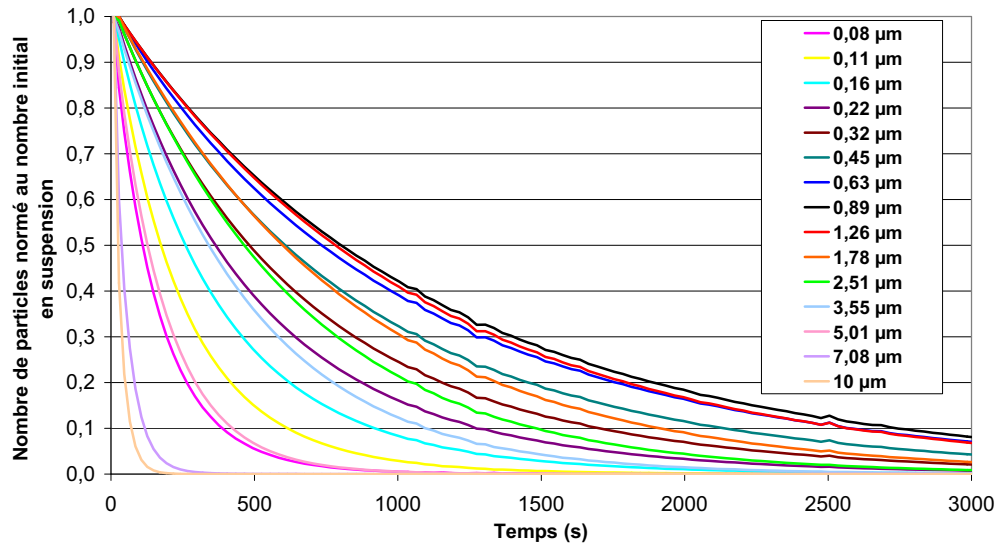


Fig. 2-21 Evolutions temporelles du nombre normé des aérosols dans le gaz

Pour les aérosols de diamètre supérieur à  $0,1 \mu\text{m}$ , l'intensité du mécanisme de collecte par diffusion brownienne est faible. Ainsi, entre  $0,1 \mu\text{m}$  et  $0,8 \mu\text{m}$ , le rabattement présente un minimum d'efficacité. Ce minimum est principalement lié à la faible efficacité de collecte par diffusiophorèse pour ces classes d'aérosols, et aussi lié au diamètre trop faible des aérosols de ces classes pour que les mécanismes de collecte par interception soient dominant comme cela a été présenté dans la bibliographie (cf. §1.3.4). Les aérosols dont le diamètre est compris entre  $0,6 \mu\text{m}$  et  $0,8 \mu\text{m}$  sont les aérosols les plus difficiles à rabattre par notre système d'aspersion. Quant aux aérosols dont le diamètre est supérieur à  $5 \mu\text{m}$ , ils sont rapidement collectés par impaction inertielle, diminuant ainsi efficacement la masse en suspension dans le gaz dans les premières centaines de seconde précédant le déclenchement de l'aspersion.

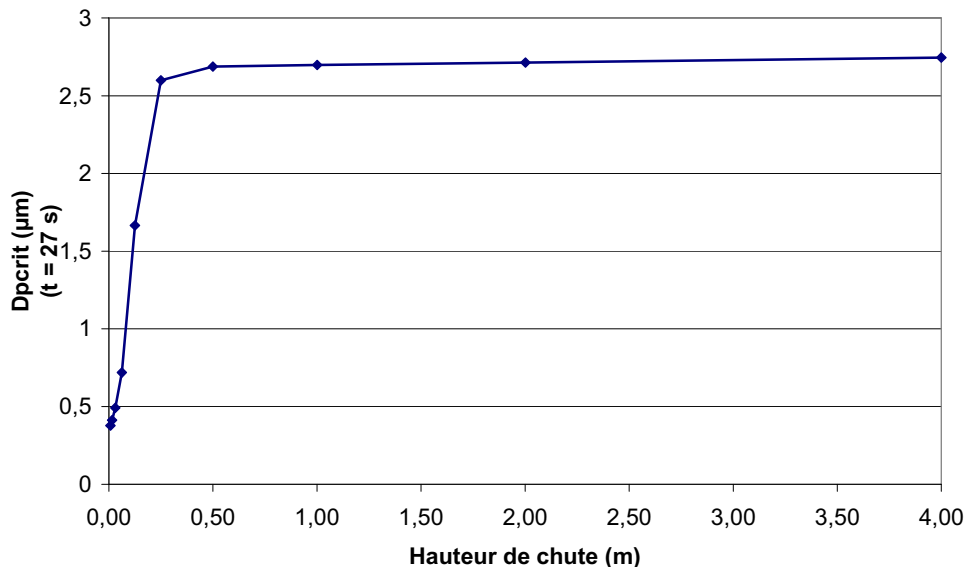


Fig. 2-22 Evolution spatiale du diamètre critique des aérosols liée à l'impaction

Après avoir décrit un essai de référence, il convient d'étudier les paramètres pouvant influencer le rabattement des aérosols par l'aspersion afin de définir la grille d'essais expérimentale permettant d'étudier de façon semi-analytique la collecte des aérosols par les gouttes d'eau.

## 2.4. ETUDES DE SENSIBILITE

Dans ce paragraphe, l'étude des divers paramètres est réalisée à travers une étude de sensibilité permettant de définir la grille d'essais à réaliser dans TOSQAN. Pour être dans une configuration la plus analytique possible permettant de limiter le couplage des différents mécanismes impliqués dans le rabattement des aérosols, la géométrie du spray a été choisie pour qu'il n'y ait pas d'impaction des gouttes d'eau d'aspersion sur les parois verticales de l'enceinte TOSQAN. Seules les parois du puisard sont impactées par les gouttes comme nous l'avons vu précédemment. Dans la suite de l'étude, ce choix permettra ainsi de pouvoir faire l'hypothèse que la masse d'aérosols présente dans l'eau évacuée en sortie de puisard correspond à la seule masse des aérosols collectée par les gouttes d'aspersion au cours de leur chute dans l'enceinte après en avoir déduit la masse d'aérosols initialement déposée sur cette surface.

### 2.4.1. INFLUENCE DES CARACTERISTIQUES THERMOHYDRAULIQUES INITIALES

#### 2.4.1.1. Température gaz

Ce paragraphe présente l'influence de la température moyenne initiale du gaz dans l'enceinte sur le rabattement des aérosols. Pour les trois cas d'étude considérés, le taux de saturation initial du mélange gazeux dans l'enceinte est identique. Les conditions du calcul sont résumées dans le Tableau 2-3 :

**Tableau 2-3 Conditions de la simulation : test de la température initiale du gaz**

Thermohydrauliques			Aspersion			Aérosols		
$P_{abs}$ (bar)	$T_{gaz}$ (K)	s	$Q_{asp}$ (g/s)	$T_{asp,inj}$ (K)	$d_{goutte,inj}$ ( $\mu m$ )	Section du spray ( $m^2$ )	$m_{aerosols,init}$ (g)	DMM ( $\mu m$ )
1,5	$T_{paroi}$	0,57	10	298	100	0,37	2	1 ( $\sigma = 1,5$ )

La température des parois de l'enceinte ( $T_{paroi}$ ) prend successivement la valeur de 80 °C, 90 °C ou 110 °C. Les évolutions temporelles de la masse d'aérosols en suspension sont présentées sur la Fig. 2-23.

L'évolution de la masse d'aérosols en suspension dans le gaz est similaire pour des températures de paroi imposées fixées à 80 °C ou 90 °C. En revanche, pour la température fixée à 110 °C, on observe que la décroissance de la masse d'aérosols en suspension est légèrement plus rapide. Ceci est lié à l'augmentation du diamètre des gouttes (Fig. 2-25) qui a pour conséquence une augmentation des efficacités de collecte liées aux mécanismes d'interception et d'impaction (Grist, 1982). La différence de masse déposée sur les parois (hors surface horizontale de R1 - Fig. 2-24) est simplement liée à la diminution plus rapide de la masse en suspension au cours temps pour une température initiale de 110 °C.

En revanche la différence de masse déposée pour les simulations réalisées avec une température initiale du gaz de 80 °C et 90 °C est nettement plus importante. Lors des essais expérimentaux, la température sera donc imposée aux parois à 90 °C.

En étudiant les courbes d'efficacité de collecte définies par Powers et Burson (1993a) et Devouton (1995) pour des gouttes de tailles similaires à celles de notre essai de référence, ainsi que les résultats présentés sur la Fig. 2-21, on a fait le choix de réaliser l'analyse qui suit en ne considérant que quatre classes de diamètre d'aérosols définies, de part et d'autre de la classe où l'efficacité de collecte est la plus faible. Il s'agit donc des classes de diamètre bornées (maximum) par 0,32  $\mu m$ , 0,63  $\mu m$ , 1,26  $\mu m$  et

2,51  $\mu\text{m}$  (Tableau 2-2). Quelle que soit la température imposée aux parois, l'efficacité est minimum pour les aérosols dont le diamètre est compris entre à 0,63  $\mu\text{m}$  et 0,89  $\mu\text{m}$ .

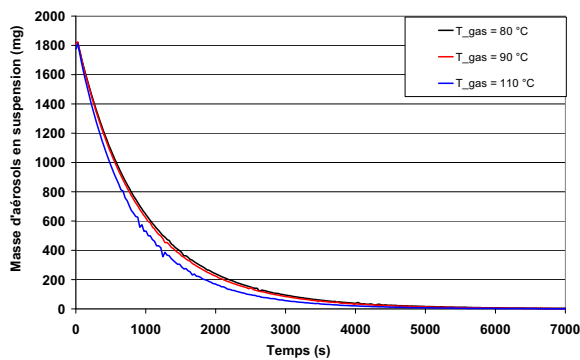


Fig. 2-23 Evolutions temporelles des masses en suspension dans TOSQAN en fonction de la température moyenne initiale du mélange gazeux

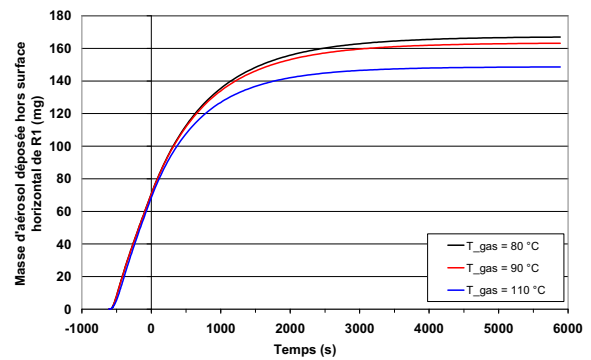


Fig. 2-24 Evolutions temporelles des masses déposées sur les parois (hors surface de R1) dans TOSQAN en fonction de la température moyenne initiale du mélange gazeux

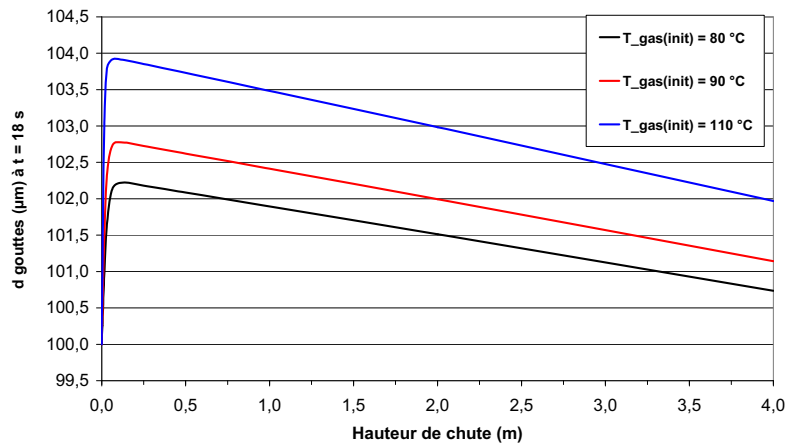


Fig. 2-25 Evolutions du diamètre des gouttes au cours de la chute dans TOSQAN en fonction de la température moyenne initiale du mélange gazeux

On peut constater sur les résultats présentés sur la Fig. 2-26, que l'influence de la température du gaz n'est visible que sur les aérosols dont le diamètre est supérieur à 1,26  $\mu\text{m}$  où le rabattement est gouverné par les mécanismes de collecte par interception et par impaction liés à l'évolution du diamètre des gouttes elle-même en fonction de la température initiale du gaz (Fig. 2-25).

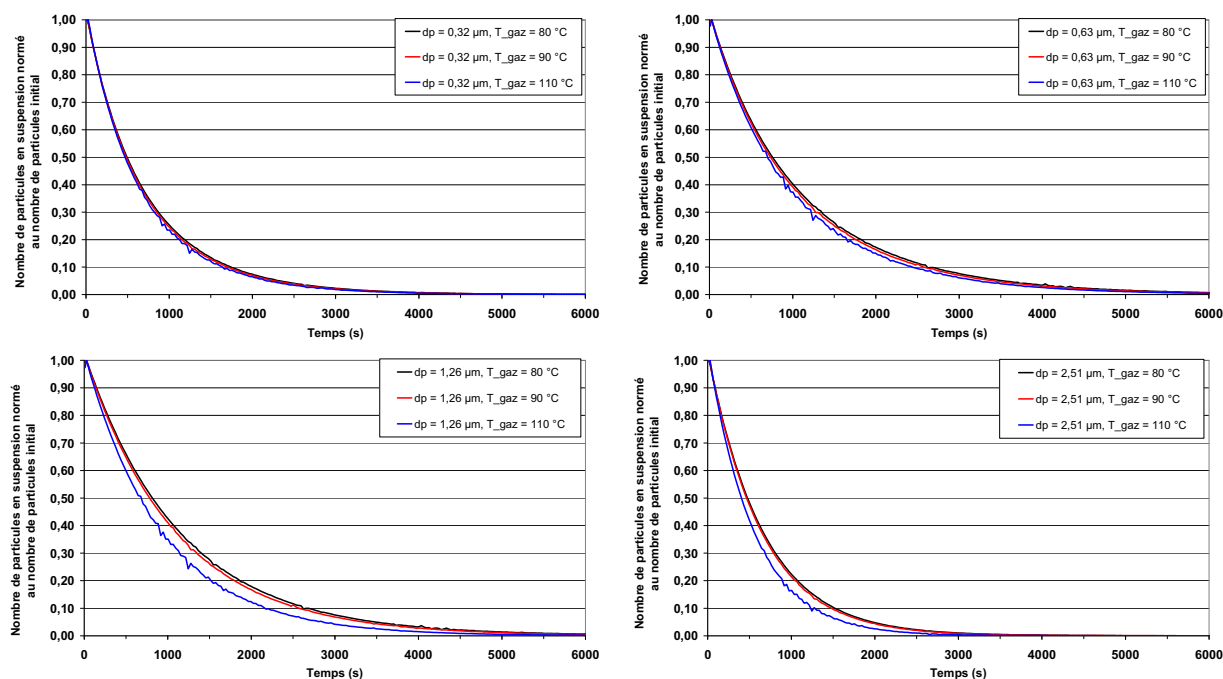


Fig. 2-26 Evolutions temporelles du nombre normé des aérosols dans le gaz pour différents diamètres en fonction de la température moyenne initiale des parois

#### 2.4.1.2. Saturation (pression air et vapeur)

Ce paragraphe présente l'influence de la saturation initiale du gaz sur le rabattement des aérosols, les autres paramètres restant fixes. Les conditions du calcul sont résumées dans le Tableau 2-4 :

Tableau 2-4 Conditions de la simulation : test de la saturation

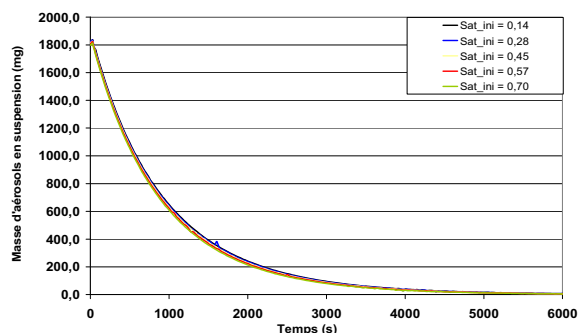
Thermohydrauliques			Aspersion				Aérosols	
P <sub>abs</sub> (bar)	T <sub>gaz</sub> (K)	s	Q <sub>asp</sub> (g/s)	T <sub>asp,inj</sub> (K)	d <sub>goutte,inj</sub> (µm)	Section du spray (m <sup>2</sup> )	m <sub>aérosols,init</sub> (g)	DMM (µm)
1,5	363	<i>sat<sub>init</sub></i>	10	298	100	0,37	2	1 (σ = 1,5)

La saturation initiale varie dans la proportion indiquée sur le Tableau 2-5 suivant :

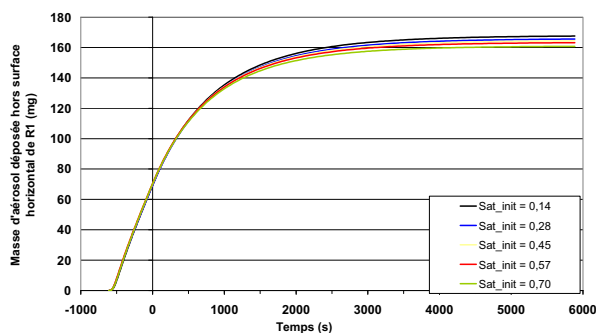
Tableau 2-5 Condition de saturation pour l'étude de sensibilité

Saturation	P <sub>vap</sub>	P' <sub>air</sub>
0,14	0,1	0,4
0,28	0,2	0,3
0,44	0,31	0,19
0,57	0,4	0,1
0,71	0,5	0

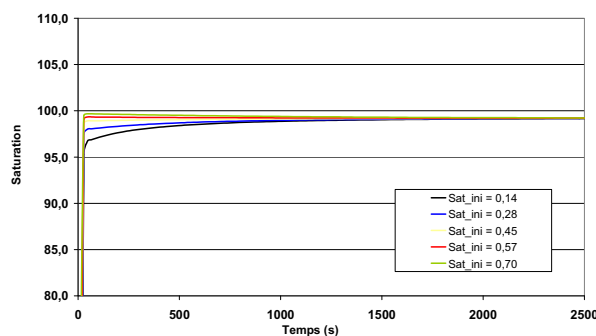
A partir des résultats présentés sur la Fig. 2-27 on observe peu d'influence de la variation du taux de saturation initial (variant entre 0,14 et 0,71), sur le rabattement des aérosols. Les masses d'aérosols en suspension dans le gaz sont proches (à 1 % près) quelle que soit la saturation. L'influence de la saturation initiale sur le dépôt d'aérosols sur les parois verticales est inférieure à 1 % (Fig. 2-28). Ceci peut s'expliquer par le fait que le gaz est très rapidement saturé (saturation supérieur à 95 % quasi immédiatement dans les premier pas de temps), comme le montre (Fig. 2-29).



**Fig. 2-27 Evolutions temporelles des masses d'aérosols en suspension dans TOSQAN en fonction de la saturation initiale du mélange gazeux**



**Fig. 2-28 Evolutions temporelles des masses d'aérosols déposées sur les parois (hors surface de R1) en fonction de la saturation initiale du mélange gazeux**



**Fig. 2-29 Evolutions temporelles de la saturation du gaz dans TOSQAN en fonction de la saturation initiale du mélange gazeux**

Quelle que soit la saturation initiale, la classe de diamètre d'aérosols la plus difficile à rabattre dans ces conditions est celle de comprise entre  $0,63 \mu\text{m}$  à  $0,80 \mu\text{m}$  (idem Fig. 2-21).

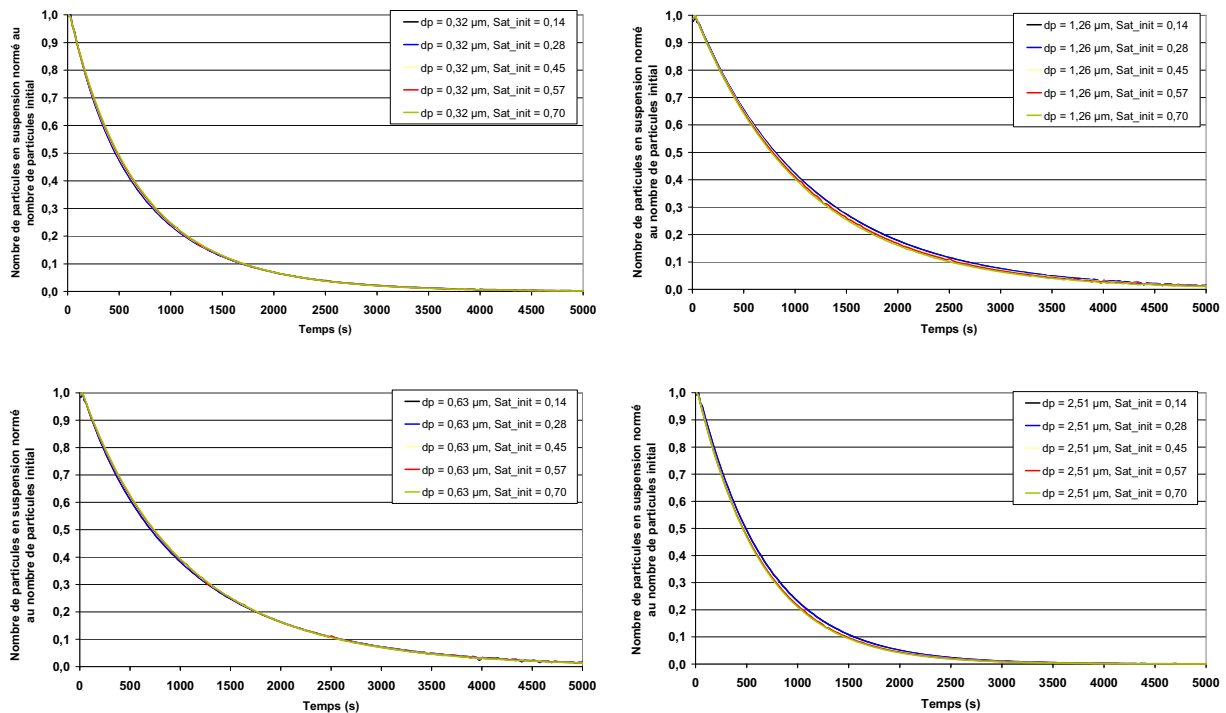


Fig. 2-30 Evolutions temporelles du nombre normé des aérosols dans le gaz pour différents diamètres en fonction de la saturation

Les légères variations de la saturation initiale des essais réalisés dans TOSQAN ne devraient pas modifier les résultats sur le rabattement des aérosols par l'aspersion de façon significative. Les conditions de l'essai de référence servent de base pour la suite.

## 2.4.2. INFLUENCE DES CARACTERISTIQUES DE L'ASPERSION

### 2.4.2.1. Température des gouttes

Ce paragraphe présente l'influence de la température d'injection des gouttes d'aspersion sur le rabattement des aérosols en gardant les autres paramètres fixés (Tableau 2-6). Ceci permet d'étudier principalement les conséquences de la variation des effets phorétiques sur le rabattement des aérosols par l'aspersion. En effet minimiser la différence de température entre le gaz et les gouttes permet de diminuer les effets phorétiques et donc, relativement, de maximiser les effets mécaniques.

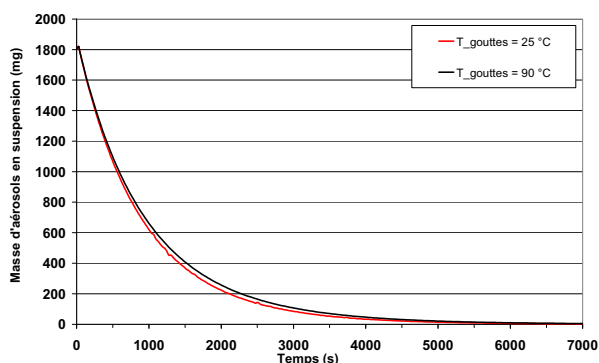
Tableau 2-6 Conditions de la simulation : test de la température d'injection des gouttes d'aspersion

Thermohydrauliques			Aspersion			Aérosols		
$P_{abs}$ (bar)	$T_{gaz}$ (K)	s	$Q_{asp}$ (g/s)	$T_{asp, inj}$ (K)	$d_{goutte, inj}$ ( $\mu m$ )	Section du spray ( $m^2$ )	$m_{aerosols, init}$ (g)	DMM ( $\mu m$ )
1,5	363	0,57	10	$T_{asp, inj}$	100	0,37	2	1 ( $\sigma = 1,5$ )

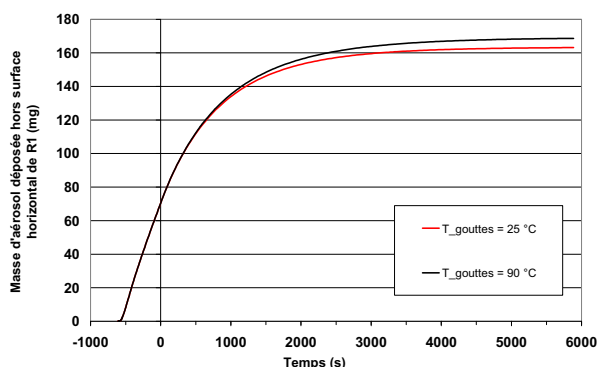
Dans un REP, la température d'injection maximale de l'eau d'aspersion peut atteindre temporairement 100 °C au début de l'aspersion en mode recirculation (EDF, 2005) et, en cas de perte de fonctionnement de l'échangeur thermique du circuit d'aspersion, celle-ci peut se stabiliser autour de

90 °C. Dans notre cas d'étude, la température d'injection des gouttes d'aspersion  $T_{asp,inj}$  prend successivement la valeur de 25 °C ou 90 °C. Cette dernière permet de minimiser les effets phorétiques en ayant une température d'injection des gouttes proche de la température initiale du gaz.

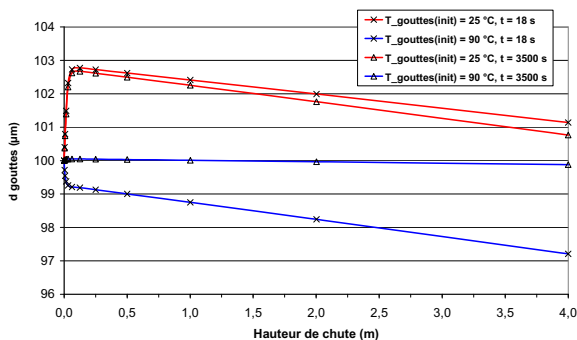
On observe sur la Fig. 2-31, que l'efficacité de rabatement de l'aspersion est légèrement supérieure avec des gouttes injectées à une température de 25 °C par rapport à une température de 90°C. Pour une température d'injection égale à 90 °C, les gouttes sont dans un régime d'évaporation ( $Q_M < 0$  - Fig. 2-34) ce qui engendre localement autour des gouttes un gradient de vapeur « centrifuge » limitant la collecte des aérosols par le mécanisme de diffusiophorèse par rapport à l'essai réalisé avec une température d'injection égale à 25 °C (condensation de la vapeur d'eau, gradient de vapeur « centripète »). Quant aux effets mécaniques, ils sont quasi identiques dans les deux cas étant donné la faible variation du diamètre des gouttes liée à la modification de la température d'injection (< 4 %) comme le montre la Fig. 2-33.



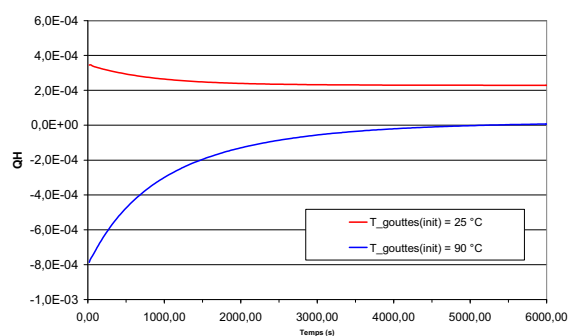
**Fig. 2-31 Evolutions temporelles des masses d'aérosols en suspension dans TOSQAN en fonction de la température initiale des gouttes d'aspersion**



**Fig. 2-32 Evolutions temporelles des masses d'aérosols déposées sur les parois dans TOSQAN en fonction de la température initiale des gouttes d'aspersion**



**Fig. 2-33 Evolutions du diamètre des gouttes en fonction de la hauteur de chute dans TOSQAN pour différentes températures d'injection et à différents temps**



**Fig. 2-34 Evolutions temporelles du débit massique de vapeur du spray dans TOSQAN en fonction de la température initiale des gouttes d'aspersion**

Comme le montrent les résultats présentés sur la Fig. 2-35, la différence de température d'injection des gouttes n'a pas d'influence pour des aérosols de diamètre inférieur à 0,11 µm. En effet, le mécanisme de collecte dominant est lié aux effets diffusifs (cf. §1.3.4.1) qui sont indépendants de la température des gouttes. De plus, comme le diamètre des gouttes varie peu en fonction de la température d'injection de l'aspersion (Fig. 2-33), l'efficacité liée aux effets diffusifs est similaire pour les deux cas considérés. Pour des aérosols de diamètre supérieurs à 2,5 µm, les principaux mécanismes de collecte, qui sont l'interception et l'impaction, sont indépendants de la température d'injection des gouttes



(cf. §1.3.4.1). On peut donc conclure que les effets mécaniques restent quasi invariants en modifiant uniquement la température d'injection des gouttes pour nos conditions thermohydrauliques. Enfin, pour des aérosols de diamètre compris entre 0,11  $\mu\text{m}$  et 2,5  $\mu\text{m}$ , nous avons noté que le principal mécanisme de collecte des aérosols est la diffusiophorèse dont l'intensité est fonction de la différence de température entre le gaz et les gouttes.

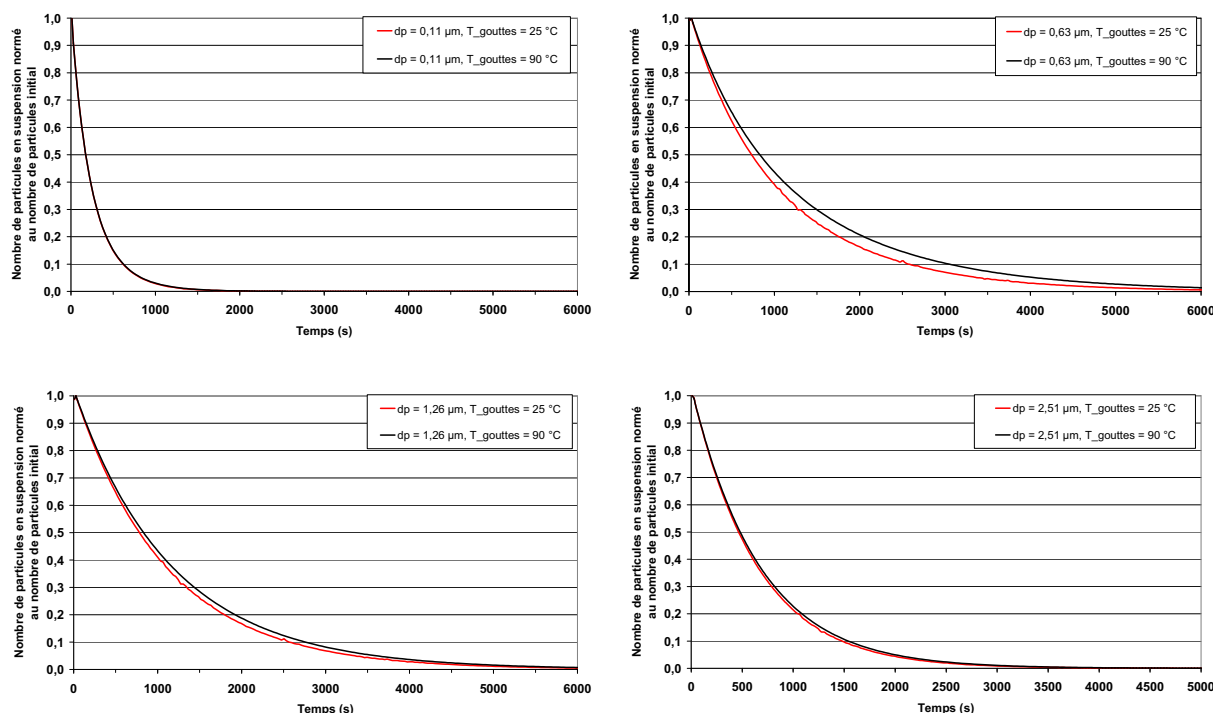


Fig. 2-35 Evolutions temporelles du nombre normé des aérosols dans le gaz en fonction de la température initiale des gouttes d'aspersion

L'efficacité du spray est la moins forte pour les aérosols dont le diamètre est proche de 0,8  $\mu\text{m}$  tout comme les essais précédents. Quelque soit la température d'injection des gouttes, l'efficacité moyenne de collecte sur la hauteur de chute est quasi identique. Ceci est dû au fait que les effets phorétiques, principalement diffusiophorèse, interviennent sur les premiers centimètres de chute le temps de la relaxation de la goutte.

#### 2.4.2.2. Débit d'aspersion

Ce paragraphe présente l'influence du débit d'aspersion sur le rabattement des aérosols en gardant les autres paramètres fixes et résumés dans le Tableau 2-7 :

Tableau 2-7 Conditions de la simulation : test du débit d'aspersion

Thermohydrauliques			Aspersion			Aérosols		
$P_{\text{abs}}$ (bar)	$T_{\text{gaz}}$ (K)	s	$Q_{\text{asp}}$ (g/s)	$T_{\text{asp, inj}}$ (K)	$d_{\text{goutte, inj}}$ ( $\mu\text{m}$ )	Section du spray ( $\text{m}^2$ )	$m_{\text{aérosols, init}}$ (g)	DMM ( $\mu\text{m}$ )
1,5	363	0,57	$Q_{\text{asp}}$	298	100	0,37	2	1 ( $\sigma = 1,5$ )

Le débit  $Q_{\text{aspj}}$  prend successivement la valeur de 5 g/s, 10 g/s, 20 g/s ou 30 g/s avec une vitesse d'injection des gouttes et une surface de spray conservées. La variation du débit d'aspersion influe donc

uniquement sur la densité de gouttes injectée qui sont mono dispersées, ( $nb_{goutte}$  - Eq. (2.6)), et sur la surface d'échange entre les gouttes et le gaz ensemencé en aérosols ( $D_{surface}$  - Eq. (2.7)).

$$nb_{goutte} = \frac{Q_{asp}}{\left(\rho_{eau} \frac{4}{3} \pi r_{goutte}^3\right)} \left[s^{-1}\right] \quad \text{Eq. (2.6)}$$

$$D_{surface} = \frac{Q_{asp}}{\left(\rho_{eau} \frac{4}{3} \pi r_{goutte}^3\right)} \times 4 \pi r_{goutte}^2 = \frac{3Q_{asp}}{\rho_{eau} r_{goutte}} \left[m^2 \cdot s^{-1}\right] \quad \text{Eq. (2.7)}$$

$Q_{asp}$ [g.s <sup>-1</sup> ]	$nb_{goutte}$ [s <sup>-1</sup> ]	$D_{surface}$ [m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
5	9,55.10 <sup>6</sup>	0,15
10	1,91.10 <sup>7</sup>	0,30
20	3,82.10 <sup>7</sup>	0,6
30	5,73.10 <sup>7</sup>	0,9

Dans ces conditions, compte tenu du fait que le module CPA est un code 0D compartimenté, la modification du débit d'aspersion n'influence pas directement l'efficacité élémentaire de collecte des gouttes de façon significative sauf à travers les modifications des conditions thermohydrauliques, (diminution de la température du gaz et de la pression dans l'enceinte) qui évoluent plus rapidement à fort débit.

L'influence du débit d'aspersion est non négligeable sur le rabattement des aérosols comme on peut le constater sur la Fig. 2-36. En effet, l'augmentation du débit d'aspersion à diamètre de gouttes constant, implique que le nombre de gouttes et donc la surface de collecte augmentent dans les mêmes proportions (Eq. (2.6) - Eq. (2.7)), favorisant ainsi la collecte des aérosols. Sur la Fig. 2-37, on peut constater que la variation du dépôt de la masse d'aérosols sur les parois est due au fait que la masse d'aérosols en suspension diminue plus rapidement en augmentant le débit d'aspersion ce qui réduit statistiquement, le nombre d'aérosols pouvant se déposer sur les parois. En supposant que la variation du diamètre des gouttes au cours de leur chute reste faible, on peut conclure, comme le montre Fig. 2-38, que le rabattement est directement lié à la surface de collecte offerte par les gouttes et donc la densité de gouttes. La variation de la densité des gouttes ne modifie donc pas la contribution des différents mécanismes de collecte. Ce faible écart est du au fait que la masse déposée est plus importante pour les faibles débits.

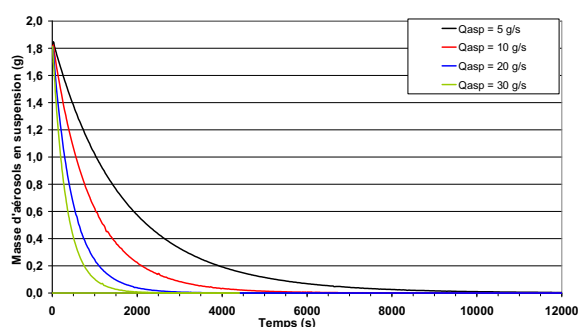


Fig. 2-36 Evolutions temporelles des masses d'aérosols en suspension dans TOSQAN en fonction du débit d'aspersion

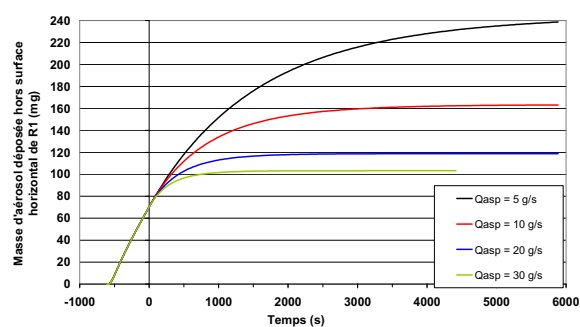


Fig. 2-37 Evolutions temporelles des masses d'aérosols déposées sur les parois dans TOSQAN en fonction du débit d'aspersion

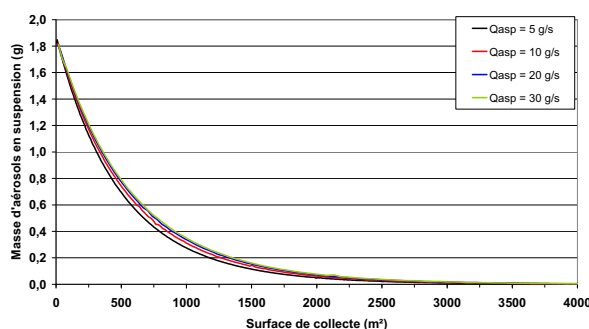


Fig. 2-38 Evolutions temporelles des masses d'aérosols en suspension dans TOSQAN en fonction de la surface de collecte pour différents débits d'aspersion

Comme le montre la Fig. 2-39, les évolutions temporelles du nombre normé des aérosols dans le gaz en fonction du débit d'aspersion suivent les mêmes tendances que celles observées pour la masse en suspension puisque les efficacités de collecte élémentaires sont indépendantes de la surface de collecte ; plus le débit (et donc la surface de collecte) augmente, plus les aérosols sont rabattus rapidement et cela quel que soit leur diamètre.

Le spray présente la même tendance de la plus faible efficacité pour la même classe de diamètre des aérosols que les essais précédents.

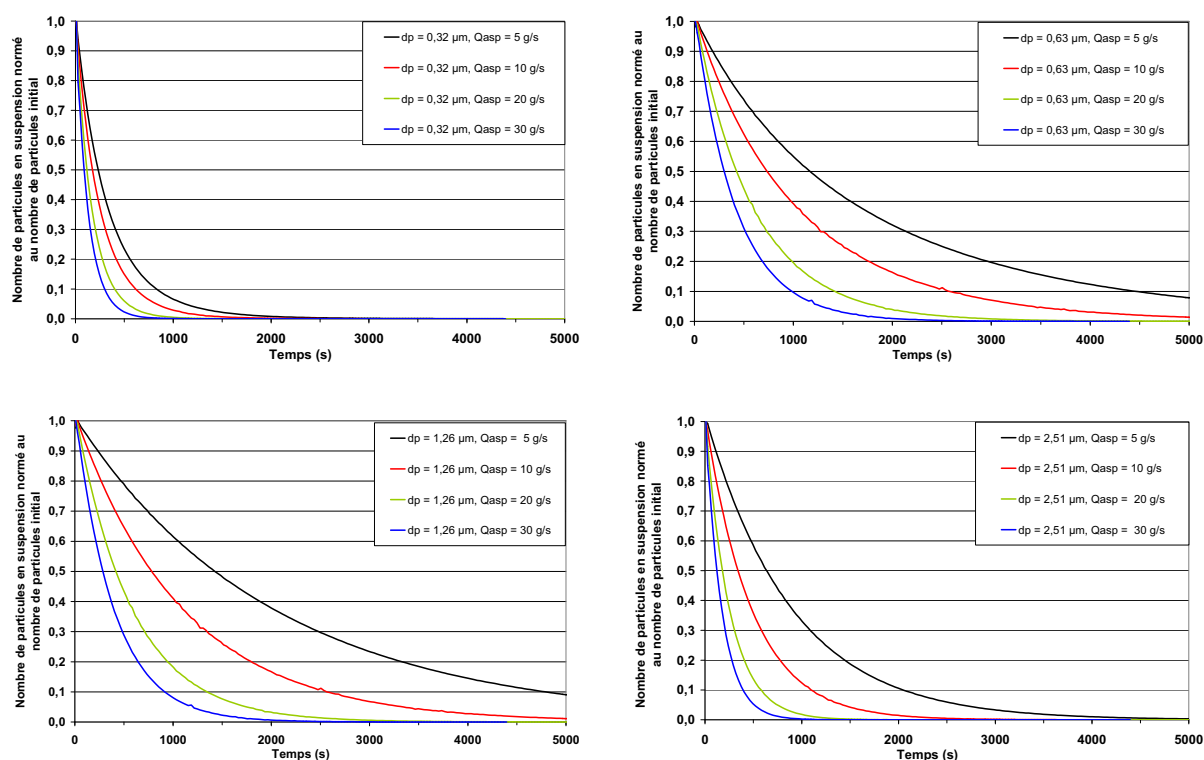


Fig. 2-39 Evolutions du nombre normé des aérosols en suspension dans le gaz en fonction des débits d'aspersion

#### 2.4.2.3. Vitesse d'injection des gouttes

Nous avons vu dans la partie bibliographique que la vitesse des gouttes influence l'efficacité élémentaire de collecte des gouttes principalement par les effets mécaniques liés à l'impaction. Ce

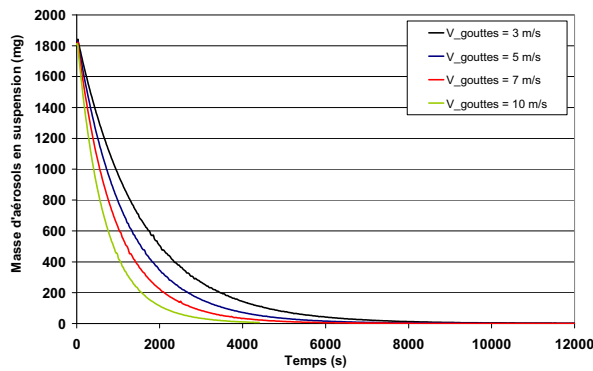
paragraphe présente l'influence de la vitesse initiale des gouttes d'aspersion sur le rabattement des aérosols en gardant les autres paramètres fixes et résumés dans le Tableau 2-8 :

**Tableau 2-8 Conditions de la simulation : test de la vitesse d'injection des gouttes d'aspersion**

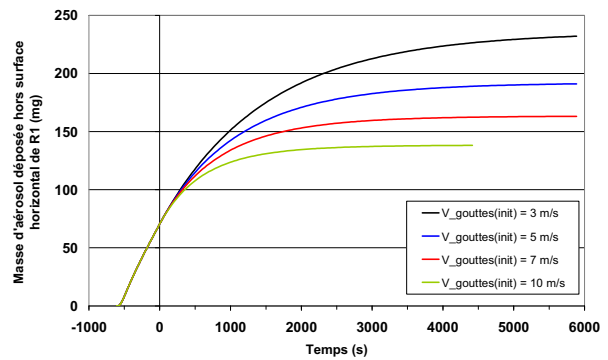
Thermohydrauliques			Aspersion			Aérosols		
P <sub>abs</sub> (bar)	T <sub>gaz</sub> (K)	s	Q <sub>asp</sub> (g/s)	T <sub>asp,inj</sub> (K)	d <sub>goutte,inj</sub> (μm)	Section du spray (m <sup>2</sup> )	m <sub>aérosols,init</sub> (g)	DMM (μm)
1,5	363	0,57	10	298	100	0,37	2	1 (σ = 1,5)

La vitesse d'injection des gouttes prend successivement la valeur de 3 m/s, 5 m/s, 7 m/s ou 10 m/s.

On constate sur la Fig. 2-40 que l'augmentation de la vitesse d'injection des gouttes accélère la cinétique de rabattement de la masse d'aérosols en suspension et diminue les dépôts sur les parois (Fig. 2-41).

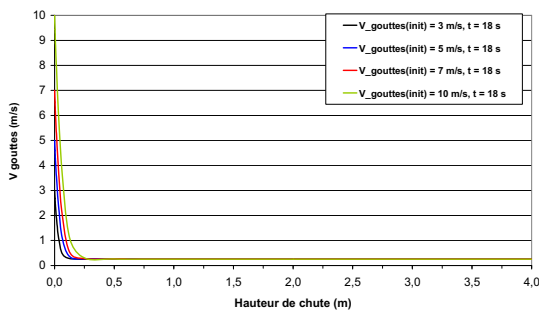


**Fig. 2-40 Evolutions temporelles des masses d'aérosols en suspension dans TOSQAN en fonction de la vitesse d'injection des gouttes d'aspersion**

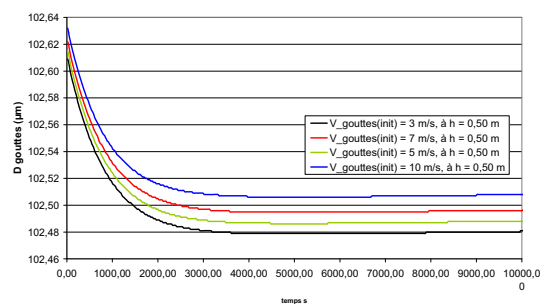


**Fig. 2-41 Evolutions temporelles des masses d'aérosols déposées sur les parois dans TOSQAN en fonction de la vitesse d'injection des gouttes d'aspersion**

A une distance de 0,5 m de l'injection, les gouttes ont atteint leur vitesse terminale de chute et la différence de diamètres des gouttes calculée est inférieure à 2 % (Fig. 2-43) Ceci implique que les effets mécaniques seront identiques dans TOSQAN après 0,5 m de chute des gouttes. Les différences de masse d'aérosols en suspension observées sont dues à la variation des effets mécaniques et phorétiques sur ces premiers 0,5 m.



**Fig. 2-42 Evolutions de la vitesse des gouttes en fonction de la hauteur de chute, pour différentes vitesses d'injection des gouttes d'aspersion**



**Fig. 2-43 Evolutions temporelles du diamètre des gouttes à h = 0,5 m en fonction de la vitesse d'injection des gouttes d'aspersion**

Les aérosols de diamètre supérieur à 1  $\mu\text{m}$  sont affectés par l'augmentation de la vitesse d'injection des gouttes (Fig. 2-44) qui implique une augmentation de la distance nécessaire pour que les gouttes atteignent leur vitesse terminale de chute. En effet, l'efficacité de collecte par impaction est une fonction croissante du nombre de Reynolds pour les aérosols de diamètre supérieur à 1  $\mu\text{m}$  (Grist, 1982), ce qui se traduit par une diminution plus rapide de la masse d'aérosols en suspension (Fig. 2-40). En revanche, pour les aérosols de diamètre inférieur à 0,6  $\mu\text{m}$ , non concernés par les mécanismes d'impaction, le mécanisme prépondérant pour la collecte est la diffusiophorèse qui dépend peu de la vitesse des gouttes (cf. §1.3.4.1) pour nos conditions d'essai.

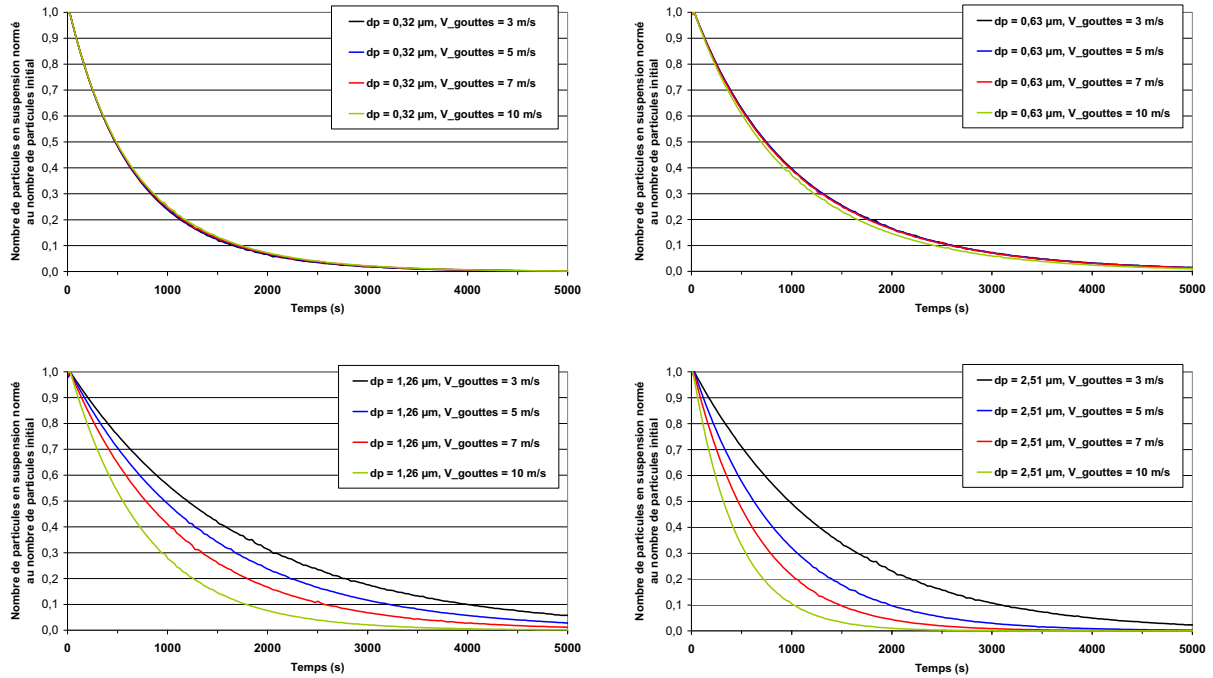


Fig. 2-44 Evolutions temporelles du nombre normé des aérosols dans le gaz en fonction de la vitesse d'injection des gouttes d'aspersion

Les hypothèses émises sont confirmées en étudiant l'influence de la vitesse d'injection des gouttes sur l'efficacité moyenne de collecte d'une goutte (Fig. 2-45). En effet, on notera que l'efficacité évolue simplement pour les aérosols dont le diamètre est supérieur à 0,5  $\mu\text{m}$ . L'augmentation de la vitesse d'injection augmente l'efficacité de collecte par interception et impaction.

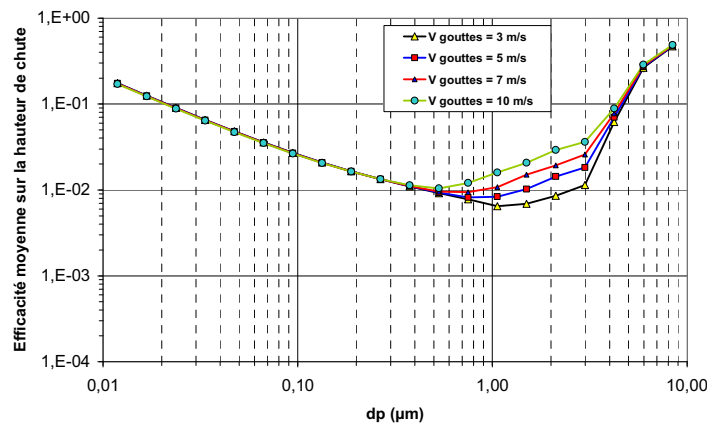


Fig. 2-45 Efficacités moyennes de collecte d'une goutte sur la hauteur de chute en fonction de la vitesse d'injection des gouttes

#### 2.4.2.4. Diamètre initial des gouttes

L'étude bibliographique sur les mécanismes élémentaires ainsi que les résultats des essais CARAIDAS (cf. §1.2.4.4), ont montré l'influence du diamètre des gouttes d'aspersion sur le rabattement aussi bien pour les phénomènes mécaniques que pour les phénomènes phorétiques. Ce paragraphe présente l'influence du diamètre initial des gouttes sur le rabattement des aérosols en gardant les autres conditions fixes et résumées dans le Tableau 2-9 :

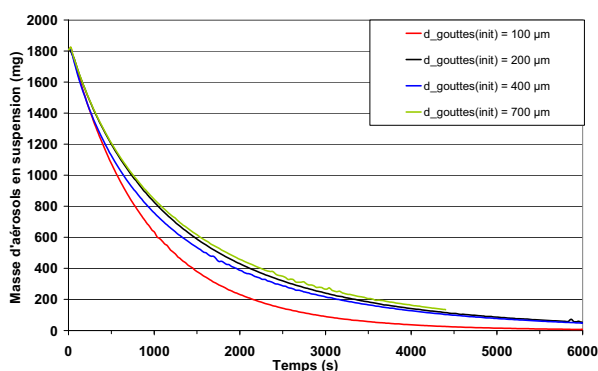
**Tableau 2-9 Conditions de la simulation : test du diamètre des gouttes d'aspersion**

Thermohydrauliques			Aspersion			Aérosols		
P <sub>abs</sub> (bar)	T <sub>gaz</sub> (K)	s	Q <sub>asp</sub> (g/s)	T <sub>asp,inj</sub> (K)	d <sub>goutte,inj</sub> (μm)	Section du spray (m <sup>2</sup> )	m <sub>aérosols,init</sub> (g)	DMM (μm)
1,5	363	0,57	10	298	<i>d<sub>goutte,ini</sub></i>	0,37	2	1 (σ = 1,5)

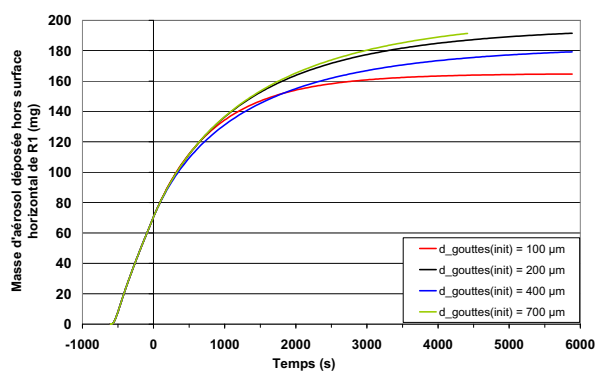
Le diamètre des gouttes d'aspersion,  $d_{goutte,inj}$ , prend successivement la valeur de 100 μm, 200 μm, 400 μm et 700 μm avec une vitesse d'injection et un débit constants.

Comme le montre la Fig. 2-46, la dynamique du rabattement dépend en fonction du diamètre initial des gouttes. L'efficacité de collecte élémentaire d'une goutte (cf. §1.3.4) dépend en général du diamètre de la goutte et du diamètre des aérosols hormis pour les effets phorétiques. Le rabattement est plus efficace pour la plus faible taille de goutte (100 μm) pour laquelle la surface de collecte est la plus importante à débit d'aspersion constant. Cependant, pendant les 400 premières secondes d'injection de l'aspersion, on peut remarquer une efficacité de rabattement similaire pour les gouttes de diamètre de 200 μm et de 100 μm. Les régimes thermodynamique de la phase transitoires sont assez similaires pour ces diamètres de gouttes seul le diamètre des gouttes va légèrement évoluer différemment.

Ceci est lié au fait que la population d'aérosol va évoluer au cours du temps. Le dépôt d'aérosols sur les parois verticales de l'enceinte est le plus faible pour les gouttes de 100 μm pour les raisons expliquées précédemment (Fig. 2-47).



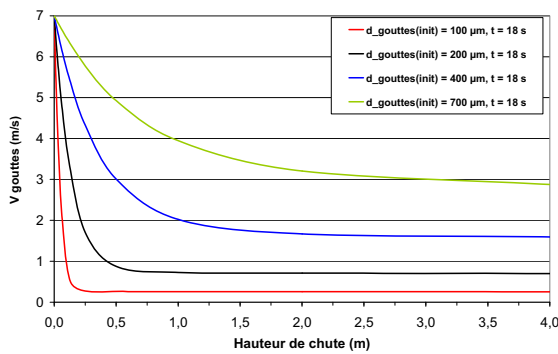
**Fig. 2-46 Evolutions temporelles des masses d'aérosols en suspension dans TOSQAN sur les parois en fonction du diamètre initial des gouttes d'aspersion**



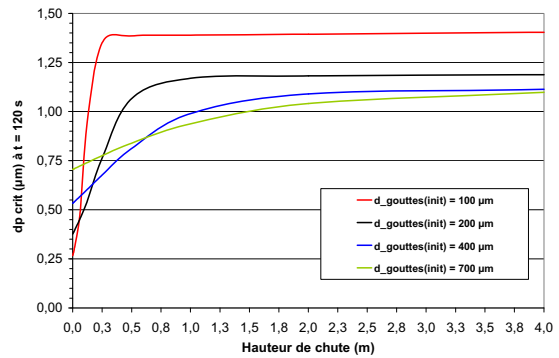
**Fig. 2-47 Evolutions temporelles des masses d'aérosols déposées dans TOSQAN sur les parois en fonction du diamètre initial des gouttes d'aspersion**

Au cours de chaque simulation, le diamètre des gouttes à une hauteur donnée est peu dépendant du temps. Il en est de même pour la vitesse des gouttes.

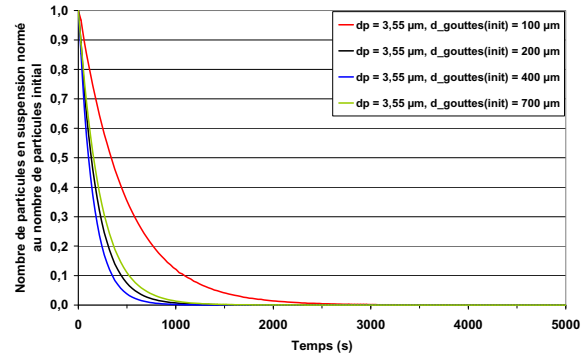
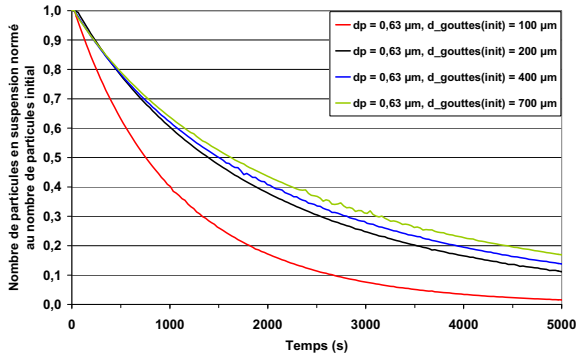
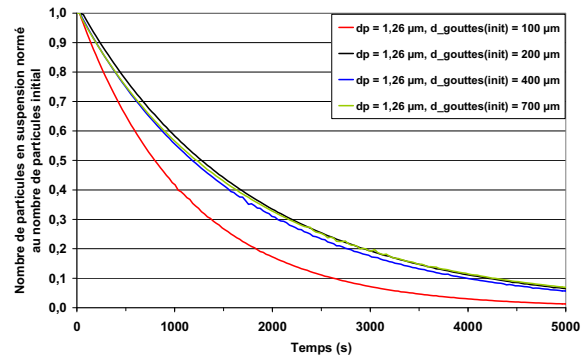
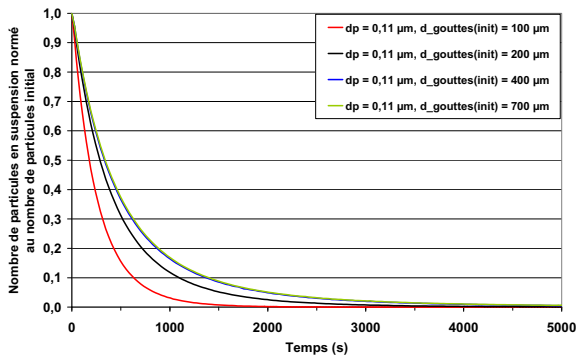
En revanche, à chaque hauteur de chute, la vitesse des gouttes est constante au cours du temps mais elle décroît en fonction de la hauteur de chute (Fig. 2-48). Les gouttes de diamètre de 700  $\mu\text{m}$  n'ont pas le temps d'atteindre leur vitesse terminale de chute ainsi que leur température d'équilibre sur la hauteur de chute disponible dans l'enceinte (4 m). Les évolutions du diamètre critique pour l'impaction sont présentées sur la Fig. 2-49 en fonction de la hauteur de chute. Celles-ci montrent que ce diamètre critique évolue au cours de la chute mais pour des gouttes injectées à 100  $\mu\text{m}$ , il est vite constant après 0,5 m. En effet, nous avons vu (cf. §1.3.4.1 - Eq. (1.29)), le diamètre critique est proportionnel à la racine du diamètre des gouttes au cours de leur chute mais inversement proportionnel à la racine leur vitesse de chute. Au début de l'essai, la perte en masse d'aérosols en suspension est principalement liée au mécanisme d'impaction. Les aérosols de diamètre supérieur à 3  $\mu\text{m}$  (Fig. 2-50) sont rapidement rabattus. Le diamètre moyen des aérosols va diminuer et par conséquent, l'efficacité élémentaire de collecte qui est principalement liée aux phénomènes d'impaction, sera alors pilotée par les phénomènes de diffusion et de diffusiophorèse pour lesquels il y aura compétition.



**Fig. 2-48** Evolutions de la vitesse des gouttes en fonction de la hauteur de chute à  $t = 18$  s pour les différents diamètres de gouttes d'aspersion injectées



**Fig. 2-49** Evolutions du diamètre critique pour l'impaction en fonction de la hauteur de chute à  $t = 120$  s pour les différents diamètres de gouttes d'aspersion injectées



**Fig. 2-50** Evolutions temporelles du nombre normé des aérosols dans le gaz en fonction du diamètre des gouttes d'aspersion

La Fig. 2-51 présente l'évolution de l'efficacité moyenne de collecte d'une goutte en fonction du diamètre d'injection des gouttes. Le minimum d'efficacité de collecte varie avec le diamètre d'injection des gouttes. On peut remarquer que le minimum d'efficacité décroît lorsque la taille des gouttes augmente. Les effets mécaniques d'interception et d'impaction augmentent de concert aussi avec l'augmentation du diamètre d'injection des gouttes.

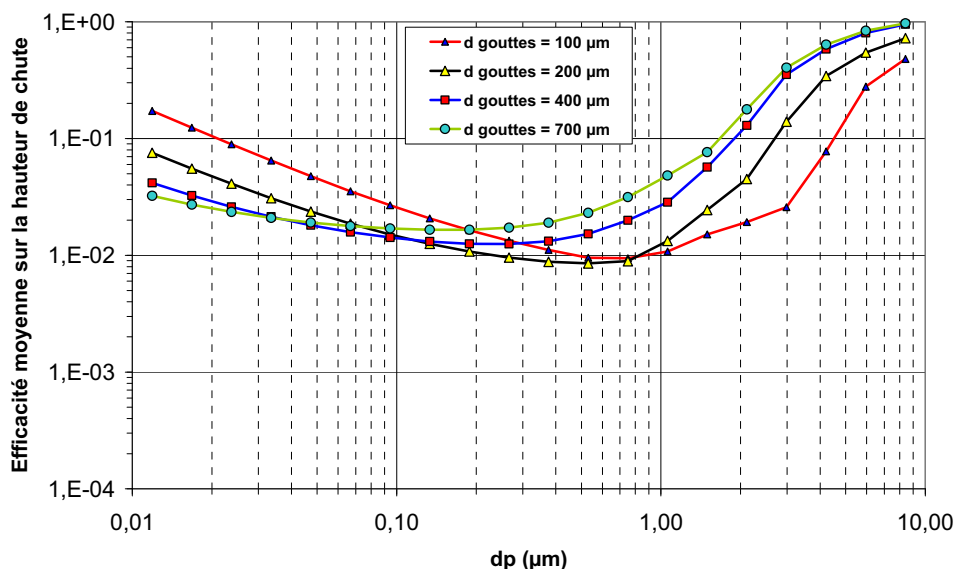


Fig. 2-51 Efficacité moyenne de collecte d'une goutte sur la hauteur de chute en fonction du diamètre d'injection des gouttes

Le diamètre des gouttes est donc un paramètre important à mesurer expérimentalement par la suite.

### 2.4.3. INFLUENCE DES CARACTERISTIQUES DES AEROSOLS

#### 2.4.3.1. Concentration initiale des aérosols

Les effets d'agglomération des aérosols au cours de l'essai sont négligeables aux vues des concentrations dans l'enceinte qui ne dépassent pas  $1 \text{ g/m}^3$  (Plumecocq, 1997; Renoux et Boulaud, 1998). L'hypothèse de l'interdépendance des aérosols est alors possible.

L'effet de la densité des aérosols en suspension peut être très important dans le cas d'aérosols solubles où les gouttes seraient saturées en aérosols mais cette étude sort du cadre de la thèse.

#### 2.4.3.2. Diamètre initial des aérosols

Comme nous avons pu le voir précédemment dans la bibliographie (cf. §1.3.4.1), l'efficacité élémentaire de collecte des gouttes est fonction du diamètre des aérosols qui fait varier la prépondérance des mécanismes pour chaque classe de taille d'aérosol.

La simulation de l'essai de référence a montré que pour des aérosols de différentes classes de taille dans des conditions identiques, l'évolution temporelle du nombre d'aérosol dans chaque classe de diamètre en suspension dans le gaz (Fig. 2-21) est différente et par conséquent le rabattement n'est pas la même en fonction du mode sur la gamme de taille de  $10^{-2} \text{ µm}$  à  $10 \text{ µm}$ .

Il conviendra dans la mesure du possible de réaliser des essais avec des distributions d'aérosols



poly dispersée en fonction des mécanismes prépondérants à mettre en évidence et influençant la collecte comme par exemple la thermophorèse pour les classes d'aérosols inférieures à 0,5 µm.

## 2.5. GRILLE D'ESSAIS

Après l'étude bibliographique et après avoir analysé les paramètres via l'étude de sensibilité présentée précédemment, il apparaît que les grandeurs physiques suivantes liées aux gouttes et aux aérosols sont importantes à mesurer lors de nos essais :

- caractéristiques des gouttes : diamètre, température, vitesse et volume occupé par le spray ;
- caractéristiques des aérosols au cours des essais : concentration et distribution granulométrique.

Parallèlement, toutes les grandeurs liées au gaz sont aussi nécessaires à mesurer, de sorte à bien caractériser les conditions thermodynamiques initiales des essais, mais aussi pour pouvoir suivre leurs évolutions temporelles (cf. §3.2.2).

Les conditions nominales des essais sont choisies de manière à obtenir, en fonction des contraintes expérimentales, des essais semi-analytiques pour étudier de manière la plus découplée possible l'influence des différents mécanismes de collecte des aérosols par les gouttes d'aspersion. Les conditions thermodynamiques des essais de référence ont été dimensionnées afin d'obtenir une faible dépressurisation de l'enceinte. Ce type de scénario analytique permettra d'obtenir une dynamique de rabattement relativement lente de manière à pouvoir suivre précisément l'évolution des caractéristiques des aérosols dans le gaz dans l'enceinte.

La grille d'essais définie est constituée d'une part d'essais où les mécanismes prépondérants impliqués dans le rabattement des aérosols sont liés aux effets mécaniques (cf. §1.3.4.1) et où l'on cherche à minimiser l'impact des effets phorétiques sur le rabattement des aérosols par l'aspersion. La variation de l'intensité des effets mécaniques est obtenue en modifiant le débit d'injection d'eau (influençant vitesse d'injection et densité de gouttes) et dans une moindre mesure, la taille des gouttes. Elle est aussi constituée d'autre part d'essais où la variation des effets phorétiques est obtenue en faisant varier la température d'injection des gouttes d'aspersion par rapport à la température du mélange gazeux présent dans l'enceinte au déclenchement de l'aspersion.

La grille d'essais proposée est présentée dans le Tableau 2-10. Elle est articulée autour de trois thèmes :

1. des essais sans aspersion permettant de caractériser le comportement de référence des aérosols dans l'enceinte et de faire une comparaison avec les essais avec aspersion ;
2. un essai de référence avec aspersion dit à effets « couplés » ;
3. des essais à effets dit « séparés » où la collecte des aérosols est induite majoritairement : soit par des effets mécaniques, soit par des effets phorétiques ;

Précisons que les essais de cette grille sont regroupés en trois campagnes :

1. S0 pour les essais sans aspersion ;
2. AG pour des essais à chaud avec aspersion dédiés à la sensibilité aux paramètres des gouttes ;
3. AA pour des essais à chaud avec aspersion dédiés à la sensibilité aux paramètres des aérosols.

On fait figurer dans le Tableau 2-10 en gras les paramètres qui varient par rapport à l'essai de référence AG0.

**Tableau 2-10 Grille d'essais.**

	Nom de l'essai	Thermohydrauliques			Aspersion				Aérosols		
		P <sub>abs</sub> (bar)	T <sub>gaz</sub> (K)	s	Q <sub>asp</sub> (g/s)	T <sub>asp,inj</sub> (K)	d <sub>goutte,inj</sub> (µm)	Section du spray (m <sup>2</sup> )	m <sub>aérosols,init</sub> (g)	DMM (µm)	
	<b>Essai de référence (sans aspersion)</b>	<b>S0</b>	<b>1,5</b>	<b>363</b>	<b>0,57</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
	<b>Essai de référence (avec aspersion)</b>	<b>AG0</b>	<b>1,5</b>	<b>363</b>	<b>0,57</b>	<b>10</b>	<b>298</b>	<b>100</b>	<b>0,37</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
Effets mécaniques	Essai à différents débits	AG10	1,5	363	0,57	5	363	100	0,37	2	1
		AG11	1,5	363	0,57	10	363	100	0,37	2	1
		AG12	1,5	363	0,57	20	363	200	0,37	2	1
	Essai à différentes sections du spray	AG2	1,5	363	0,57	18	363	100	> 0,37	2	1
	Essai à différents diamètres d'aérosols	AA1	1,5	363	0,57	10	363	100	0,37	2	< 1
	Essai à différents diamètres de gouttes	AG30	1,5	363	0,57	10	363	200	0,37	2	1
		AG31	1,5	363	0,57	10	363	400	0,37	2	1
	Essai à différentes concentrations en aérosols	AA2	1,5	363	0,57	10	363	100	0,37	< 2	1
Effets Phorétiques	Thermophorèse	AG4	1,5	363	0,57	10	<b>363 à 393</b>	100	0,37	2	< 0,5
	Diffusiophorèse	AG51	1,5	363	0,57	5	298	100	0,37	2	1
		AG52	1,5	363	0,57	20	298	100	0,37	2	1
		AG6	1,5	363	0,71	10	363	100	0,37	2	1

Légende relative au nom de l'essai (XZN) :

Type d'essai X : S = Sédimentation

A = Aspersion

Paramètre Z : G = Gouttes

A = Aérosols

N : relatif au numéro de l'essai

## 2.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, l'étude de sensibilité à divers paramètres liés aux conditions thermohydrauliques initiales, aux paramètres de l'aspersion et des aérosols a été réalisée avec le module CPA du code ASTEC. Elle a permis la définition nominale de la grille d'essai à réaliser expérimentalement dans l'enceinte TOSQAN. L'ensemble des essais de cette grille a été calculé à l'aide du module CPA du code ASTEC.

La grille d'essais nominale sera adaptée au potentiel du dispositif expérimental ainsi qu'aux contraintes associées.

Afin d'exécuter les essais de cette grille, dans le chapitre suivant, sont présentés les moyens expérimentaux et les systèmes de mesures existants et ceux mise en œuvre plus spécifiquement pour les essais aérosols.



# CHAPITRE 3. LES MOYENS EXPERIMENTAUX

## 3.1. INTRODUCTION

Dans le cadre des études sur les accidents graves, l'IRSN a lancé, en 1995, la conception et la réalisation de l'installation TOSQAN (TONuS Qualification ANalytique). L'enceinte TOSQAN est conçue pour simuler à échelle réduite, différentes conditions thermohydrauliques (pression, température, régime d'écoulement) représentatives des conditions d'accidents graves de REP.

La Fig. 3-1 synthétise les différents phénomènes physiques étudiés dans l'enceinte TOSQAN.

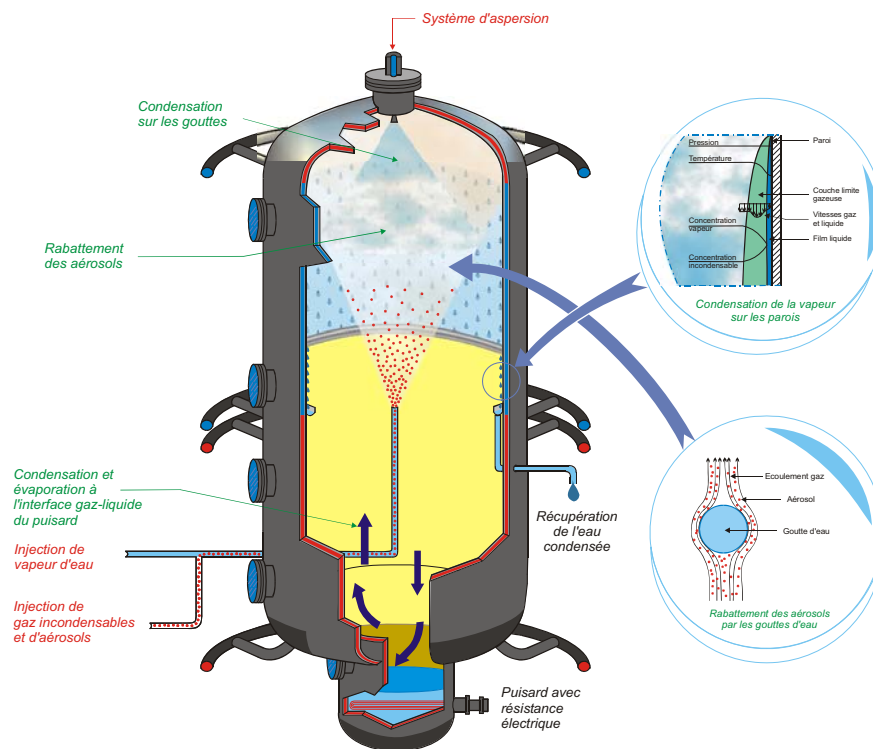


Fig. 3-1 Phénomènes étudiés dans TOSQAN

Dans ce chapitre, sont présentés les moyens expérimentaux utilisés et la métrologie associée afin de caractériser le rabattement des aérosols par l'aspersion.

Tout d'abord est décrit, le plus exhaustivement possible, l'installation expérimentale TOSQAN puis l'ensemble de l'instrumentation mises en œuvre sur cette installation. Ensuite, les techniques de mesure spécifiques nécessaires aux essais aérosols, telles que la turbidimétrie et la granulométrie optique sont présentées afin de caractériser les grandeurs nécessaires à l'étude de la collecte des aérosols par les

gouttes de l'aspersion en conditions hostiles. Enfin, une caractérisation des buses d'aspersion au moyen de la technique PDA (Particle Dynamics Analysis) est réalisée.

## 3.2. L'INSTALLATION TOSQAN

### 3.2.1. DESCRIPTION DE L'INSTALLATION EXPERIMENTALE

L'enceinte TOSQAN est une cuve cylindrique en acier inoxydable munie de doubles parois entre lesquelles circule un fluide caloporteur. Cette cuve fait 4 m de hauteur et 1,5 m de diamètre interne soit un volume interne de 7 m<sup>3</sup> (Fig. 3-2). L'huile circulant entre les parois permet d'imposer à celles-ci une température de consigne. L'enveloppe est divisée en deux zones, permettant si besoin de fixer deux valeurs différentes de température aux parois. De la vapeur d'eau et de l'Hélium peuvent être injectés dans TOSQAN grâce à une canne d'injection située au centre de l'enceinte.

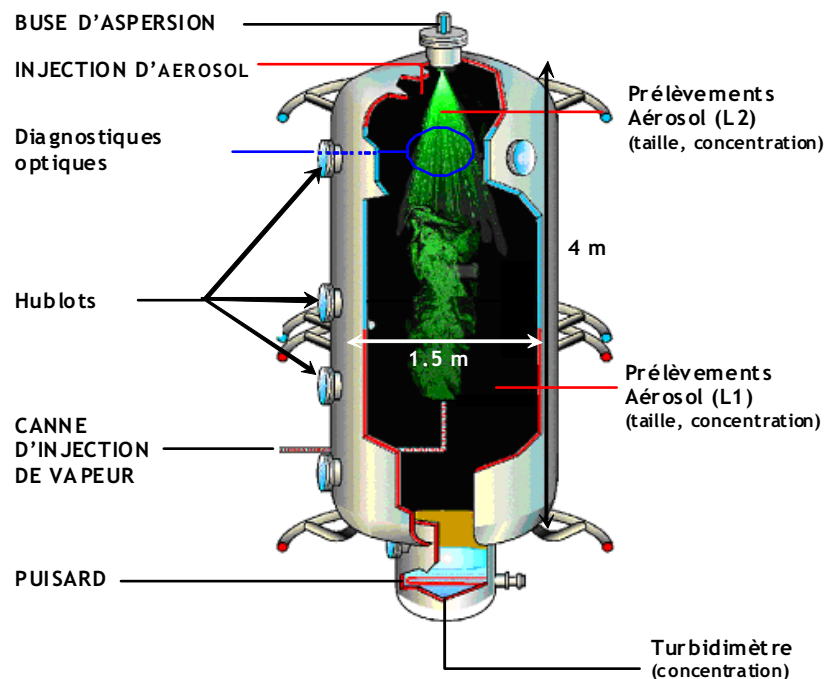


Fig. 3-2 Schéma de l'installation TOSQAN

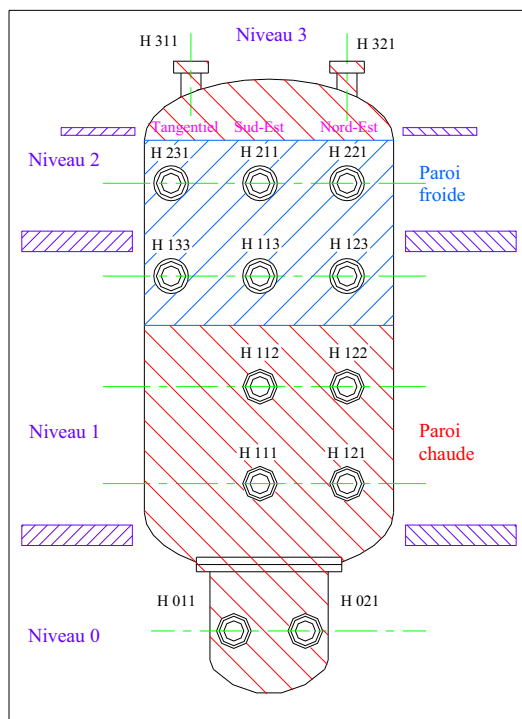
Cette installation a été conçue pour fonctionner à des températures variant de la température ambiante jusqu'à 180 C, et une pression allant de la pression atmosphérique jusqu'à une pression de  $7,7 \cdot 10^5$  Pa.

La production d'aérosol est basée sur l'utilisation d'un disperseur de poudre à brosse rotative (mod. RBG 1000, PALAS©) utilisé antérieurement pour l'ensemencement en vue des mesures optiques (Porcheron, 2005). Il permet de disperser des poudres d'une large gamme de granulométrie (0,1 à 100  $\mu$ m). Le principe de fonctionnement est simple, la poudre est déposée dans un réservoir cylindrique puis le tassage de la poudre est effectué en utilisant un piston sous l'action de son simple poids. Un piston donne une poussée verticale sur le réservoir cylindrique avec une vitesse réglable alimentant ainsi la brosse rotative. Les aérosols sont transportés par un écoulement d'air, chauffé à la température du gaz de l'enceinte, à la sortie de la brosse rotative pour ensuite être injectés dans l'enceinte TOSQAN (partie supérieure, Fig. 3-2) Cette technique évite l'excès d'agglomération des aérosols. Les paramètres de réglages (vitesse de rotation de la brosse, vitesse de la montée du piston, pression en amont d'air comprimée, diamètre du réservoir) ne sont pas couplés ce qui offrent une grande souplesse d'utilisation.



**Fig. 3-3** Vue générale de l'expérience TOSQAN

Des mesures optiques sont réalisées à l'intérieur de l'enceinte à l'aide de 14 hublots répartis sur quatre niveaux (Fig. 3-4). Chaque hublot se compose de deux lames de verre entre lesquelles circule de l'air chaud. Ainsi surchauffés, la condensation de la vapeur d'eau présente dans l'enceinte peut-être évitée sur les hublots.



**Fig. 3-4** Position et identification des hublots de l'enceinte TOSQAN

Le système d'aspersion est disposé en partie haute de l'enceinte. Il est constitué d'une buse (Spraying System©) dont la distance par rapport au dôme peut varier jusqu'à une distance de 90 cm.

Cette buse génère un spray à cône plein dont la caractérisation est présentée dans la partie 3.4. Le schéma des circuits d'aspersion est présenté sur la Fig. 3-5.

La régulation du débit d'aspersion s'effectue à l'aide d'une pompe et de deux vannes ce qui permet de réguler des débits d'aspersion entre 3 et 35 g.s<sup>-1</sup>. Ce système permet d'alimenter parallèlement soit l'enceinte TOSQAN ou soit l'enceinte RAP (RAMpe d'asPersion). Cette dernière, décrite dans la partie 3.4, permet de caractériser, à la pression atmosphérique, les sprays générés par les différentes buses utilisées sur l'expérience TOSQAN.

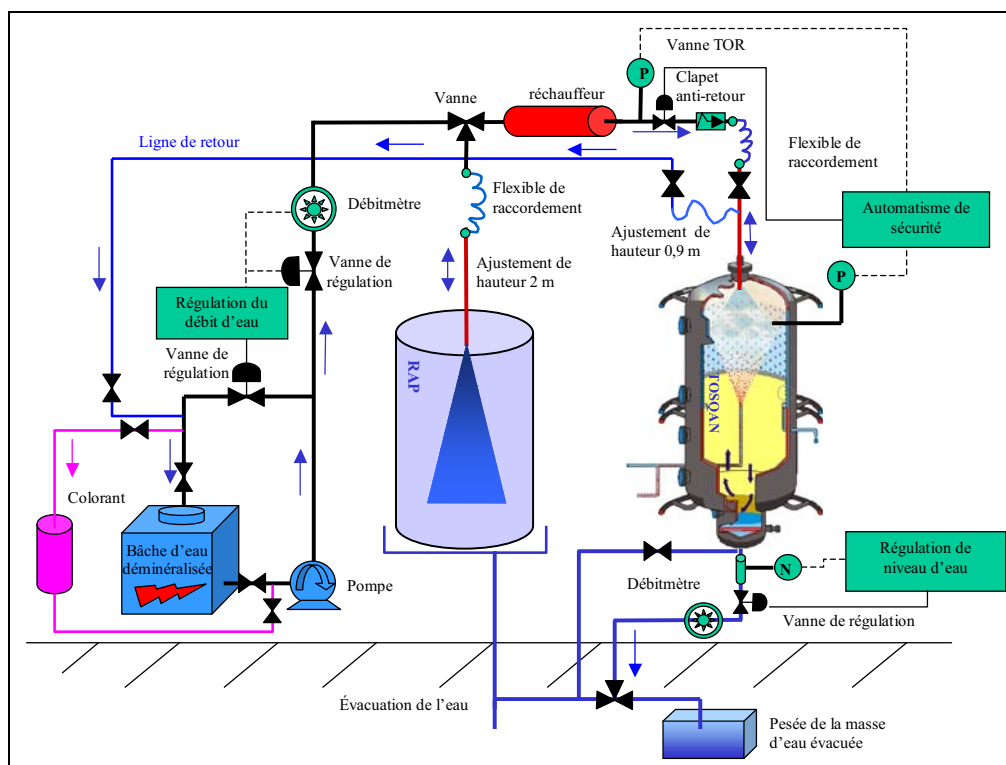


Fig. 3-5 Description du système d'aspersion (Brun et al., 2005)

De plus, la température d'injection de l'eau d'aspersion peut être réglée à l'aide d'une résistance chauffante placée en amont de l'injection du spray. Ainsi, le spray peut être injecté à la température ambiante jusqu'à une température d'environ 90 °C.

L'eau injectée dans l'enceinte est évacuée au fur et à mesure afin d'éviter son accumulation dans le bas de l'enceinte. Le système permettant la régulation du débit d'évacuation est un système à niveau d'eau constant positionné sous le puisard de l'installation. Nous verrons plus tard (cf. §3.3.3) qu'il permet aussi la mise en place du système d'opacimétrie qui permet la mesure en continu de la concentration massique des aérosols présente dans l'eau d'évacuation en sortie de puisard.

### 3.2.2. MOYENS DE MESURE ASSOCIES IMPLANTES

L'enceinte TOSQAN a été conçue pour simuler à échelle réduite, des situations représentatives d'accidents graves de REP. Afin d'étudier tous ces phénomènes, diverses mesures réparties spatialement dans l'enceinte sont possibles (Porcheron et al., 2003; Lemaitre, 2004; Porcheron et Thause, 2005). Dans le cadre de cette étude, nous utilisons des thermocouples et des capteurs de pression pour mesurer la



température et la pression du gaz. La technique PIV et la technique ILIDS permettent de caractériser la vitesse et la taille des gouttes d'aspersion. Un granulomètre optique permet la mesure des concentrations massiques et des distributions en tailles des aérosols en suspension dans le gaz et un turbidimètre a été implanté sur le circuit d'évacuation du puisard afin de mesurer en continu la masse des aérosols collectés par les gouttes d'aspersion au cours de leur chute.

### **3.2.2.1. Caractérisation des gouttes**

Pour caractériser la granulométrie des gouttes d'eau injectées dans l'enceinte TOSQAN, nous nous sommes orientés vers la technique d'imagerie en défaut de mise au point ou ILIDS (pour Interferometrics Laser Imaging for Droplet Sizing) (Maeda et al., 2002) étant donné que les accès optiques de l'enceinte TOSQAN ne permettaient pas l'implantation de la technique Phase Doppler (PDA pour Phase Doppler Analyser).

La caractérisation des pulvérisations générées par les buses d'aspersion à l'aide de la technique PDA sont réalisées en dehors de l'enceinte TOSQAN dans l'enceinte RAP (cf. §3.4). Afin de mesurer l'évolution de la vitesse des gouttes du spray dans l'enceinte TOSQAN, un dispositif PIV est utilisé.

Les principes de ces deux diagnostics optiques sont succinctement rappelés, puis quelques exemples de résultat sont présentés

#### **L'imagerie en défaut de mise au point (ILIDS)**

L'imagerie en défaut de mise au point présente beaucoup d'avantages pour une utilisation sur une expérience de taille importante comme TOSQAN. Cette technique permet de donner une information instantanée ou moyennée dans le temps, sur la taille des gouttes sphériques présentes dans une section de mesure de taille conséquente (supérieure à 100 cm<sup>2</sup>).

Nous allons rappeler succinctement le principe de ce diagnostic optique, puis nous présenterons le dispositif optique adopté.

#### **Principe de l'imagerie en défaut de mise au point (ILIDS)**

Le principe de la technique ILIDS implantée sur l'expérience TOSQAN et ses contraintes sont présentés dans (Lemaitre, 2004; Porcheron et al., 2004; Lemaitre et al., 2005).

Le principe de la technique repose sur la collection de la lumière diffusée par des gouttes éclairées par un plan laser (Fig. 3-6). Considérons l'angle de diffusion  $\theta$  existant entre le plan laser et l'axe du récepteur de la lumière diffusée, dans notre cas une caméra CCD. Lorsque l'angle  $\theta$  est approprié, des franges d'interférence sont observables au sein de chaque goutte dont les images sont enregistrées par la caméra, laquelle est positionnée de manière à avoir une prise de vue ayant un léger défaut de mise au point. Ces franges sont le résultat des interférences entre les rayons réfléchis à la surface de la goutte et les rayons subissant une réflexion interne (Fig. 3-7).

Pour que l'angle  $\theta$  soit optimal, c'est-à-dire pour que la visibilité des franges soit la meilleure, il faut que les intensités des modes de diffusion correspondant à la lumière réfléchi (p = 0) et la lumière réfractée (p = 1) soient égales. Ainsi, pour une nappe polarisée parallèlement (respectivement perpendiculairement), cet angle optimal est égal à 70° (respectivement 80°), pour de l'eau. La polarisation est dite parallèle (respectivement perpendiculairement) lorsque le champ électrique incident vibre parallèlement (respectivement perpendiculairement) au plan de diffusion.

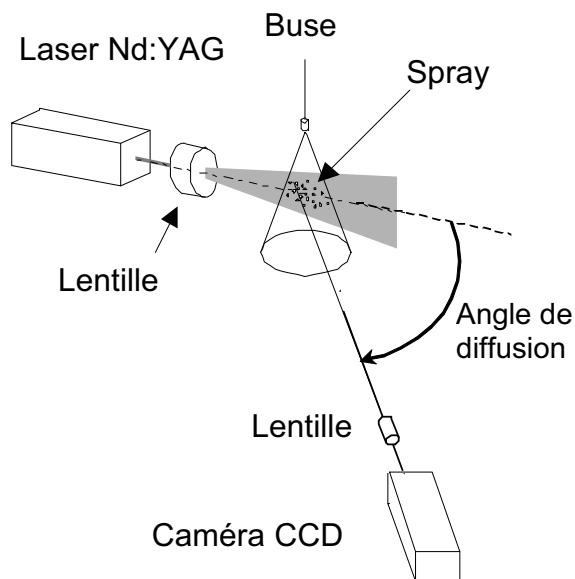


Fig. 3-6 Schéma du dispositif expérimental pour l'imagerie en défaut de mise au point (Maeda et al., 2002)

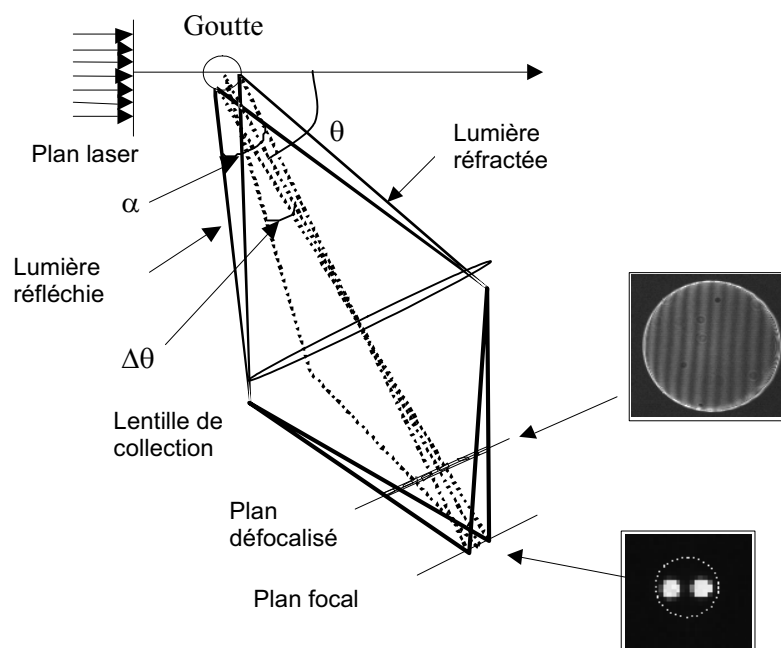


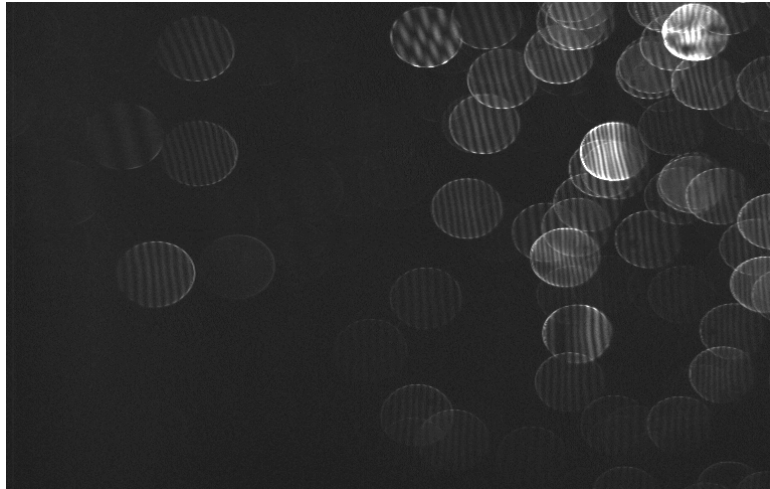
Fig. 3-7 Schéma du principe de l'imagerie en défaut de mise au point (Maeda et al., 2002)

Le nombre de franges sur l'image collectée  $N_f$  est proportionnel au diamètre de la goutte  $d_g$  (Eq. (3.1)) en fonction de l'angle de diffusion  $\theta$ , de l'angle d'ouverture  $\alpha$  et de l'indice de réfraction des gouttes  $m$  (Maeda et al., 2002).

$$d_g = \frac{2\lambda N_f}{\alpha} \left( \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{m \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\sqrt{m^2 - 2m \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + 1}} \right)^{-1} \quad \text{Eq. (3.1)}$$

### Présentation du dispositif optique

La technique ILIDS implantée sur l'expérience TOSQAN utilise les composants d'une chaîne PIV standard, à savoir, un laser Nd:YAG pulsé doublé en fréquence, une caméra CCD 1k x 1k (mod. HiSence, DANTEC©) et un processeur (mod. Flow map 2100, DANTEC©). Des bancs spécifiques ont été conçus pour supporter l'émission et la réception, afin d'assurer la mobilité suivant les degrés de liberté nécessaire aux réglages optiques (angle de diffusion, translation de la caméra pour la mesure du défaut de mise au point) (Porcheron et al., 2004). Un exemple d'image en défaut de mise au point acquise dans l'enceinte TOSQAN est présenté sur la Fig. 3-8.



**Fig. 3-8 Exemple d'image en défaut de mise au point (100 mm x 160 mm)**

### Traitement des images

Un logiciel de traitement des images en défaut de mise au point a été développé au CNRS/CORIA sous MATLAB (Mées et al., 2003). L'analyse des images comporte plusieurs étapes qui sont l'identification individuelle des gouttes, la détection de leur contour et de leur position, la mesure du nombre et de l'orientation des franges par FFT 2D.

Le diamètre et la position de chaque goutte présente sur l'image sont ainsi déterminés à condition que l'image ait un bon contraste et que la densité de gouttes ne soit pas trop importante pour limiter la superposition d'images des gouttes défocalisées, qui rend l'identification des gouttes délicate par le logiciel. La granulométrie des gouttes d'une ou plusieurs images peut être cumulée et représentée sous forme d'histogrammes ou de champs.

Un exemple de granulométrie des gouttes obtenue (en Z11) pour l'essai à un débit d'aspersion de 10 g/s (AG0) est présenté Fig. 3-9. Le diamètre moyen est de 141  $\mu\text{m}$ .

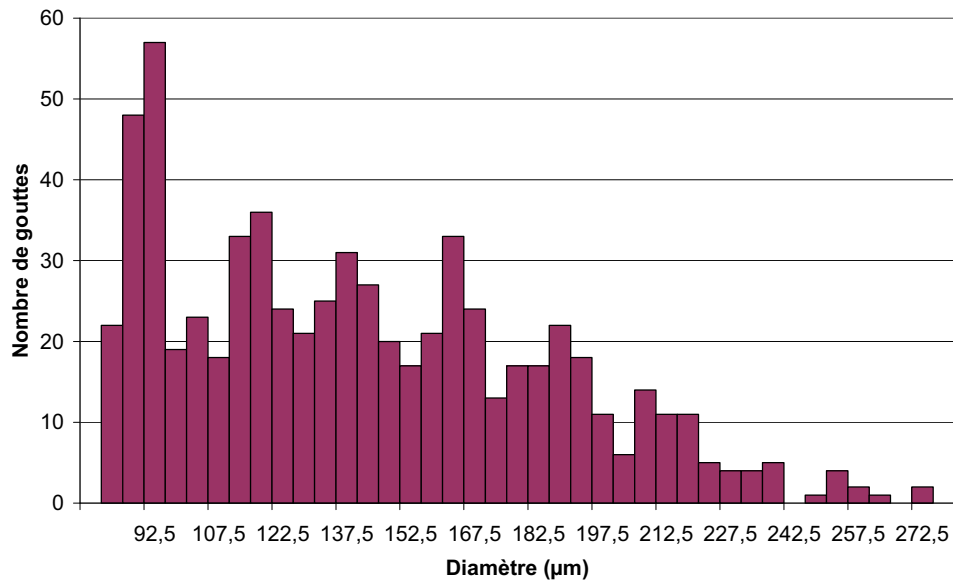


Fig. 3-9 Granulométrie de la buse pour l'essai à 10 g/s (AG0)

### Vélocimétrie par images de particules (PIV)

La technique de vélocimétrie par images de particules est une technique optique permettant de mesurer un champ de vitesses instantanées ou moyennées. Cette technique utilise le même dispositif optique que la technique ILIDS à la différence que l'acquisition des images se fait avec une caméra dont l'objectif est réglé de manière à avoir des images au point. Les couples d'images (Fig. 3-10 images A et B) sont pris avec un intervalle fixé par l'expérimentateur et qui est choisi en fonction de la vitesse de l'écoulement. Un vecteur vitesse associé à une zone de mesure appelée fenêtre de corrélation est calculé à partir du traitement de chaque couple d'images obtenu successivement.

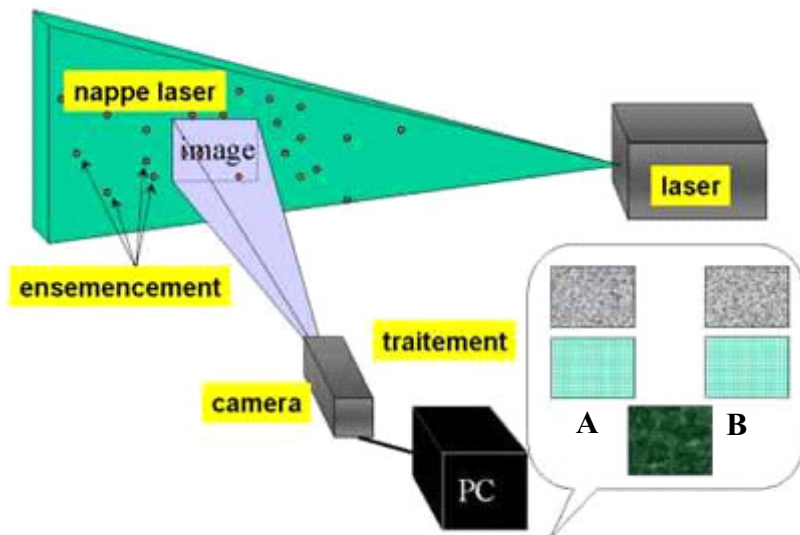


Fig. 3-10 Schéma du dispositif expérimental PIV

### 3.2.2.2. Caractérisation du gaz

La pression dans l'enceinte est mesurée par l'intermédiaire d'un capteur de pression absolue et d'un capteur de pression relative placés respectivement dans les parties basse et haute de l'enceinte.

La mesure de la température du gaz dans l'enceinte TOSQAN est réalisée à l'aide de 114 thermocouples de type T placés en proche paroi, sur des cannes verticales ou horizontales (Fig. 3-11 et Fig. 3-12). Ces dernières sont réparties en forme d'hélice de sorte à cartographier la majeure partie du volume de l'enceinte. Chaque thermocouple susceptible d'être aspergé par les gouttes d'aspersion est protégé par un petit chapeau permettant de l'isoler de l'impact des gouttes.

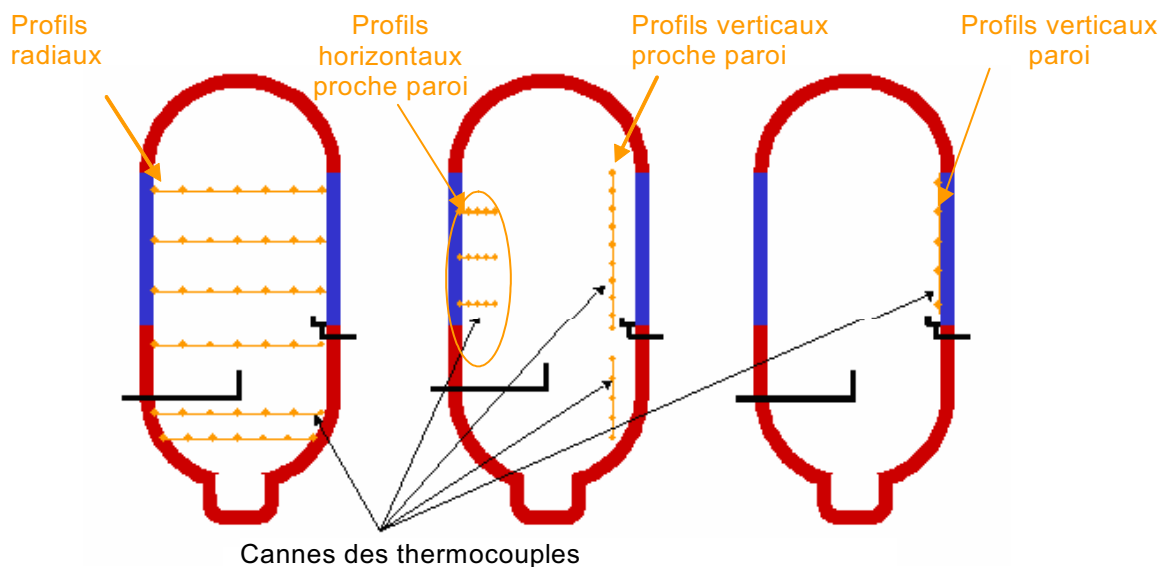


Fig. 3-11 Positionnement des thermocouples dans l'enceinte TOSQAN

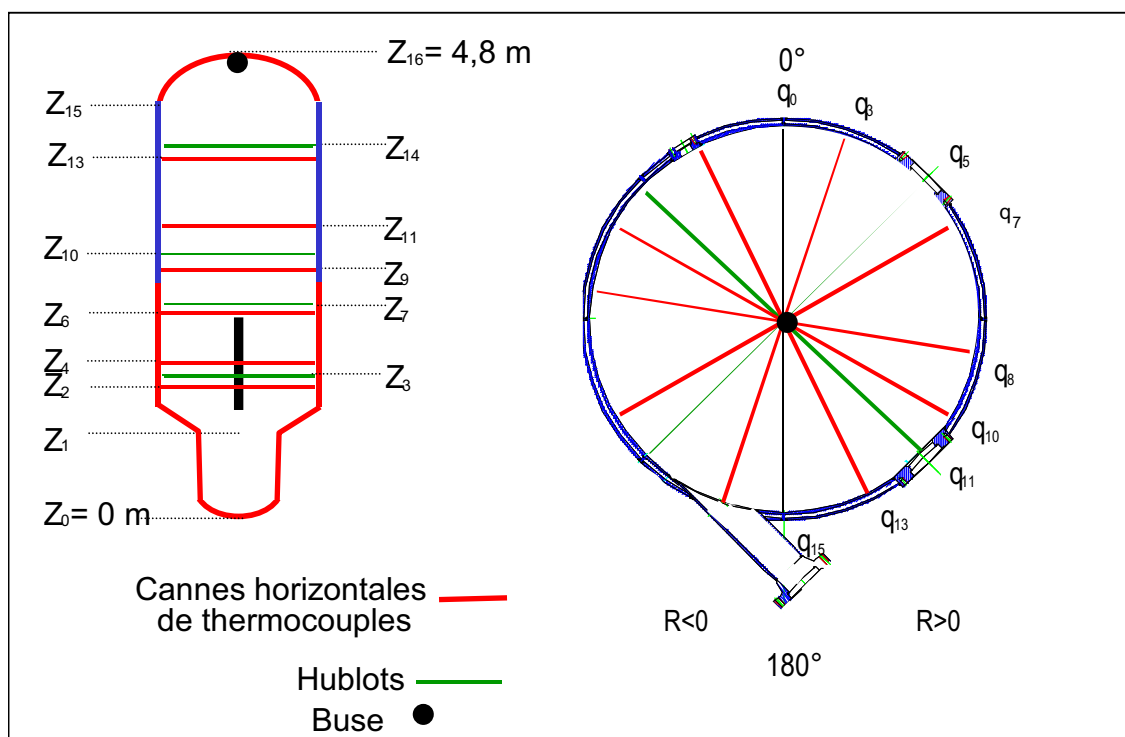


Fig. 3-12 Position des diverses cannes de thermocouple et hublots

Chacun des thermocouples présents dans l'enceinte est référencé dans un repère cylindrique dont le centre correspond à celui de l'enceinte et l'orientation est de bas en haut (le repérage des thermocouples est présenté plus en détail en Annexe 1).

La température moyenne du gaz dans l'enceinte TOSQAN est calculée à partir de la moyenne des températures mesurées par les 40 thermocouples placés sur les cannes horizontales.

### 3.3. MOYENS DE MESURE DEDIES AUX AEROSOLS

Dans cette partie sont présentés les moyens de mesures spécifiques à la caractérisation des aérosols aux cours des essais. Il s'agit de déterminer la concentration massique et le diamètre des aérosols en suspension dans le gaz et la masse d'aérosols collectés par les gouttes d'aspersion.

Bien qu'il n'y ait pas une séparation stricte entre les deux, il y existe deux approches générales à la caractérisation des aérosols : les prélèvements et l'analyse en différé, et les sondes à lecture directe. La première méthode est généralement moins compliquée à mettre en œuvre et donne des mesures intégrales de concentration permettant la mesure qualitative et quantitative des aérosols. La dernière technique qui exige une instrumentation beaucoup plus évoluée, fournit l'information sur la distribution granulométrique en quasi temps réel.

Un des premiers facteurs à considérer dans le choix de l'instrumentation pour la mesure d'aérosols est la classe de taille des aérosols. Ensuite la principale difficulté d'un « prélèvement » est d'assurer la représentativité de l'échantillon prélevé. Cette interrogation est tout particulièrement justifiée pour les aérosols prélevés dans des conditions expérimentales hostiles comme celles des essais réalisés dans l'expérience TOSQAN. En effet, pour notre application, les aérosols sont prélevés dans une enceinte en pression, en température et en présence d'une forte humidité relative. Une vue d'ensemble de plusieurs types de catégorie d'instruments généralement utilisés en fonction de la classe de taille est présentée sur la Fig. 3-13 ainsi que sur la Fig. 3-14.

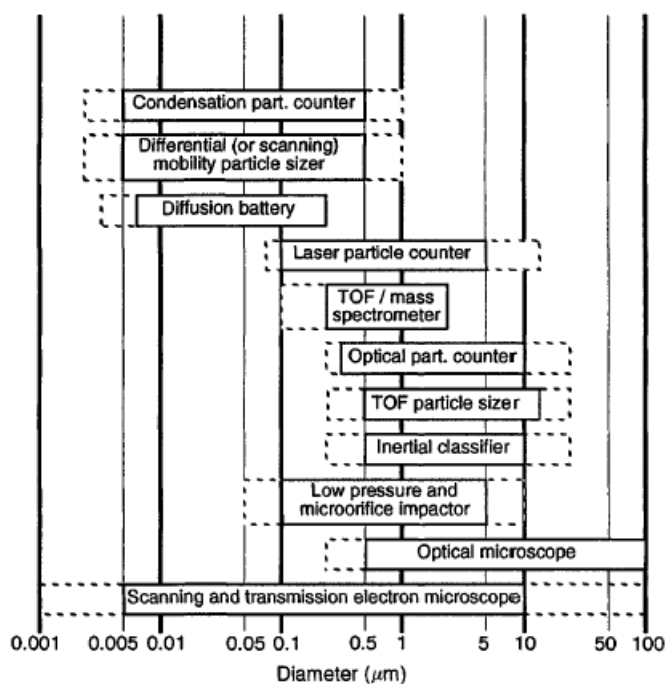


Fig. 3-13 Classement des dispositifs métrologiques en fonction de la gamme de mesure de quelques instruments d'analyse des aérosols (Baron et Willeke, 2001)

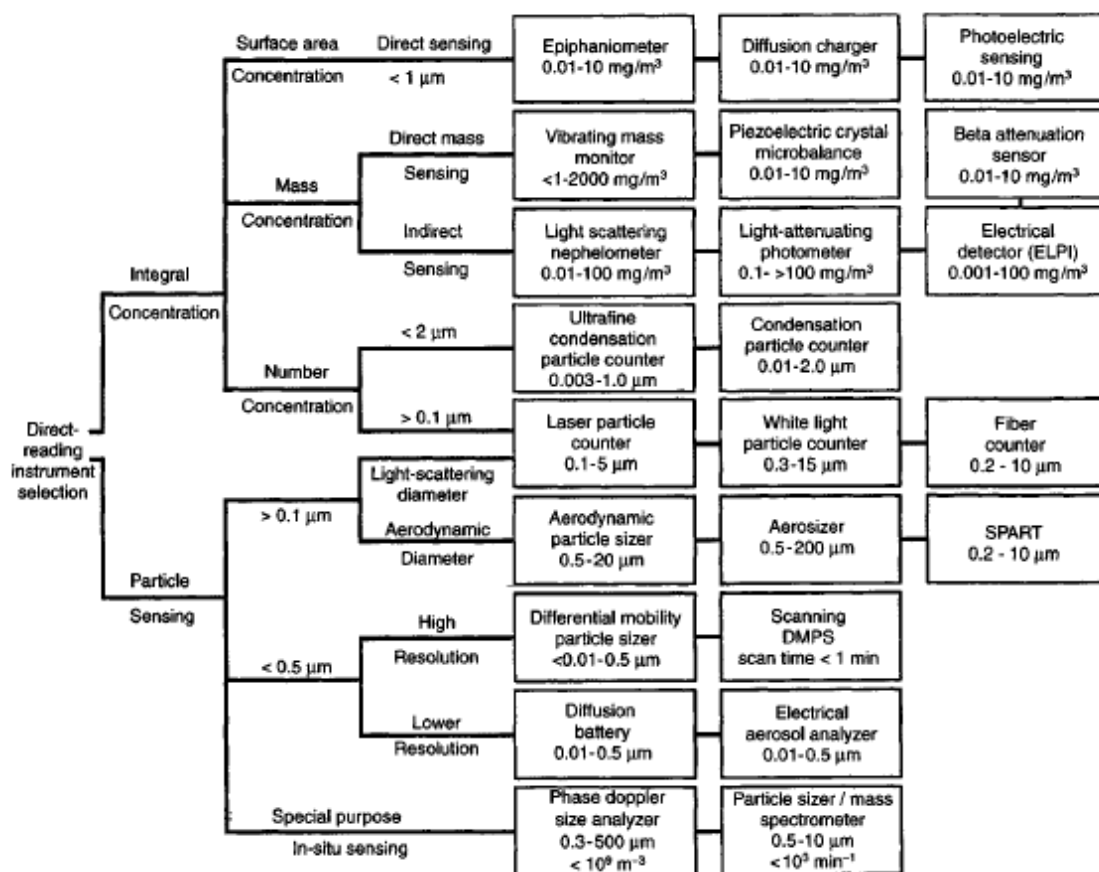


Fig. 3-14 Organigramme présentant de manière non exhaustive, les instruments à lecture directe pour analyser les aérosols (Baron et Willeke, 2001).

Les dispositifs métrologiques employés afin de caractériser les aérosols étant essentiellement développés pour l'analyse d'échantillons à température et pression ambiante. Le choix est donc limité. Il convient en plus, à l'aide de ce dispositif d'avoir des mesures quasi « temps réel », pour obtenir le maximum d'information dans le temps et l'espace afin de suivre l'évolution des phénomènes.

Du fait des conditions hostiles propre à nos expériences (pression, vapeur d'eau et température et présence de gouttelettes d'eau) et de la nécessité d'avoir une mesure ayant une bonne résolution temporelle, nous nous sommes orientés vers un granulomètre optique commercial (WELAS mod. 2100 de PALAS®, (Umhauer et al., 2000)) Concernant la mesure de la masse d'aérosols collectée par les gouttes d'aspersion, la solution retenue est basée sur l'analyse de l'eau évacuée en sortie du puisard à l'aide d'un opacimètre prototype (Porcheron, 2006).

### 3.3.1. LA CARACTERISATION DES AEROSOLS UTILISES LORS DES ESSAIS

Au cours de notre étude bibliographique (cf. §1.2.1) il ressortait que les produits de fission pouvaient être relâchés sous forme d'aérosol. Nous nous focaliserons sur des aérosols insolubles et non hygroscopiques.

Dans le but de caractériser la morphologie, la dimension et la composition chimique des aérosols choisis pour nos essais, des clichés ont été réalisés au microscope électronique à transmission (MET) et une analyse chimique par spectrométrie a été réalisée.

Ensuite une comparaison de la mesure du diamètre des aérosols obtenue à l'aide d'un l'APS (l'Aerodynamic Particle Sizer) et d'un Aerosizer de TSI est présentée.

### 3.3.1.1. Par visualisation au microscope électronique à transmission

La microscopie électronique à transmission (MET) est actuellement l'une des techniques les plus utilisées en matière de topographie à l'échelle nanoscopique pour les études de faciès et de morphologie. Son avantage par rapport à la microscopie optique, par exemple, réside dans le fait que l'image ne souffre pas de profondeur de champ limitée et permet d'accéder à des résolutions plus importantes. L'inconvénient principal de cette technique est que l'échantillon, préalablement préparé, doit être placé dans une enceinte et bombardé d'un faisceau d'électrons ; ces conditions peuvent influencer la structure de certains matériaux. De plus, la vision n'est que bidimensionnelle mais elle donne la forme générale des particules. Les mesures ont été réalisées au sein des laboratoires du LISA (Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques) de Créteil.

L'association du microscope (mod. MET-JEOL 100 CX II, JEOL©) pour les clichés, couplé à un détecteur (mod. EDS-PGT Prism 2000, Princeton Gamma Tech©) pour la détection des rayons X et un analyseur (mod. PGT AVALON 4000, Princeton Gamma Tech©) pour leur analyse, nous permet de déterminer la composition chimique élémentaire. Quand les particules sont percutées par le faisceau d'électrons primaires, elles libèrent des électrons transmis qui forment l'image. Un rayonnement X est aussi recueilli par un détecteur (en mode EDS (X-Rays Energy Dispersive Spectroscopy)), puis trié par un système de microanalyse sélectif en énergie qui permet d'établir la composition chimique élémentaire de l'échantillon analysé.

L'étude principale a porté sur trois types d'aérosols différents (Fig. 3-15, Fig. 3-16 et Fig. 3-17) de trois compositions chimiques différentes : les Monospher 1000 (particules de  $\text{SiO}_2$  utilisées pour la calibration du granulomètre WELAS), de l'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et du carbure de silicium ( $\text{SiC}$ ). D'autres aérosols avaient été envisagés (Annexe 1) mais leurs caractéristiques ne permettaient pas l'étude du rabattement dans de bonnes conditions.

#### Type Monospher 1000

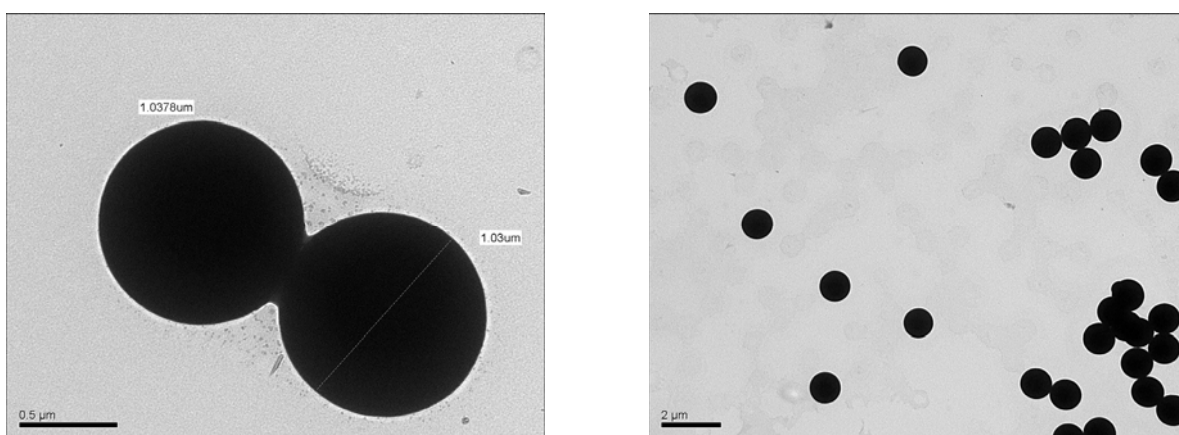


Fig. 3-15 Morphologie au MET du Monospher 1000

L'analyse chimique a confirmé que ces poudres étaient composées de  $\text{SiO}_2$ .



### Type SiC

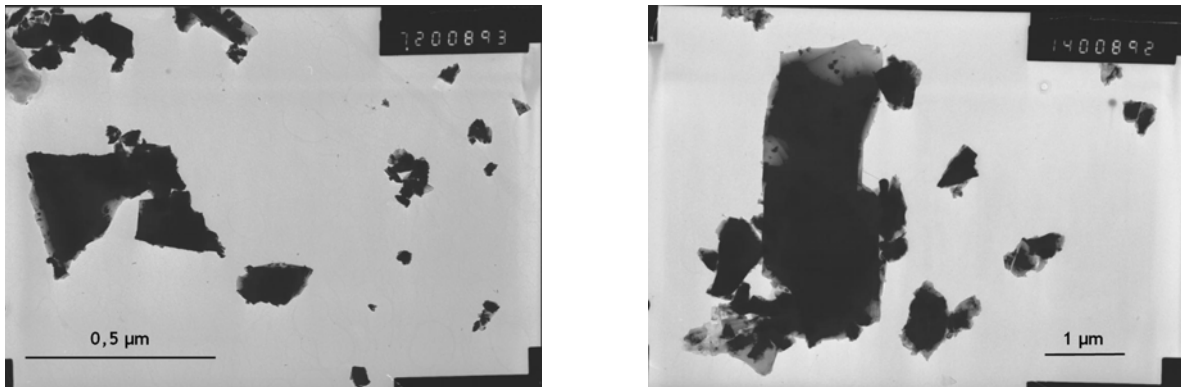


Fig. 3-16 Morphologie au MET du SiC

L'analyse chimique a confirmé que ces poudres étaient composées de SiC.

### Type alumine

AKE46

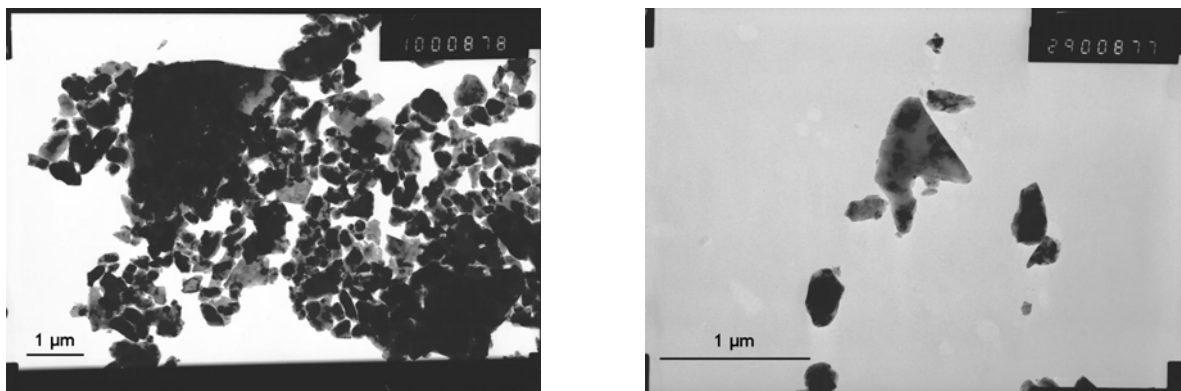


Fig. 3-17 Morphologie au MET du AKE46

L'analyse chimique a révélé que cette poudre était composée de  $Al(OH)_3$ .

Aux vues des morphologies et des compositions chimiques des 3 types poudres précédentes, la poudre de AK-46 ne sera pas utilisée du fait de ça grande poly-dispersion.

#### **3.3.1.2. Par comparaison entre APS & Aerosizer**

D'autres appareils de mesure (Fig. 3-10 et Fig. 3-13) permettent de caractériser des particules dont les classes de taille correspondent à celles que nous utilisons, dans des conditions standards de température et pression. Les analyseurs du type « Temps de vol » (TOF - Time Of Flight) des aérosols font partie d'une gamme d'instruments qui mesurent le diamètre aérodynamique des particules suivant une accélération contrôlée dans un domaine d'écoulement bien défini. Deux de ces instruments, l'Aerodynamic Particle Sizer (APS, mod. 3321 TSI©) et le Particle Size Distribution Analyzer (Aerosizer, mod. PSDA 3603, TSI©) références dans le domaine de la caractérisation de la distribution granulométrique de poudre, sont utilisés afin de comparer et de valider les résultats des mesures fournis à l'aide du granulomètre optique WELAS.

Les deux instruments sont capables de classer plusieurs milliers de particules en une seconde ce qui permet d'obtenir rapidement les distributions des diamètres aérodynamiques des poudres. Cette rapidité rend la technique de l'analyse de TOF attrayante. Des descriptions détaillées du principe de fonctionnement de chaque appareil ont montré la robustesse de ces systèmes de mesure ainsi que leurs applications et les limitations pour la caractérisation de divers types d'aérosols (Mitchell et Nagel, 2000; Baron et Willeke, 2001; Peters et Leith, 2003; Mendes et al., 2004; Volckens et Peters, 2005). Nous allons par la suite décrire succinctement le principe de fonctionnement de ces dispositifs de mesure.

### L'Aerodynamic Particle Sizer (APS)

Le développement de l'APS a été basé sur l'utilisation d'une buse accélérant les particules et d'un système Doppler de détection laser développée par Wilson et Liu (1980) et améliorée par Remiarz et al. (1981).

Les aérosols sont aspirés à l'admission avec un débit de 5 L/min. Une fraction (4/5) de ce débit est prélevée, filtrée puis réintroduite en amont de la buse accélératrice comme air propre. L'écoulement d'aérosols restant (un litre par minute) alimente une buse focalisante, et se recombine avec l'air propre pour être accéléré par la buse finale (Fig. 3-19).

Des microprocesseurs servent de contrôleurs volumétriques de l'écoulement. À la sortie de la buse accélératrice, chaque particule traverse deux faisceaux lumineux générés par une diode laser (DL). La lumière diffusée par la particule produit deux impulsions détectées par un photomultiplicateur, et le délai séparant ces deux impulsions qui représente le temps de vol de la particule entre les deux faisceaux (TOF), est enregistré comme on peut le noter sur la Fig. 3-18.

Les plus grosses particules, n'ayant pas assez d'accélération par rapport à la vitesse de l'air dans la zone de détection, sont donc représentées par les plus grands TOF. Les données de TOF sont stockées dans un accumulateur dans les classes représentant des intervalles égaux de temps afin d'avoir une bonne statistique. Le faisceau incident de la DL est suffisamment large pour que les pulsations lumineuses recouvrent chaque particule. La forme de l'impulsion est différenciée, et le point d'inflexion de chaque crête définit le point central ou le mode de cette crête. La lumière maximale diffusée pour chaque paire est mesurée et peut être corrélée avec le TOF, permettant un rejet par post-traitement des pics des paires dont les tailles ne correspondent pas au TOF mesuré.

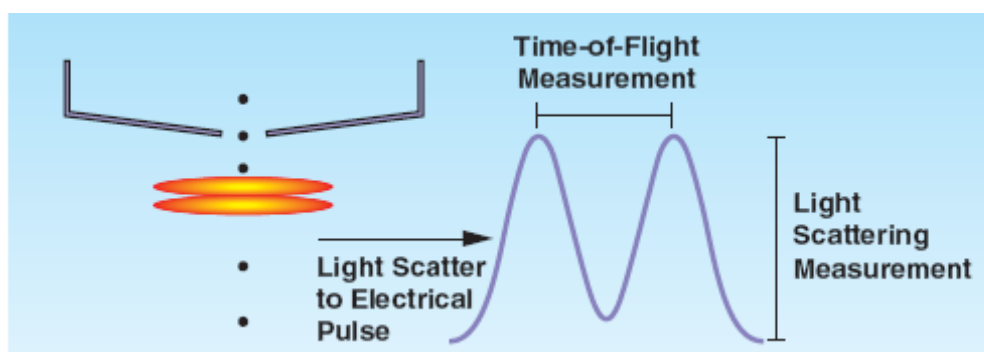


Fig. 3-18 Schéma du temps de vol (TOF - Time of Flight)

La taille aérodynamique finale est déterminée à partir d'un calibrage du spectre obtenu en utilisant des particules sphériques monodispersées de référence d'une masse volumique donnée ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ). L'APS mesure les distributions en classe de taille des particules ayant un diamètre aérodynamique entre  $0,5 \mu\text{m}$  et  $20 \mu\text{m}$  en quasi « temps réel ».

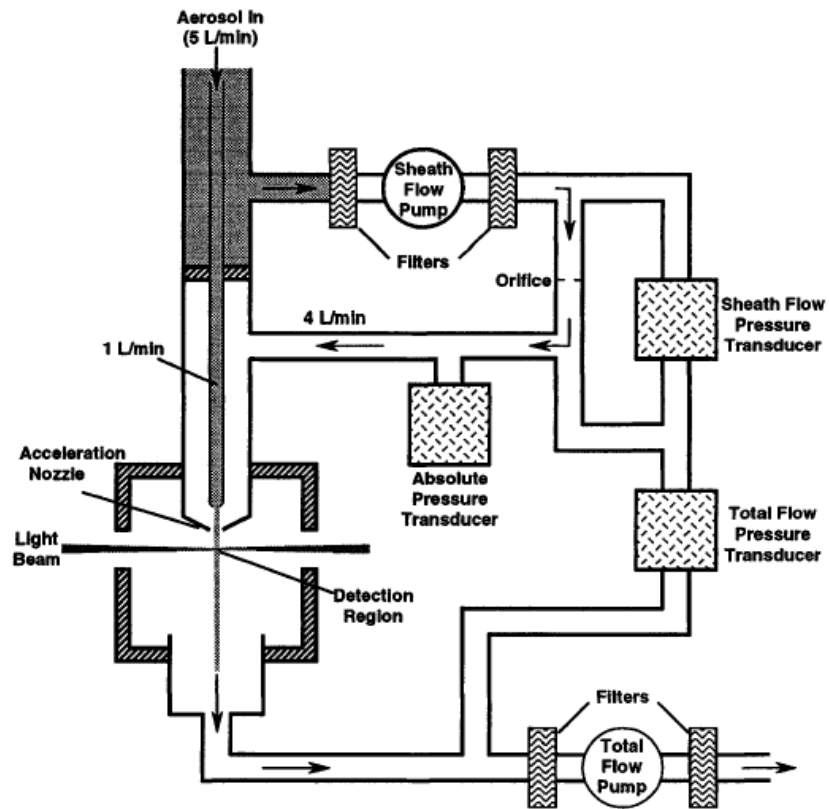
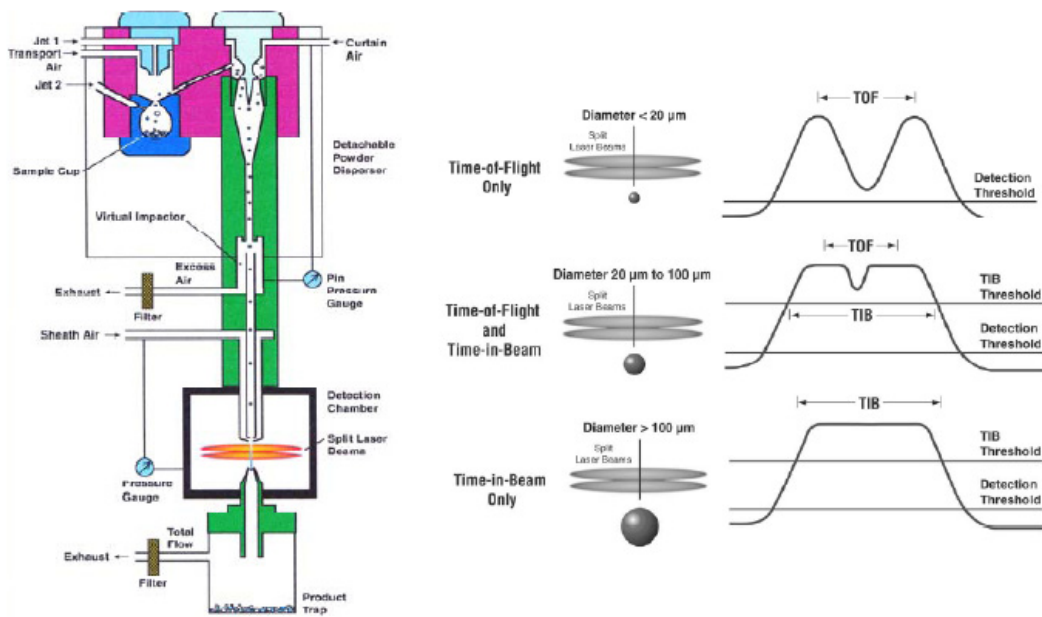


Fig. 3-19 Schéma de principe de l'APS (Baron et Willeke, 2001)

#### L'aerosizer : Particle Size Distribution Analyzer (mod PSDA 3603, TSI©)

L'Aerosizer (TSI) est basé sur le principe de la détermination de la vitesse des particules dans un écoulement d'air accéléré à partir de la mesure du temps qu'elles mettent pour parcourir une distance fixée par l'écart entre deux faisceaux laser parallèles, mais en accélérant les particules dans un écoulement d'expansion sonique plus élevée que dans le cas de l'APS. L'idée d'accélérer des particules dans un écoulement d'expansion sonique et de mesurer la vitesse terminale a été proposée et démontrée la première fois dans des instruments de type prototype de laboratoire par Dahneke (Dahneke et Flachsbart, 1972; Cheng et Dahneke, 1979; Dahneke et Cheng, 1979).



**Fig. 3-20 Système de dispersion (à gauche) et de détection des particules (à droite) du granulomètre Aerosizer**

Les aérosols entrent par un tube capillaire intérieur (Fig. 3-20), entouré par de l'air propre dans le tube externe. L'air et les particules sont accélérés à travers une buse convergente (0,75 mm de diamètre) et sortent dans une chambre de mesure en dépression.

Les vitesses mesurées permettent de déterminer le diamètre aérodynamique des particules par la mesure du temps de vol (TOF) et/ou du temps de résidence (TIB) entre les deux faisceaux laser en fonction de la taille des particules de l'échantillon (Fig. 3-20). Les 2 rayons lumineux diffusés par les particules sont détectés et convertis en signaux électriques par deux photomultiplicateurs. Une technique de corrélation croisée est employée pour lier le TOF mesuré entre les deux détecteurs aux différents passages de particules. Les particules de diamètre inférieur à 20 µm sont détectées par une mesure du temps de vol (TOF). Les particules de diamètre compris entre 20 µm et 100 µm sont analysées en combinant une mesure du temps de vol (TOF) et du temps de résidence (TIB). Les particules de diamètre supérieur à 100 µm traversent simultanément les deux faisceaux laser et leur mesure est réalisée par la détermination de leur temps de résidence (TIB) entre les faisceaux.

La deuxième différence entre l'Aerosizer et l'APS réside dans la méthode de mesure du TOF : une horloge pour l'APS contre 4 pour l'Aerosizer offrant un bruit de fond uniforme. L'Aerosizer permet de mesurer des diamètres aérodynamiques dans une gamme plus importante de 0,2 à 200 µm.

Il existe néanmoins d'importantes limites pour ces instruments parce que le mouvement des particules est en dehors du régime de Stokes. La densité est assez bien prise en compte, mais le plus contraignant est le problème de la non sphéricité des particules. Les particules modérément non sphériques, ayant un paramètre de ratio axial d'environ 2:1, peuvent conduire à des erreurs de mesure de taille de l'ordre d'un facteur deux.

Les résultats obtenus à l'aide de ces deux techniques sont récapitulés dans le tableau ci-dessous (Tableau 3-1)

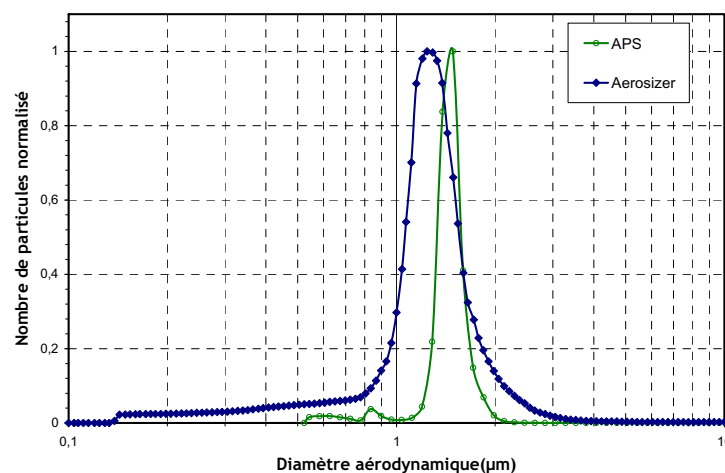
**Tableau 3-1 Récapitulatif des mesures des diamètres aérodynamiques**

Type de poudres	APS			Aerosizer		
	Geo. Mean GMD (µm)	Geo. Std. Dev. (GSD)	Mode (µm)	Geo. Mean GMD (µm)	Geo. Std. Dev. (GSD)	Mode (µm)
Monospher 1000	1,19	1,44	1,41	1,24	1,41	1,25
SiC	1,25	1,60	1,04	0,90	1,68	1,09
AKE42	1,34	1,55	1,08	1,05	1,67	1,18
AKE46	1,45	1,52	1,49	1,09	1,72	1,22

$$\text{Avec } GMD = \exp \left[ \frac{\sum n \ln(d_i)}{N} \right]; \quad GSD = \exp \left[ \frac{\sum n (\ln(d_i) - \ln(GMD))^2}{N} \right]^{1/2}; \quad \text{Mode} = d_i(n_{\max})$$

Les écarts observés sont liés à la non sphéricité des particules et à l'orientation privilégiée des particules.

Les Fig. 3-21, Fig. 3-22 et Fig. 3-23 présentent les distributions en taille des poudres obtenues avec l'APS et l'Aerosizer. Elles montrent une faible divergence entre les mesures. L'APS surestime le diamètre aérodynamique des aérosols par rapport à l'Aerosizer. Les travaux de (Marshall et al., 1991) ont montré que le diamètre aérodynamique des particules ayant un facteur de forme de 1,19 était sous-estimé de 25 % par l'APS. De plus, l'effet de la densité et du facteur de forme sur la réponse des instruments est plus grand sur l'Aerosizer que l'APS. Les travaux de Cheng et al. (1993) ont montré que le diamètre aérodynamique des particules non sphériques mesuré par l'Aerosizer pouvait-être sous-estimé de 20 % à 30 %.



**Fig. 3-21 Distribution en nombre des particules de Monospher 1000 pour l'APS et l'Aerosizer**

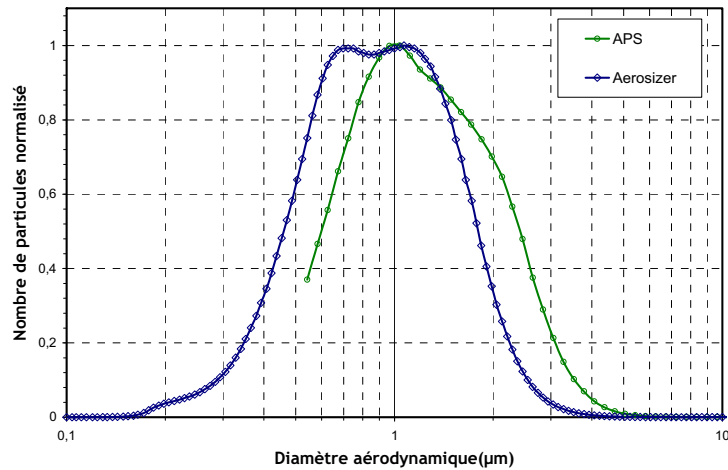


Fig. 3-22 Distribution en nombre des particules de SiC pour l'APS et l'Aerosizer

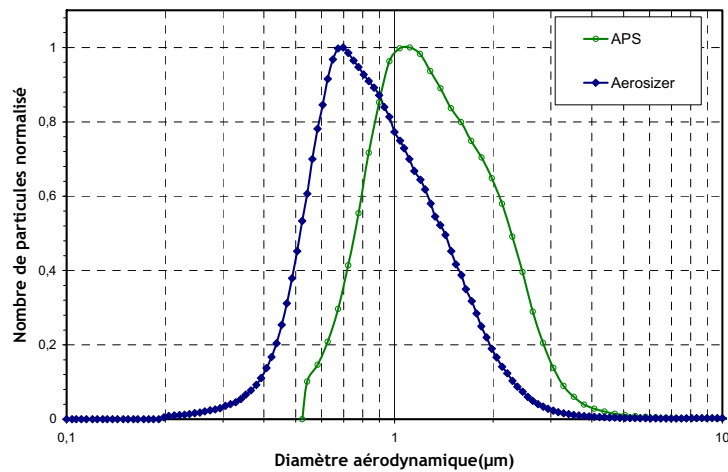


Fig. 3-23 Distribution en nombre des particules de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (AK42) pour l'APS et l'Aerosizer

Le choix des aérosols se porte donc sur des particules de SiC pour nos essais dans l'enceinte TOSQAN. Ces particules sont bien adaptées aux conditions thermohydrauliques relatives aux essais et leur distribution granulométrique présente une similitude avec les caractéristiques physiques en terme de diamètre aérodynamique des produits de fission (de taille inférieure à 5 μm) sous forme aérosol émis dans l'enceinte de confinement lors d'un accident grave (Femandjian, 1984; Powers et Burson, 1993b). Les aérosols de taille supérieure à 5 μm sont très rapidement rabattus par le spray. Quant aux particules de Monopsher 1000 (de SiO<sub>2</sub>), elles serviront à vérifier la calibration du granulomètre WELAS (cf. §3.3.2.1).

### 3.3.2. LA CARACTERISATION DES AEROSOLS EN SUSPENSION IN SITU DANS TOSQAN

Dans cette partie, le granulomètre optique WELAS est décrit ainsi que les contraintes associées à son utilisation sur l'expérience TOSQAN. Une étude préliminaire effectuée en vue de son utilisation et de son implantation sur l'enceinte TOSQAN est présentée en annexe.

Pour terminer, la qualification de la mesure des aérosols en suspension dans le gaz avec ce dispositif est réalisée.

### 3.3.2.1. Le Granulomètre WELAS

#### Descriptif

Le granulomètre WELAS (WhitE Light Aerosol Spectrometer mod. 2100, PALAS©, Fig. 3-24) permet de mesurer simultanément la concentration et la taille de particules en suspension dans un gaz porteur traversant une cellule de mesure. Cette cellule de mesure a été conçue de sorte à ce que l'échantillon qui la traverse puisse être thermodynamiquement identique à celui prélevé. Ainsi, elle peut résister à une pression de 7 bar et sa température peut être régulée jusqu'à 120 °C. Pour une utilisation à la pression atmosphérique, une pompe permet d'imposer un débit de 5 L.min<sup>-1</sup> dans la cellule de mesure. Pour les mesures réalisées en pression dans TOSQAN cette pompe n'est pas utilisée mais un système d'échantillonnage du mélange gazeux, décrit dans la partie 3.3.2.2, a été conçu.

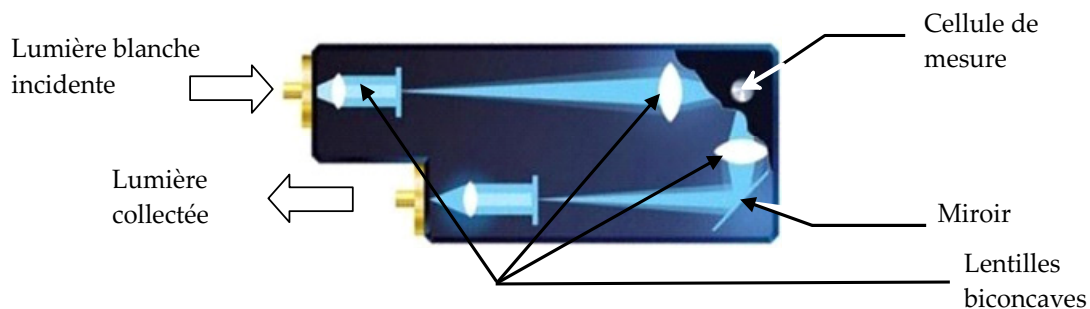


Fig. 3-24 Vue schématique du granulomètre WELAS

#### Principe de fonctionnement

Le granulomètre WELAS utilise le principe de la diffusion à 90° de la lumière blanche pour mesurer la concentration et le diamètre des particules (0,18 µm à 40 µm) en suspension dans un gaz.

Le principe de la mesure est simple, une source de lumière blanche émise par une lampe au xénon crée, à l'aide de deux lentilles biconcaves, un volume de mesure uniformément éclairé en lumière blanche. Les particules traversant ce volume de mesure diffusent du signal dans toutes les directions et celui-ci est collecté à un angle de 90°. Ce signal est focalisé dans une fibre optique à l'aide d'un jeu de deux lentilles et d'un miroir. Cette fibre optique achemine le signal ainsi collecté jusqu'à un photomultiplicateur qui mesure en temps réel l'intensité lumineuse du signal diffusé par les aérosols.

Des courbes théoriques nous permettant d'établir la relation entre l'intensité du signal collecté et la taille de la particule sont établies à l'aide de la théorie de Lorentz-Mie. De plus, le nombre de pulses lumineux mesurés par le photomultiplicateur par unité de temps ( $N_{aérosol}$ ) nous permet de remonter à la concentration en aérosols ( $C_{aérosol}$ ) :

$$C_{aérosol} = \frac{N_{aérosol}}{Q_{prel}}$$

Les compteurs optiques de particule à lumière blanche n'ont pas les grandes résonances de Mie des spectromètres à laser et montrent une seule correspondance entre le diamètre d'une particule et la hauteur de l'impulsion diffusée ((Liu et al., 1985; Schumann, 1990; Friehmelt et Heidenreich, 1999;

Quinten et al., 2001). La méthode d'inversion des signaux n'est pas précisée par le constructeur mais elle est basée sur une courbe de calibration paramétrée avec l'indice et le facteur de forme des particules.

Les courbes (Fig. 3-25, Bild 1 à 4) montrent qu'un dispositif de mesure qui fonctionne avec la lumière d'un laser (monochromatique) fournit une courbe d'étalonnage non biunivoque entre la taille des particules proches de la longueur d'onde et l'intensité dans la longueur d'onde de la lumière.

En revanche, l'utilisation de la lumière blanche et la collection du signal diffusé à un angle de 90° (Fig. 3-25, Bild 5) garantit l'univocité des courbes de calibration et donc la non ambiguïté des résultats obtenus pour des particules dont le diamètre est différent de la longueur d'onde incidente. Une étude (Liu et Daum, 2000) a montré l'effet de l'indice de réfraction et la nécessité de connaître précisément celui des particules pour minimiser les sources d'erreur des compteurs optiques de particules.

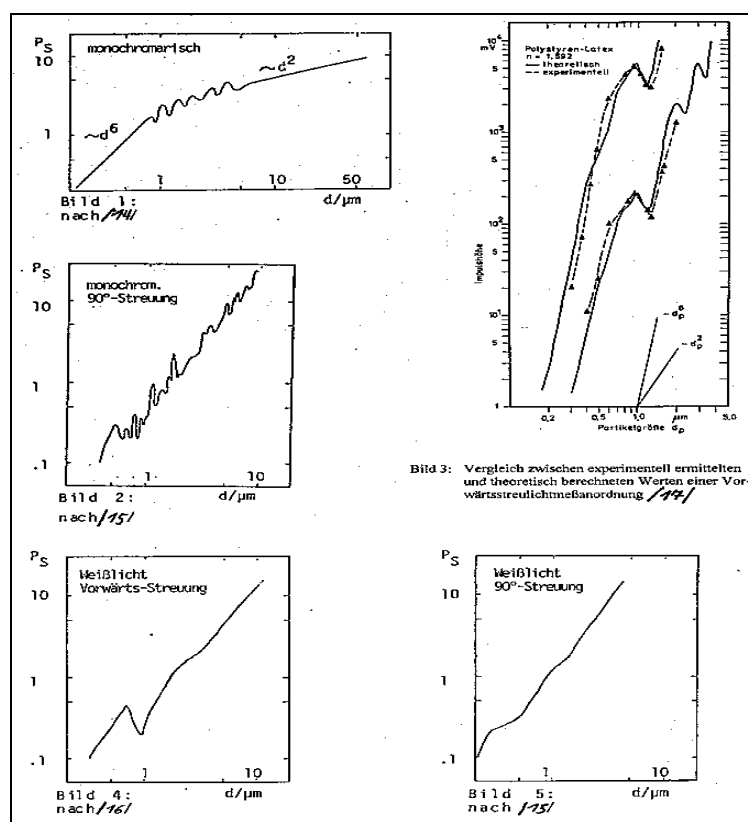


Fig. 3-25 Courbes de réponse (Mölter et Keßler, 2004)

Pour contrôler la calibration afin de déterminer la taille des particules en fonction de la courbe de calibration utilisée, des particules sphériques de SiO<sub>2</sub> de diamètre connu (Monospher 1000 de diamètre 1 μm) sont utilisées. Cette courbe de calibration établit la correspondance entre l'intensité de la lumière diffusée, la taille et l'indice de réfraction de la particule. En prenant comme hypothèse que les particules se rapprochent de sphéroïde, il est alors possible de déterminer la distribution en taille à partir de l'évaluation de l'intensité de la lumière diffusée en effectuant une comparaison avec une courbe de calibration calculée par la théorie de Mie (1908).

L'avantage d'une technique de mesure par comptage particule par particule par rapport à une technique collective par est que la mesure du nombre et de la dimension des particules s'effectue de manière séparée mais simultanée. En effet, la détermination quantitative (en nombre) et la détermination de la taille (diamètre équivalent) sont faites en même temps sans s'influencer. C'est l'une des conditions



les plus importantes pour une analyse à haute résolution. En outre, la configuration du volume de mesure optique associée à un traitement spécifique des signaux permettent de détecter des coïncidences.

En effet, la géométrie en forme de « T » du volume de mesure (Fig. 3-26) permet de déterminer la taille des particules et leur nombre jusqu'à des concentrations élevées pratiquement sans effet de bord (ou erreurs de bord). L'arrangement de deux ouvertures perpendiculaires en « T » projette un volume de mesure formé de deux cubes de taille différente. Si une particule (P1) traverse les deux volumes (A et B), sa taille est alors mesurée exactement et augmente d'une unité le nombre de particules dans la classe de taille correspondante. Si une particule (P2) traverse uniquement le grand volume (A), le comptage est alors rejeté.

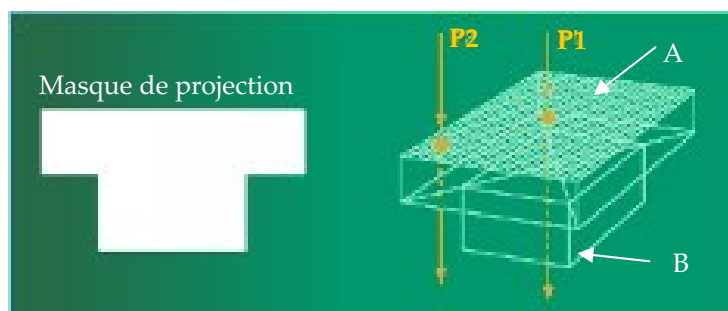


Fig. 3-26 Volume de mesure du WELAS

Les signaux collectés sont envoyés à l'unité d'évaluation pour traitement par l'intermédiaire d'une fibre optique permettant la délocalisation de l'unité de mesure.

Ce spectromètre, de grande précision avec une haute résolution, permet d'avoir une grande flexibilité pour son implantation sur l'enceinte TOSQAN.

### Contraintes

Umhauer (2000) a montré que des mesures en température et pression étaient possibles avec les compteurs optiques de particules et Schumann (1990) qu'elles étaient réalisables dans une atmosphère présentant une haute humidité relative. Mais des contraintes existent encore pour notre granulomètre WELAS.

#### Limites de mesure de l'appareil :

La concentration maximum de particules mesurables est de  $10^5$  particules.cm<sup>-3</sup>.

#### Remarque importante lors des mesures :

- La taille du volume de mesure est imposée optiquement et ne peut pas être changée.
- La vitesse correspondante des particules est fixe et ne doit pas être changée.
- $T_{\min}$  est le temps de vol minimal accordé à une particule pour être comptée. Il est lié au volume de gaz qui traverse le volume de mesure et ne doit pas être changé.
- La masse volumique de l'aérosol à caractériser est une donnée à entrer dans le logiciel de traitement des données (approprié pour le calcul postérieur de la masse).

Le débit volumique de gaz dans la sonde de mesure doit être imposé à 5 L.min<sup>-1</sup> quelles que soient les caractéristiques du mélange gazeux. C'est une des **contraintes les plus fortes** au niveau de

l'implantation sur TOSQAN, pour réaliser mesures en conditions représentatives de l'accident grave où les conditions thermohydrauliques évoluent au cours de l'essai.

La faisabilité des mesures est présentée en Annexe 4.

### **3.3.2.2. Dimensionnement du système de prélèvement d'aérosols en suspension et implantation sur TOSQAN du WELAS**

Afin d'implanter les sondes de mesure du granulomètre WELAS sur l'installation TOSQAN et de réaliser des mesures à différents points dans l'enceinte, des lignes de prélèvement ont été dimensionnées en fonction des contraintes expérimentales et des caractéristiques du granulomètre optique (Lemaitre et al., 2007b) (cf. § 3.3.2).

#### **Contraintes en vue de l'implantation sur TOSQAN**

- Le système doit être installé sur les brides existantes de l'enceinte TOSQAN. Il doit être facilement déplaçable d'une bride à l'autre (pour réaliser des mesures à différent niveau de l'enceinte).
- L'échantillon gazeux prélevé dans l'enceinte doit être maintenu en température jusqu'à son rejet à l'air libre, afin d'éviter tout risque de condensation de la vapeur dans la ligne de prélèvement et dans la cellule optique du granulomètre WELAS.
- La buse de prélèvement doit être protégée de l'impact des gouttes d'eau issues de l'aspersion.
- Le débit volumique de prélèvement doit être constant égal à 5 L.min<sup>-1</sup> quelles que soient la pression dans l'enceinte et la composition du mélange gazeux (ceux-ci évoluant en cours d'essai).

#### **Dimensionnement et implantation de la ligne de prélèvement**

L'objectif recherché est que le système de prélèvement résiste aux contraintes de pression et d'humidité subies au cours d'un essai et d'obtenir un prélèvement le plus représentatif comme présenté.

La mise en place d'un système de régulation du débit volumique (quelques soit la composition du mélange gazeux) est nécessaire aux mesures fiables (cf. § 3.3.2). Il est réalisé à l'aide d'un débitmètre à micro-hélice et d'une vanne de régulation régulée en fonction du débit dans la ligne de prélèvement. Cette ligne de prélèvement est constituée par un tube inséré dans un « doigt de gant » (Fig. 3-27). Le système de chauffage et les thermocouples font alors partis du milieu extérieur à l'enceinte TOSQAN, ce qui permet de s'affranchir des contraintes d'humidité et de pression de l'ambiance de l'enceinte TOSQAN. Le système de chauffage est réalisé par 3 systèmes indépendants, un pour la canne située à l'intérieur de l'enceinte et deux pour la ligne située à l'extérieur. Les cordons chauffants avec tissus isolants enroulés autour de la conduite permettent un chauffage régulé (de 20 °C à 150 °C) en fonction des indications issues des thermocouples de la ligne de prélèvement. Ceci permet d'éviter la condensation de la vapeur dans la ligne ainsi que de limiter les dépôts par effets de thermophorèse et diffusiophorèse afin de garder un prélèvement représentatif. De plus, un déflecteur disposé au niveau de la buse de prélèvement à été installé pour ne pas « arroser » l'extrémité du point de prélèvement. Il faut noter que l'encombrement du système est le plus faible possible ce qui lui permet d'être mobile pour être installé sur différentes brides de l'installation.

Ensuite, une étude a consisté à dimensionner la tête de prélèvement afin que l'échantillon prélevé soit le plus représentatif possible (cf. Annexe 3).

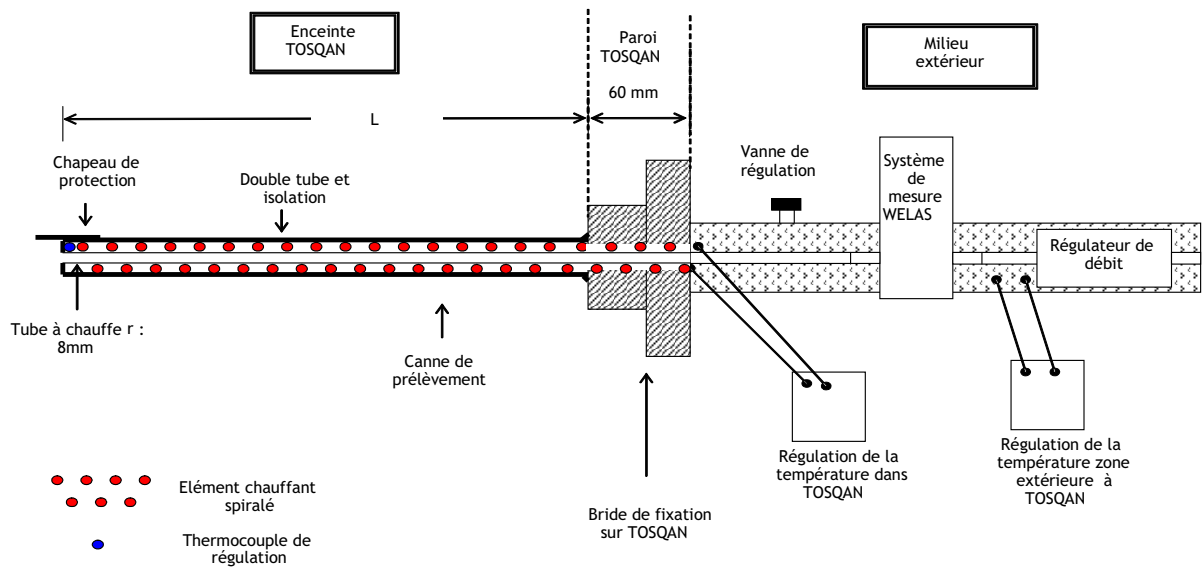


Fig. 3-27 Schéma général du système de prélèvement (Rochas, 2006)

Le point crucial du système de prélèvement est l'étanchéité au niveau de la tête de prélèvement pour éviter les fuites du mélange gazeux qui pourraient détériorer les cordons chauffant disposés autour du tube de prélèvement. Une vue détaillée de l'extrémité de la ligne de prélèvement est présentée sur la (Fig. 3-28).

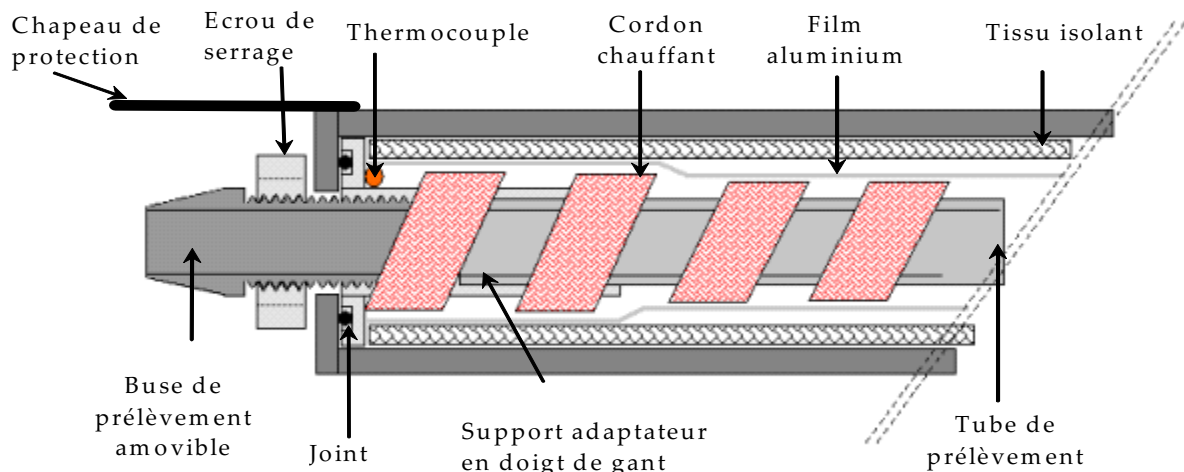


Fig. 3-28 Schéma du raccord choisi - Canne démontable (Rochas, 2006)

Une vue générale du système de prélèvement mis en place sur l'installation TOSQAN à l'altitude  $Z = -2900$  mm (Z14) est présentée sur la Fig. 3-29.

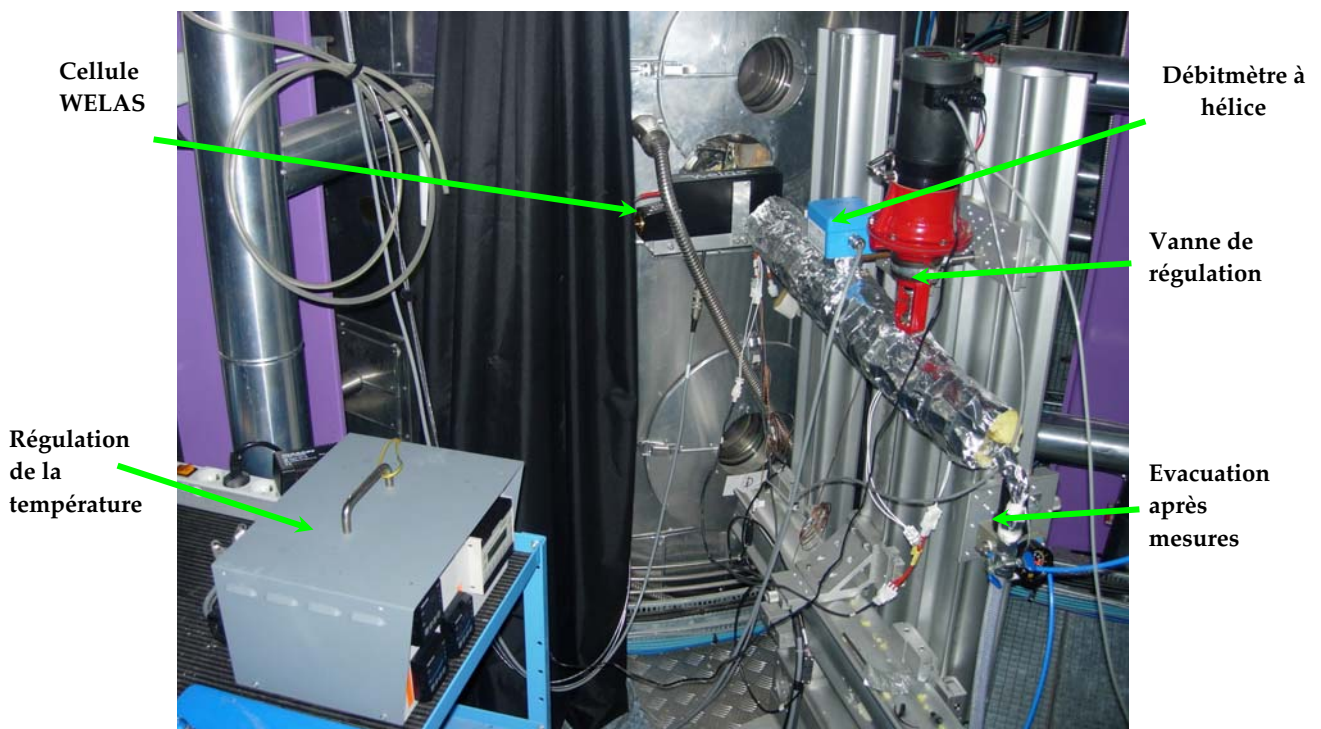


Fig. 3-29 Vue extérieure du système de prélèvement implanté sur TOSQAN (Z14)

L'implantation sur TOSQAN a donc eu lieu aux niveaux Z5 et Z14 sur les tapes initialement prévues pour l'implantation des cannes de spectrométrie de masse (Fig. 3-12 et Annexe 1).

### **3.3.2.3. Qualification de la mesure des aérosols en suspension dans le gaz - Mesures comparatives APS/WELAS en série**

Une étude (Friedmelt et Heidenreich, 1999) a montré qu'il était possible de calibrer, pour des particules sphériques, un compteur optique de particules avec l'aide d'un dispositif APS. Les particules utilisées lors des essais n'étant pas sphériques, nous comparerons les résultats fournis par le granulomètre optique WELAS à ceux de l'APS afin d'estimer le facteur permettant de corriger le diamètre optique des particules mesurées par le granulomètre WELAS. Pour cela et afin de qualifier la ligne de prélèvement et le granulomètre WELAS dans TOSQAN, des mesures comparatives ont été réalisées en utilisant simultanément les systèmes APS (cf. §3.3.1.2) et WELAS (cf. §3.3.2.1) disposés en série. Les essais s'effectuent dans TOSQAN à température ambiante et pression atmosphérique (limitation imposées par l'APS) (Fig. 3-30).

Ces mesures ont été réalisées successivement avec des aérosols de Monospher 1000 et les aérosols de SiC injectés dans l'enceinte TOSQAN, dans le gaz au repos.

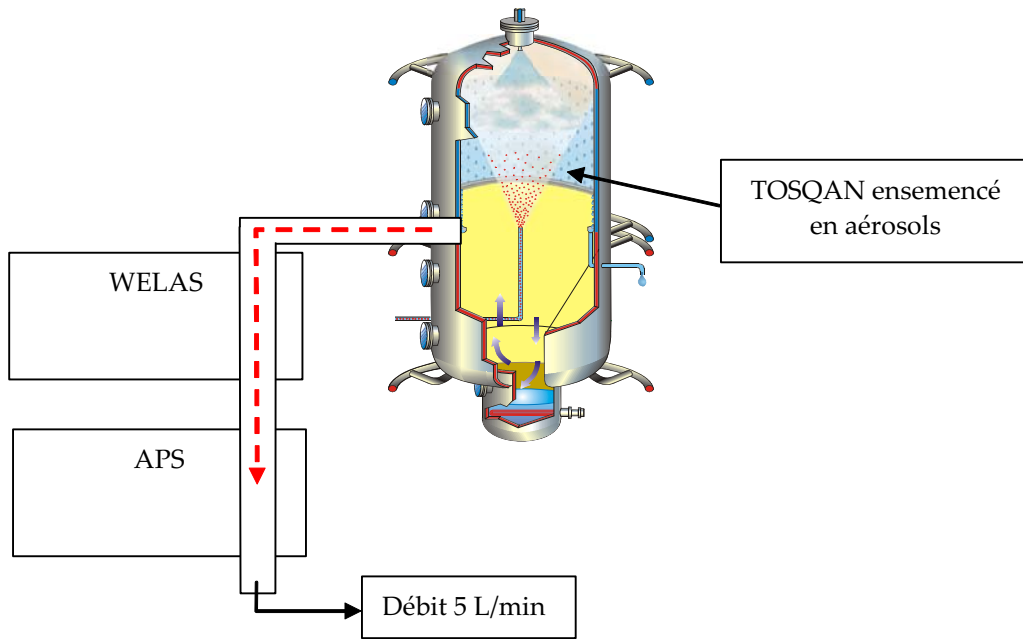


Fig. 3-30 Schéma des dispositifs APS/WELAS mis en série sur TOSQAN

Les caractéristiques des aérosols de Monospher 1000 et de SiC sont présentées dans le Tableau 3-2.

Tableau 3-2 Récapitulatif des mesures des aérosols (APS/WELAS)

Type de d'aérosols	APS $d_{aerodynamique}$				WELAS $d_{optique}$			
	Geo. Mean GMD ( $\mu\text{m}$ )	Geo. Std. Dev. (GSD)	Mode ( $\mu\text{m}$ )	$d_{a,mean}$ ( $\mu\text{m}$ )	Geo. Mean GMD ( $\mu\text{m}$ )	Geo. Std. Dev. (GSD)	Mode ( $\mu\text{m}$ )	$d_{1,0}$ ( $\mu\text{m}$ )
Monospher 1000	1,46	1,19	1,38	1,48	0,96	1,44	0,84	1,03
SiC	1,01	1,51	0,72	1,11	0,89	1,82	0,72	1,06

$$\text{Avec } GMD = \exp\left[\frac{\sum n \ln(d_i)}{N}\right]; \quad GSD = \exp\left[\frac{\sum n(\ln(d_i) - \ln(GMD))^2}{N}\right]^{1/2}; \quad \text{Mode} = d_i(n_{\max})$$

Les mesures brutes fournies par l'APS et le WELAS présentent logiquement des divergences étant donné que l'APS mesure un diamètre aérodynamique ( $d_a$ ), qu'il faut convertir pour une comparaison avec le diamètre optique fourni par le granulomètre WELAS ( $d_p$ ).

Nous utilisons la formule d'approximation proposée par Hinds (1999) avec la simplification d'un coefficient de Cunningham qui tend vers 1 pour les particules étudiées ( $C_u$  du quartz = 1,08) :

$$d_p = d_a \left( \frac{\rho_0}{\rho_p} \right)^{1/2} \quad \text{Eq. (3.2)}$$

Avec  $\rho_0$  et  $\rho_p$  respectivement les masses volumiques de l'eau et des particules.

Le Tableau 3-3 montre que pour des sphères parfaites (Monospher 1000), les réponses du granulomètre WELAS et de l'APS sont cohérentes.

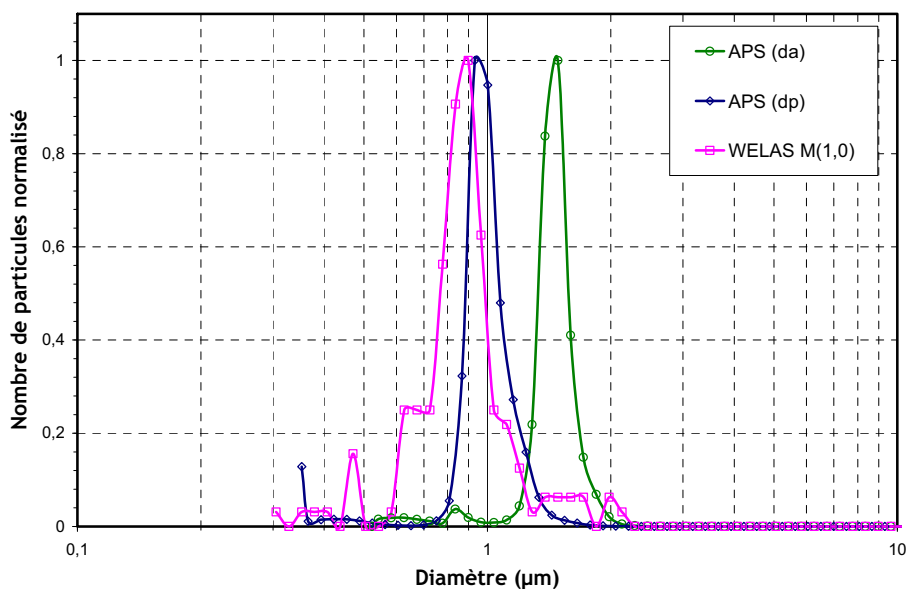
En revanche pour les particules de SiC, il est nécessaire d'appliquer un coefficient de correction de 1,7 entre les mesures du diamètre moyen ( $d_{p,mean}$ ) donné par l'APS et celui donné par le WELAS. Ceci est principalement dû à la technique de mesure de chaque dispositif qui est différente de par sa méthode de mesure pour prendre en compte la non sphéricité des aérosols.

**Tableau 3-3 Comparaison des diamètres et des coefficients correcteurs**

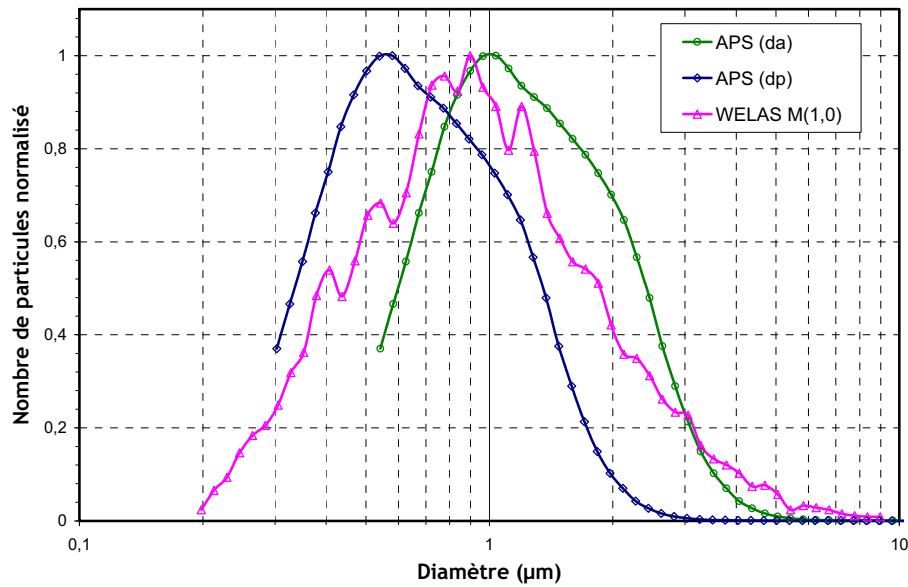
	$d_{p,mean}$ (APS)	$d_{p,mean}$ (WELAS)	$\frac{d_{p,mean} \text{ (WELAS)}}{d_{p,mean} \text{ (APS)}}$
Monospher 1000	0,99	1,03	1,04
SiC	0,62	1,06	1,70

Ensuite sur les Fig. 3-31 et Fig. 3-32, les distributions granulométriques sont présentées pour les aérosols de Monospher1000 et de SiC. Elles montrent la bonne concordance des mesures entre l'APS et le WELAS pour les aérosols de Monospher 1000 sauf pour les classes de taille les plus petites pour lesquelles la limite inférieure de la mesure du granulomètre WELAS est atteinte.

En revanche la différence observée dans les tableaux Tableau 3-2 et Tableau 3-3 pour les aérosols de SiC est mise en évidence indiquant le facteur correctif.



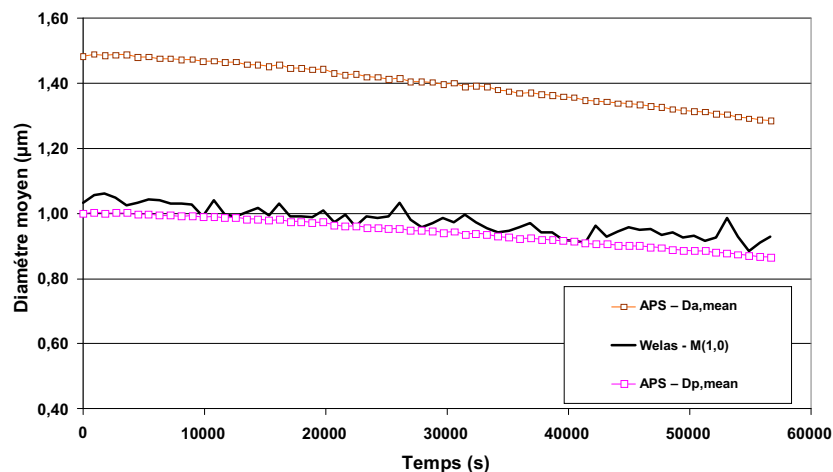
**Fig. 3-31 Distribution en nombre normalisé des aérosols de Monospher 1000 pour l'APS et le WELAS**



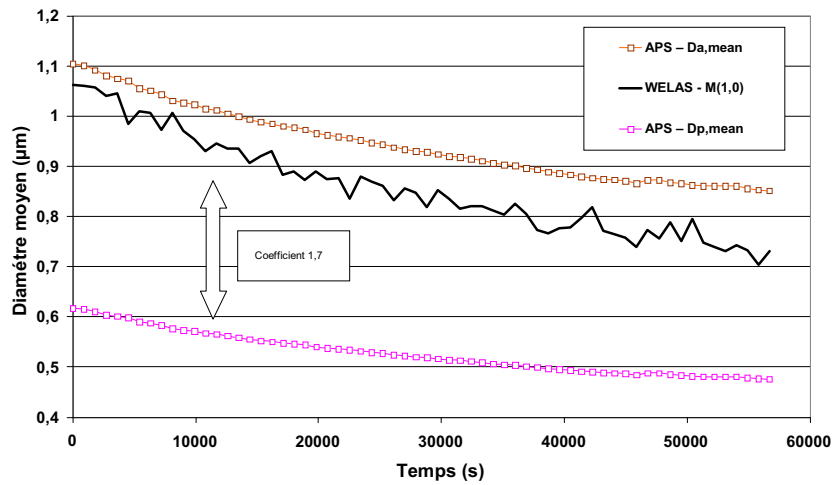
**Fig. 3-32 Distribution en nombre normalisé des aérosols de SiC pour l'APS et le WELAS**

Les mesures présentées sur les courbes suivantes (Fig. 3-33 et Fig. 3-34) ont été réalisées en continu pendant une nuit afin de pouvoir comparer l'évolution temporelle de la réponse des systèmes APS et WELAS mis en série, pour la caractérisation des particules de Monospher 1000 et de SiC.

On peut remarquer sur la Fig. 3-33 que l'écart entre le diamètre mesuré par l'APS et celui mesuré par le WELAS est inférieur à 5 % pour les aérosols sphériques Monospher 1000. En revanche, comme le montre la Fig. 3-34, pour les aérosols de SiC on retrouve bien en moyenne le coefficient de conversion de 1,7 entre les mesures WELAS et APS. Ce coefficient tend à diminuer vers la fin de l'essai due à l'atteinte d'un nombre trop faible de particules qui ne permet pas statistiquement une mesure fiable avec le WELAS.



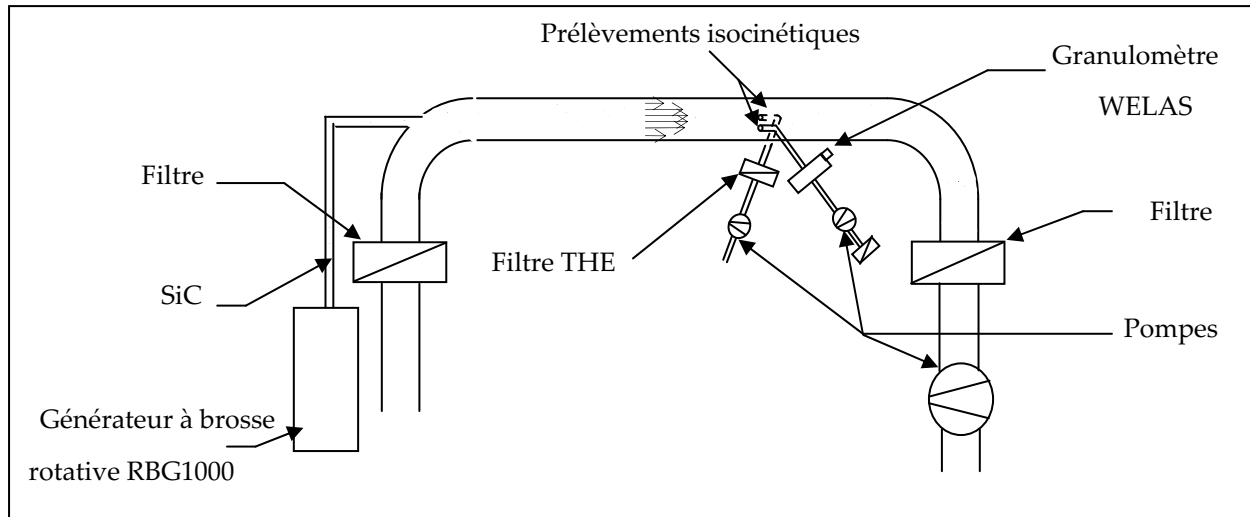
**Fig. 3-33 Evolution des diamètres moyens mesurés pour le Monospher 1000 par l'APS et le WELAS**



**Fig. 3-34 Evolution des diamètres moyens mesurés pour le SiC par l'APS et le WELAS**

Pour terminer la qualification du dispositif de mesure des aérosols en suspension dans le gaz, des expériences dédiées à la validation de la mesure de concentration massique du granulomètre WELAS ont ainsi été réalisées sur le banc d'essai VEGA du SERAC (Lemaitre et al., 2007b).

La procédure expérimentale de cette qualification est simple. La veine d'essai Vega (Fig. 3-35) estensemencée en continu à l'aide d'aérosols de carbure de silicium. Une pompe aspirante impose un écoulement dans la veine d'essai et enfin deux prélèvements isocinétiques sont effectués, chacun à un débit de 5 L.min<sup>-1</sup>. L'un de ces prélèvements est analysé par le granulomètre WELAS, l'autre est filtré à l'aide d'un filtre très haute efficacité afin d'être pesé.



**Fig. 3-35 Schéma de principe de la validation de la concentration massique mesurée par le granulomètre WELAS (Lemaitre et al., 2007b)**

Différents essais sont ainsi réalisés, sur des périodes d'échantillonnage allant de 1000 à 12000 s. Enfin, la masse mesurée par le granulomètre WELAS est comparée à la masse pesée sur le filtre.

Le granulomètre WELAS mesure le diamètre de chaque aérosol ( $d_{aéro}$ ) passant dans son volume de mesure.

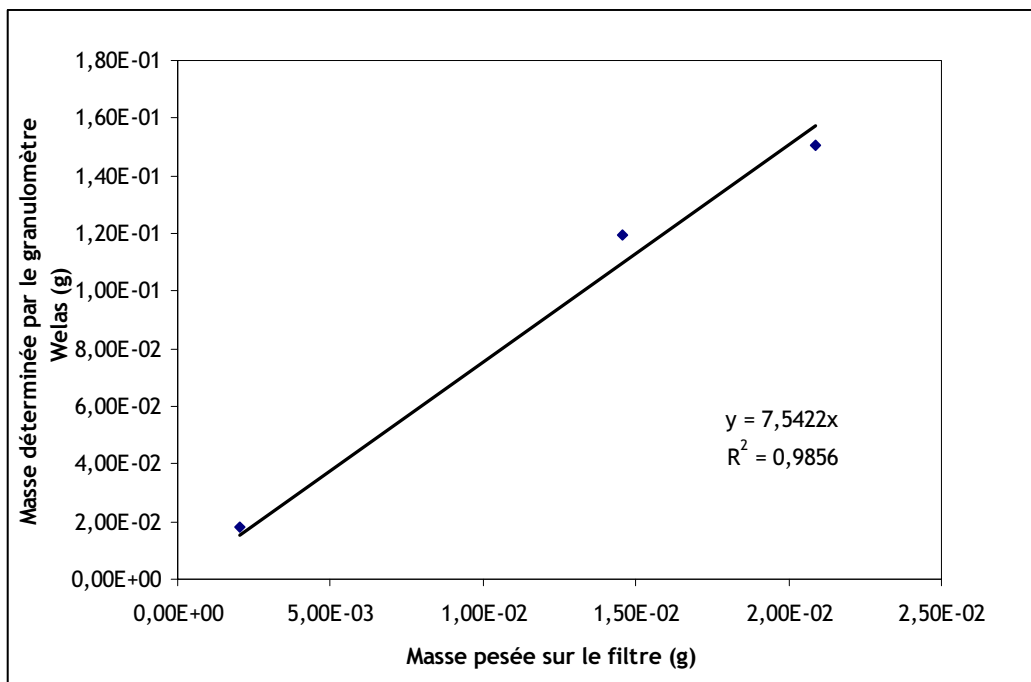


$$d_{30} = \frac{\int_0^{\infty} d^3 f(d) dd}{\int_0^{\infty} f(d) dd}$$

Dans cette équation, le terme  $f(d)$  représente la fonction de distribution des aérosols en nombre. Nous déduisons ainsi la masse totale d'aérosols ( $m_{aéro}$ ) traversant la cellule de mesure.

$$m_{aérosol} = N_{aérosol} \rho_{SiC} \frac{\pi}{6} d_{30}^3$$

L'ensemble des mesures réalisées est présenté sur la Fig. 3-36.



**Fig. 3-36 Comparaison de la masse pesée sur le filtre et de celle déduite de la mesure du granulomètre WELAS**

Cette figure présente une forte différence entre ces deux mesures. En effet, la masse mesurée par le granulomètre WELAS est 7,5 fois supérieure à la masse d'aérosols pesée sur filtre. Il convient ainsi d'appliquer ce facteur correctif à la mesure massique obtenue avec le granulomètre WELAS pour déterminer par exemple la masse initiale en suspension dans TOSQAN. Cette différence est attribuée à la morphologie des aérosols de SiC.

Cette correction est aussi appliquée au diamètre massique équivalent volume des aérosols, chaque classe d'aérosol est donc divisée par un facteur correctif  $\alpha = \sqrt[3]{7,5}$ .

Les mesures, corrigées, sur les aérosols de SiC ont montré un bon accord par rapport dispositif de mesure de référence qu'est l'APS. Ceci permettra d'utiliser notre dispositif de mesure : ligne de prélèvement associé au granulomètre WELAS, pour la caractérisation des aérosols de SiC en suspension dans l'enceinte TOSQAN au cours des essais.

Dans la suite de la thèse deux corrections des mesures WELAS seront nécessaire :

- Le diamètre des aérosols  $d_p$  mesuré par le granulomètre WELAS sera corrigé de la façon suivante :

$$d_p = d_{p,mesuré} \times 1,7 \quad \text{Eq. (3.3)}$$

- La masse sera corrigée et recalculée à partir du diamètre équivalent volume à l'aide d'un facteur correctif  $\alpha = \sqrt[3]{7,5}$ .

### **3.3.3. LA CARACTERISATION DES AEROSOLS COLLECTES PAR LES GOUTTES DE L'ASPERSION IN SITU DANS TOSQAN : LA TURBIDIMETRIE**

Une technique de turbidité est utilisée pour déterminer la masse d'aérosols collectée par les gouttes (Hofmann et Dominik, 1995; Telesnicki et Goldberg, 1995). La turbidité est un paramètre organoleptique qui mesure le trouble de l'eau. Elle est due aux particules colloïdales ou en suspension dans l'eau. Dans ce paragraphe est décrit un prototype de néphélomètre employé comme turbidimètre en ligne pour des mesures de concentration massique d'aérosols collectés par les gouttes. Ce prototype réalisé par la société EFS, est basé sur la mesure NTU qui est une méthode néphélométrique actuellement normalisée pour mesurer la turbidité de l'eau (Lemaitre et al., 2007b).

#### **Description de la technique**

La mesure de la turbidité permet d'évaluer la "limpidité relative" de l'eau. Elle n'est donc pas une mesure directe de la quantité des particules en suspension, mais plutôt une mesure de leur effet sur la l'atténuation de la diffusion sur la lumière.

Il existe deux principes normalisés<sup>8</sup> de mesure en continu de la turbidité, la néphélométrie et l'opacimétrie.

Les turbidimètres basés sur le principe de l'**opacimétrie** ne possèdent qu'un photodétecteur mesurant la lumière transmise à 180°, c'est-à-dire son absorption par les matières en suspension. Ils conviennent à la mesure de fortes turbidités (> 60 NTU).

Les turbidimètres utilisant le principe de la **néphélométrie** sont constitués d'une source lumineuse et d'un photodétecteur qui mesure la diffusion à 90° (Fig. 3-37 mod. 1). Cette diffusion est surtout liée aux matières en suspension et elle dépend de la taille, de la forme et de l'indice de réfraction des particules ainsi que de la longueur d'onde de la lumière incidente. Les substances potentiellement dissoutes agissent très peu sur ce coefficient de diffusion. Ces systèmes sont destinés à la mesure de faibles ou de moyens niveaux de turbidité (24 < NTU < 60).

Pour s'affranchir de la coloration de l'eau et étendre la gamme de mesure des concentrations, un deuxième photodétecteur est installé pour mesurer la lumière transmise à 180° (Fig. 3-37 mod. 2).

---

<sup>8</sup> NF EN ISO 7027 de Mars 2000 AFNOR (2000)

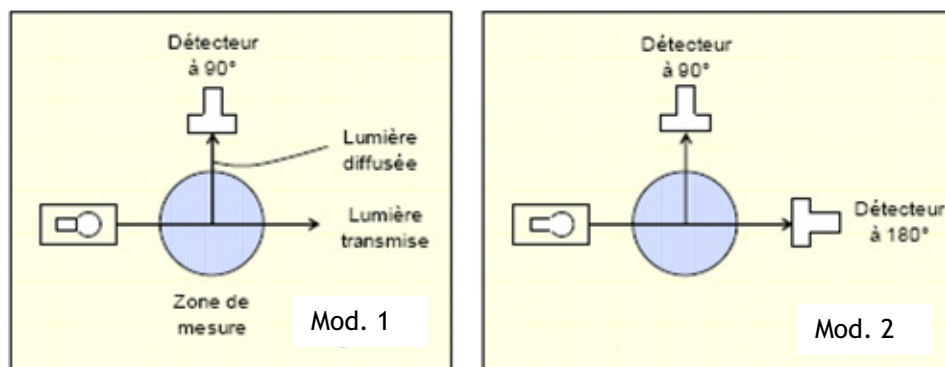


Fig. 3-37 Schéma des dispositifs de turbidité Mod. 1 et Mod. 2

Les aérosols en suspension dans l'enceinte sont collectés par les gouttes d'aspersion et sont ainsi transportés jusqu'au puisard via l'écoulement de l'eau d'aspersion. Cette eau est évacuée au fur et à mesure qu'elle est injectée, au niveau de la partie inférieure du puisard afin d'éviter son accumulation dans l'enceinte. Le système de turbidimétrie basé sur le principe de la **néphélométrie** en ligne a une résolution temporelle de 1 s. Cette mesure globale intègre la masse des aérosols collectés et rabattus par l'ensemble des gouttes du spray, mais elle intègre aussi la masse des aérosols qui rejoint l'eau d'évacuation du puisard par d'autres phénomènes : drainage initial, ruissellement sur les parois pouvant être recouvertes d'aérosols, sédimentation. Le drainage initial induit un biais sur les premières secondes de mesure. Quant au ruissellement sur les parois, l'angle de spray choisi pour nos essais est tel que ce phénomène est négligeable. Enfin la sédimentation devient négligeable à partir du moment où le spray est déclenché.

#### Implantation, description et principe du système de turbidimétrie en ligne

Le turbidimètre en ligne a été implanté sur la canalisation verticale qui permet l'évacuation de l'eau du puisard (Fig. 3-38). Le système d'évacuation automatique de l'eau du puisard est décrit dans (Brun et al., 2005). Le système de régulation assure un niveau d'eau constant dans la canalisation qui permet la vidange du puisard afin de s'assurer que la cellule de mesure du turbidimètre est toujours remplie d'eau. Le système de turbidimétrie est présenté sur la Fig. 3-39.

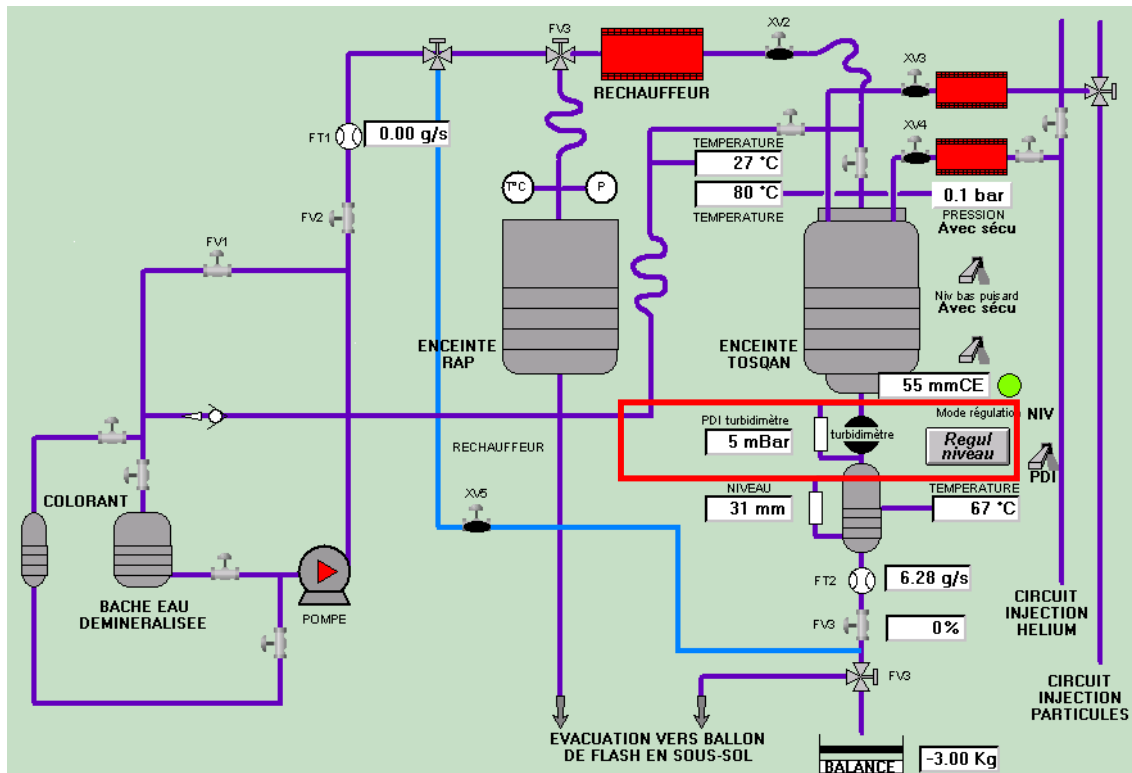


Fig. 3-38 Schéma de la vue aspersion de TOSQAN

Le turbidimètre est composé d'un corps cylindrique dont l'axe de révolution est colinéaire à la composante de vitesse principale de l'écoulement liquide parcourant la canalisation (Fig. 3-39).

Trois sondes viennent se visser sur ce corps :

- la sonde d'émission qui comprend une diode laser infra rouge de puissance 10 mW,
- la sonde de diffusion positionnée perpendiculairement à la sonde d'émission, qui, via une photo diode, mesure l'intensité du signal lumineux diffusé par les particules en suspension dans l'eau éclairées par la diode laser ( $I_{diffusion}$ ),
- la sonde de transmission positionnée dans l'axe de la sonde d'émission, qui, via une photo diode, mesure l'atténuation de l'intensité du signal lumineux transmis par la diode laser d'émission ( $I_{transmission}$ ), après que celui-ci ait traversé la cellule de mesure contenant l'eau d'évacuation chargée en particules.

La turbidité (T) est calculée à partir des tensions recueillies au niveau des sondes de transmission et de diffusion à partir de la relation suivante :

$$T = k \frac{I_{diffusion}}{I_{transmission}} \quad \text{Eq. (3.4)}$$

Avant l'essai, un étalonnage est effectué avec deux solutions aqueuses contenant une concentration massique en particules de SiC connue, ce qui permet de déterminer le facteur de corrélation reliant la valeur de turbidité et la concentration massique en particules de la solution.

Le facteur de corrélation ( $k$ ) est constant si l'indice de réfraction des particules en solution est homogène et constant au cours de l'essai, ce qui est le cas pour notre application.

La concentration massique en particules de l'eau s'écoule dans la cellule de mesure du turbidimètre avec un débit mesuré en continu, ce qui permet d'obtenir le débit massique de particules évacué hors de l'enceinte.



**Fig. 3-39** Vue du système de turbidimétrie en ligne en dessous du puisard

L'interprétation du débit massique de particules mesuré dans l'eau d'évacuation pendant la phase initiale du déclenchement de l'aspersion est délicate pour plusieurs raisons. Premièrement, au déclenchement de l'aspersion, l'eau qui est initialement évacuée a participé au drainage des particules déposées le long de la paroi du puisard. Deuxièmement, comme cela a été mis en évidence lors de la réalisation et de l'analyse des essais du programme aspersion, la phase initiale du déclenchement de l'aspersion est caractérisée par une importante vaporisation des gouttes. Le débit évacué durant cette phase est donc très faible et s'établit lentement, générant un écoulement non développé dans la cellule du turbidimètre, ce qui conduit à des fluctuations significatives de mesure.

### **3.4. CARACTERISATION DES BUSES D'ASPERSION**

Afin d'implanter dans l'enceinte TOSQAN les buses d'aspersion générant les sprays répondant le mieux aux besoins, nous utilisons un dispositif permettant de réaliser des mesures granulométriques par anémométrie phase Doppler hors de l'enceinte TOSQAN dans l'enceinte RAP. Ceci permettra de connaître le couple vitesse et diamètre à différents points dans le spray.

Ainsi, nous allons succinctement rappeler le principe de cette technique, puis nous présenterons les résultats expérimentaux associés à cette technique pour la caractérisation de la buse choisie.

### 3.4.1. PRINCIPE DE LA MESURE PDA

L'anémométrie phase Doppler (P.D.A.) est une technique non-intrusive permettant de mesurer simultanément la taille et la vitesse d'une particule sphérique individuelle traversant un volume de mesure. Cette technique est une extension de la vélocimétrie laser Doppler (Bachalo et Houser, 1984). Elle est basée sur l'analyse de la lumière diffusée par une particule. L'analyse de l'interférogramme généré par la particule passe par l'étude de l'interaction entre un rayon lumineux et une particule sphérique en termes de réflexion et de réfraction à l'intérieur de celle-ci. Les détails de la technique sont présentés en Annexe 5.

### 3.4.2. PRESENTATION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le dispositif expérimental RAP (RAmpe d'asPersion) instrumenté à l'aide d'un anémomètre phase Doppler est présenté sur la Fig. 3-40.

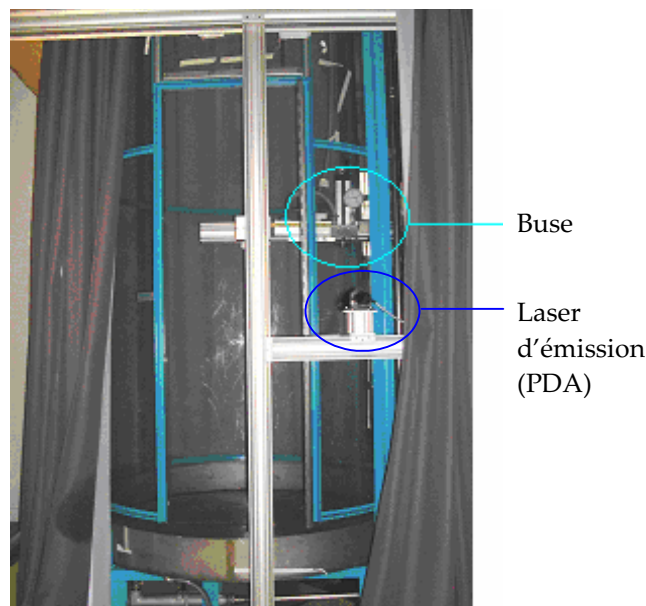


Fig. 3-40 Enceinte RAP

Cette enceinte est composée d'un cylindre vertical en plexiglas transparent de 1,85 m de diamètre et de 4,6 m de hauteur permettant des mesures à pression atmosphérique et température ambiante.

Le dispositif optique global illustré sur la Fig. 3-41 est un système commercial DANTEC permettant de mesurer la taille des gouttes et les deux composantes de la vitesse. Deux faisceaux laser issus de deux sources laser (un laser Hélium-Néon d'une longueur d'onde de 632,5 nm et un laser Nd : YAG de longueur d'onde 532 nm) sont chacun partagés en deux faisceaux par une cellule de Bragg. Cette dernière permet d'ajouter un décalage de fréquence de 40 MHz à chacun des faisceaux ainsi séparés. Il est important de rappeler qu'en anémométrie phase Doppler, la polarisation est définie par rapport au plan formé par les faisceaux de même longueur. Ce dispositif permet ainsi d'obtenir quatre faisceaux de 1,5 mm de diamètre polarisés parallèlement ; deux faisceaux d'une longueur d'onde de 632,5 nm dont l'un est décalé de 40 MHz et deux faisceaux d'une longueur d'onde de 532 nm dont l'un possède un décalage en fréquence de 40 MHz.

Ces quatre faisceaux sont focalisés à l'aide d'une lentille de 310 mm de focale placée dans la sonde de collection (Fig. 3-41). La lumière diffusée par les particules dans le volume de mesure est collectée à un angle  $\theta$  de  $72^\circ$  hors axe à l'aide d'une sonde commerciale Dantec (58N80-58N81). L'angle de  $72^\circ$



correspond à l'angle de Brewster pour de l'eau et un faisceau polarisé parallèlement. Ainsi, à cet angle, l'intensité diffusée par le mode  $p = 0$ , correspondant aux rayons subissant une réflexion externe, est atténuée.

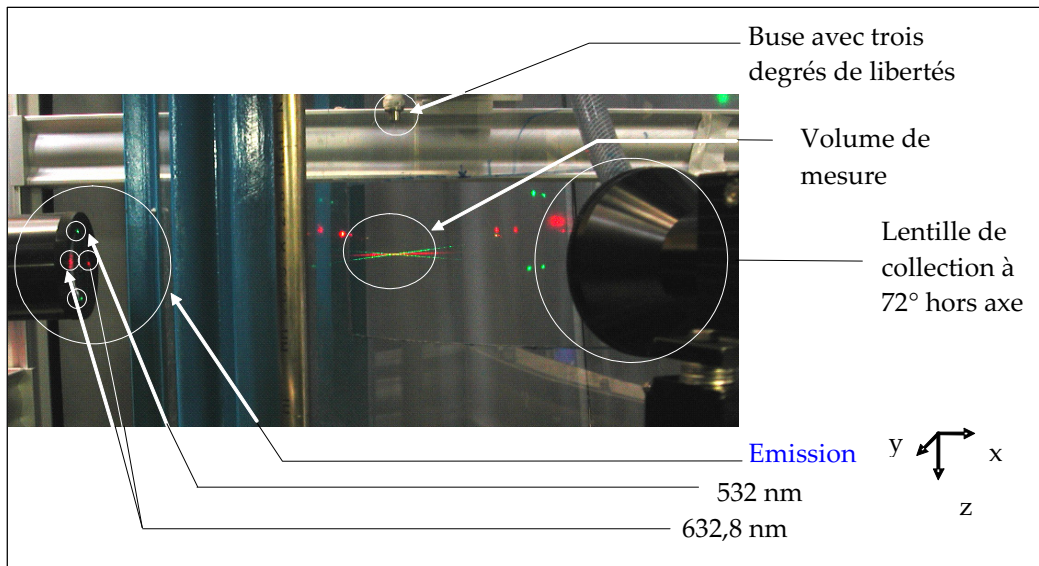


Fig. 3-41 Photo du dispositif phase Doppler

### 3.4.3. RESULTATS EXPERIMENTAUX OBTENUS

A l'aide de ce montage, nous présentons la caractérisation du spray généré par la buse D1-35 de la société « Spraying System », alimentée successivement par plusieurs débits (5, 10 et 15  $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

La distribution granulométrique issue de la buse D1-35 (offrant un angle de  $19^\circ$ ) alimentée avec un débit de  $10 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$  servant pour l'essai de référence, est présentée sur la Fig. 3-42.

Le choix d'une buse avec un faible angle de spray est fait afin d'éviter les interactions entre les gouttes et les parois de l'enceinte au cours de nos essais dans l'enceinte TOSQAN.

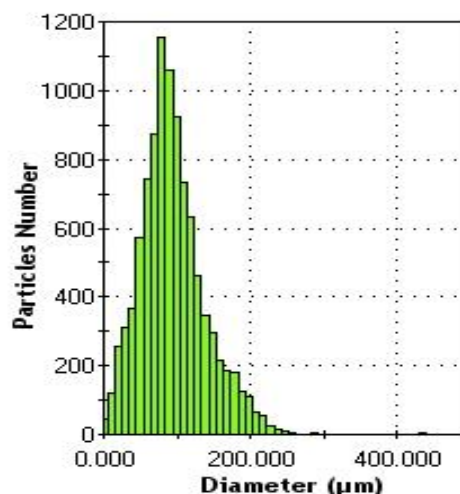


Fig. 3-42 Distribution granulométrique des gouttes d'eau issues de la buse D1-35 mesurée à 52 cm sur l'axe

Comme nous pouvons l'observer sur la Fig. 3-42, la granulométrie du spray mesurée sur l'axe à 52 cm de la buse d'injection peut être interpolée par une distribution  $f(d)$  log-normale (Eq. (3.5)) de diamètre médian  $\delta = 90 \mu\text{m}$  et d'écart-type géométrique  $\sigma_g = 1,5$ . Le spray ainsi généré est peu dispersé.

$$f(d) = \frac{1}{\sigma d \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(d/\delta)}{\sigma}\right)^2\right) \quad \text{Eq. (3.5)}$$

L'Eq. (3.6) nous permet de calculer des diamètres caractéristiques. Le  $d_{10}$  est le diamètre arithmétique moyen, le  $d_{32}$ , appelé diamètre de Sauter, est très largement utilisé pour traiter des problèmes de transferts de masse et de chaleur entre des gouttes et leur environnement car il traduit le rapport moyen entre le volume et la surface des gouttes.

$$d_{ij} = \frac{\int_{d=0}^{\infty} f(d) d^i dd}{\int_{d=0}^{\infty} f(d) d^j dd} \quad \text{Eq. (3.6)}$$

Les mesures présentées dans le Tableau 3-4 ont un faible taux de rejet (entre 5 et 10 %).  $X = R$  correspondant au rayon du spray à l'altitude  $Z$ , et  $Z = 0$  le point d'injection des gouttes.

Débit d'aspersion de 5 g/s

Z [cm]	X [cm]	Nombre de coups	D10 [ $\mu\text{m}$ ]	D20 [ $\mu\text{m}$ ]	D30 [ $\mu\text{m}$ ]	D32 [ $\mu\text{m}$ ]	Concentration [#/ $\text{cm}^3$ ]	U - moyen [m/s]	V - moyen [m/s]
10,5	0	125966	148,5	172,5	198,8	263,9	19,9	11,4	0,3
	R/2	/							
	R	/							
19	0	43691	152,1	177,1	204,0	270,8	9,5	9,2	0,3
	R/2	18593	164,4	186,2	211,2	271,4	4,9	7,7	0,9
	R	5755	152,5	165,4	180,7	216,2	0,2	5,8	1,2
52	0	942	145,1	167,5	192,6	254,7	/	3,8	0,1
	R/2	469	163,5	178,9	196,8	238,1	/	3,5	0,3
	R	720	155,0	160,6	166,3	178,4	/	4,3	0,8

Débit d'aspersion de 10 g/s

Z [cm]	X [cm]	Nombre de coups	D10 [ $\mu\text{m}$ ]	D20 [ $\mu\text{m}$ ]	D30 [ $\mu\text{m}$ ]	D32 [ $\mu\text{m}$ ]	Concentration [#/ $\text{cm}^3$ ]	U - moyen [m/s]	V - moyen [m/s]
10,5	0	411684	90,4	102,1	114,6	144,3	38,3	20,3	0,6
	R/2	/							
	R	/							
19	0	204768	91,2	103,0	114,0	139,7	24,8	16,0	0,5
	R/2	168141	96,9	107,2	117,5	140,9	24,9	15,1	1,4
	R	19785	96,2	98,8	101,5	107,1	6,8	6,6	1,4
52	0	10121	92,9	103,4	113,6	137,4	21,6	7,3	0,3
	R/2	4530	118,1	127,6	137,2	158,7	14,1	5,6	0,7
	R	720	154,9	160,6	166,3	178,4	/	4,3	0,8



Débit d'aspersion de 15 g/s

Z [cm]	X [cm]	Nombre de coups	D10 [µm]	D20 [µm]	D30 [µm]	D32 [µm]	Concentration [# / cm <sup>3</sup> ]	U - moyen [m/s]	V - moyen [m/s]
10,5	0	204730	41,1	45,5	49,7	59,2	20,4	26,0	0,7
	R/2	/							
	R	/							
19	0	430180	57,6	63,7	68,7	79,8	31,0	22,4	0,8
	R/2	290796	65,4	71,5	77,9	92,7	28,0	12,9	1,2
	R	18661	83,7	87,3	92,4	103,6	4,5	6,6	1,3
52	0	200788	81,5	89,3	97,0	114,4	27,0	11,7	0,7
	R/2	91330	100,6	108,2	114,9	129,4	32,2	7,1	0,9
	R	720	/	160,6	166,3	178,4	0,0	/	0,8

**Tableau 3-4 Caractéristiques de la buse D1-35 en fonction de la position et du débit dans RAP**

A partir des résultats présentés dans le Tableau 3-4, on peut remarquer que l'augmentation du débit d'eau injecté, donc de la pression d'injection en amont de la buse, conduit à une diminution de la taille des gouttes.

Pour un débit d'injection donné, le diamètre des gouttes mesuré augmente en fonction de la distance par rapport à la buse d'aspersion. Ceci est dû principalement au fait que dans le champ très proche de la buse, le PDA valide essentiellement les plus petites particules qui sont sphériques, le reste du liquide étant distribué en ligaments ou paquets non sphériques donc rejetés par le PDA. En s'éloignant de la buse, après la zone d'atomisation secondaire, malgré les possibles phénomènes de coalescence et d'évaporation des gouttes, la validation du PDA augmente, le liquide étant à cette position intégralement distribué sous forme de goutte. De plus, les petites gouttes atteignent plus rapidement leur vitesse terminale avec une densité spatiale plus faible. Pour la suite de l'étude nous considérerons les valeurs de taille et de vitesse mesurées à une distance de 52 cm de la buse d'aspersion.

On notera que les gouttes possèdent encore une vitesse radiale non nulle après 50 cm de chute.

Comparant ces résultats issus de la technique PDA avec les mesures obtenues avec la technique ILIDS dans TOSQAN (cf. §3.2.2.1), on notera une divergence liée aux plages de mesure différentes des deux techniques. Lemaître (2006) a montré que l'on pouvait corriger les mesures en imposant artificiellement la même dynamique de mesure et ainsi avoir une corrélation entre les mesures à 2 % près.

#### 3.4.4. CARACTERISATION PAR VISUALISATION

Pour terminer la caractérisation de la buse, l'angle de spray est évalué dans l'enceinte RAP. La Fig. 3-43 présente l'angle de spray ( $\theta_{\text{expérimental}}/2$ ) obtenu pour un débit d'aspersion de 10 g/s, déterminé expérimentalement par visualisation par plan laser. La valeur  $\theta_{\text{expérimental}}/2 = 17^\circ$  est du même ordre de grandeur que celle fournie par le fournisseur  $\theta_{\text{fournisseur}}/2 = 19^\circ$ .

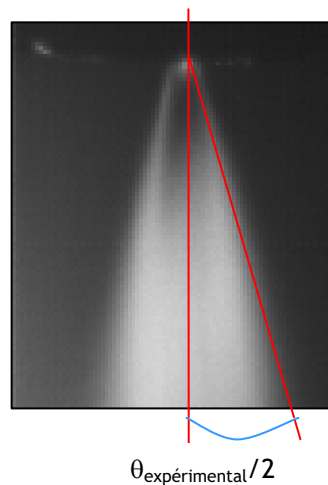


Fig. 3-43 Visualisation par plan laser du spray : détermination de l'angle de spray pour la buse D1 - 35

### 3.5. CONCLUSION

Ce chapitre a permis de présenter le dispositif expérimental et les différentes techniques de mesure utilisées au cours des essais aérosols avec leurs limites et leurs domaines de validité.

Au cours des expériences tous les essais de la grille (cf. §2.5) n'ont pu être réalisés au vu des limites techniques exposées dans le chapitre 3, principalement liées aux limites de mesure de l'instrumentation utilisée pour caractériser les aérosols (aérosols de taille inférieure à  $0,2 \mu\text{m}$  pour les essais AA1 ou AG4) ou une concentration en aérosols trop importante (essais AA2), ainsi qu'aux limites liées aux caractéristiques du spray (essais AG30 et AG31).

Les essais effectués sont donc les suivants : ceux en sédimentation (S0), l'essai de référence (AG0), ceux à différents débits d'aspersion et différentes températures d'injection des gouttes ((AG10, AG11 et AG12 ; AG51, AG52), et enfin ceux avec une section de spray plus large (AG2). Certains de ces essais ont donné lieu à quelques essais hors grille où la température initiale du gaz est alors « froide ». Tous ces essais sont exploités au chapitre suivant.

# CHAPITRE 4. TRAITEMENT DES DONNEES ET ANALYSE DES RESULTATS

## 4.1. INTRODUCTION

L'objet de ce chapitre est double :

- Analyser les résultats expérimentaux obtenus lors des essais de rabattement des aérosols par l'aspersion obtenus dans l'expérience TOSQAN.
- Comparer ces résultats expérimentaux avec ceux issus du module CPA du code de calcul ASTEC.

En premier lieu, le protocole d'essai et les conditions initiales sont définis. Ensuite, un essai sans aspersion est décrit et analysé afin d'avoir une référence du dépôt des aérosols, puis l'essai de référence avec aspersion AG0 est présenté de manière détaillée.

Au cours de cette étude, l'influence des paramètres énumérés ci-dessous, sera analysée :

- le débit massique d'aspersion (qui de manière couplée influence la taille des gouttes d'aspersion),
- la température d'injection de l'eau d'aspersion,
- la géométrie du spray.

## 4.2. SCENARIO : PROTOCOLE D'ESSAI ET CONDITIONS INITIALES

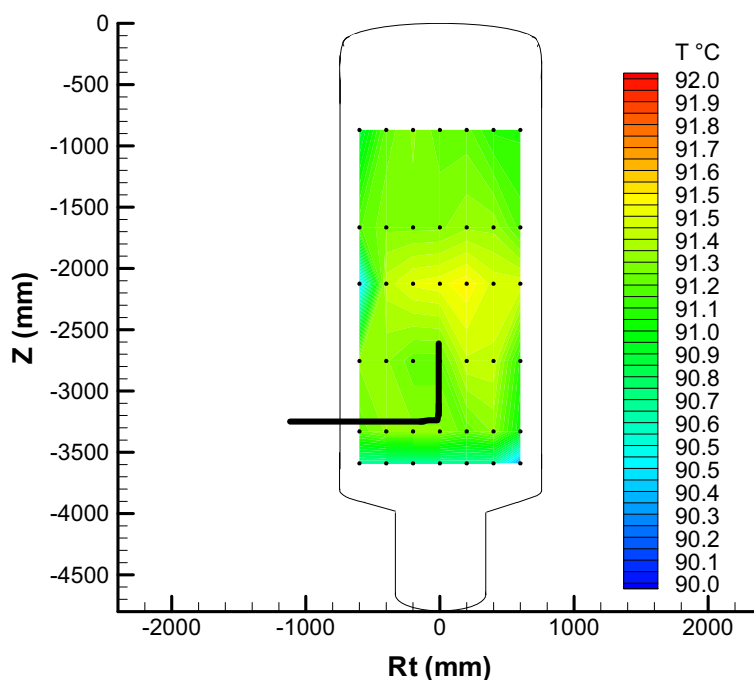
### 4.2.1. PROTOCOLE D'ESSAI

Pour parvenir à des conditions initiales maîtrisées et reproductibles, la veille de l'essai, une température de 90 °C est imposée aux parois de l'enceinte et une circulation d'air est réalisée enceinte ouverte avec un débit d'environ 5 g.s<sup>-1</sup> pendant environ 15 heures afin d'évacuer de l'enceinte les aérosols et la vapeur injectés lors de l'essai précédent.

Quelques heures avant le début de l'essai proprement dit, le balayage de l'enceinte en air est stoppé de sorte à atteindre un équilibre thermique à la pression atmosphérique.

La Fig. 4-1 présente le champ de température du gaz obtenu lors de l'équilibre thermique avant l'injection des aérosols. Sur cette figure, chaque point noir correspond à l'emplacement d'un thermocouple dans l'enceinte.

Nous pouvons constater que la température est très homogène dans l'enceinte (stratification thermique de l'ordre de 1 °C).



**Fig. 4-1 Champ de température du gaz dans l'enceinte avant injection de l'air et des aérosols**

Le scénario général des essais aérosols débute par une pressurisation de l'enceinte en air seul jusqu'à une pression de 0,07 bar qui correspond à la pression minimale assurant le débit de fuite égal à 5 L/min nécessaire au prélèvement et à l'analyse des aérosols (cf. §3.3.2.1). Lorsque cette pression est atteinte, l'injection des aérosols peut débuter.

Au cours de l'injection des aérosols, leurs concentrations numériques et massiques en suspension ainsi que leur diamètre sont mesurés à l'aide du granulomètre WELAS en deux points de prélèvement (Fig. 3-2). La mesure en continu des caractéristiques des aérosols dans l'enceinte permet de contrôler le moment où l'injection des particules doit être arrêtée, lorsque la masse totale des aérosols en suspension dans le gaz a atteint la valeur désirée (Marchand et al., 2006b).

Ce suivi temporel permet aussi de contrôler la reproductibilité de la phase d'injection des aérosols, notamment pour s'assurer que la distribution granulométrique des aérosols et la masse totale des aérosols en suspension dans le gaz de l'enceinte est identique d'un essai à l'autre, au moment du déclenchement de l'aspersion.

La phase d'injection des aérosols est suivie d'une phase d'homogénéisation, puis l'enceinte est pressurisée par une injection de vapeur jusqu'à une pression donnée. L'injection de la vapeur est suivie par une nouvelle phase d'homogénéisation des aérosols dans l'enceinte.

L'eau d'aspersion est injectée à une température et à un débit d'eau contrôlés en fonction des conditions nominales de l'essai.

Quand le débit d'évacuation de l'eau en sortie de puisard se stabilise, l'analyse par turbidimétrie (cf. §3.3.3) de l'eau d'aspersion évacuée permet un suivi temporel de la masse d'aérosols collectée par l'ensemble des gouttes d'aspersion.

Les quatre phases d'un essai sont résumées sur la Fig. 4-2 :

Récapitulatif des diverses phases de l'essai :

1. **Équilibre thermique à la pression atmosphérique**
2. **Injection des aérosols et de l'air**
3. **Injection de vapeur**
4. **Aspersion**

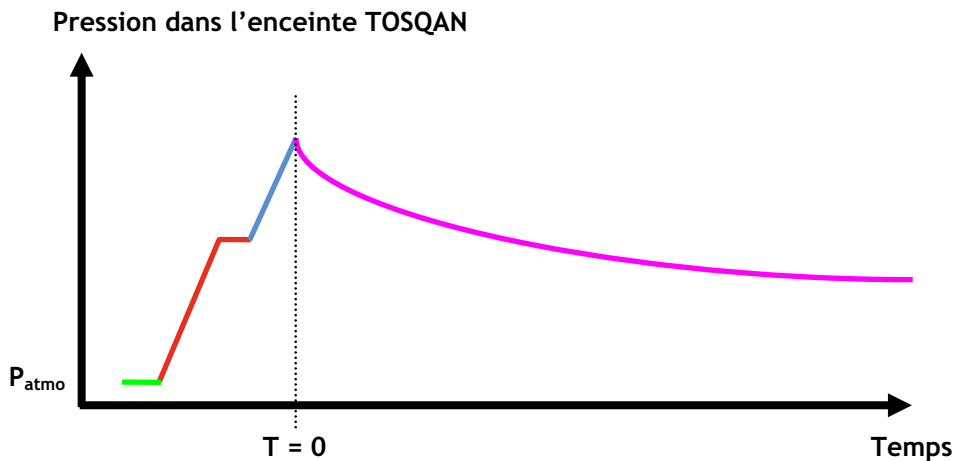


Fig. 4-2 Schéma des phases de l'essai avec aspersion

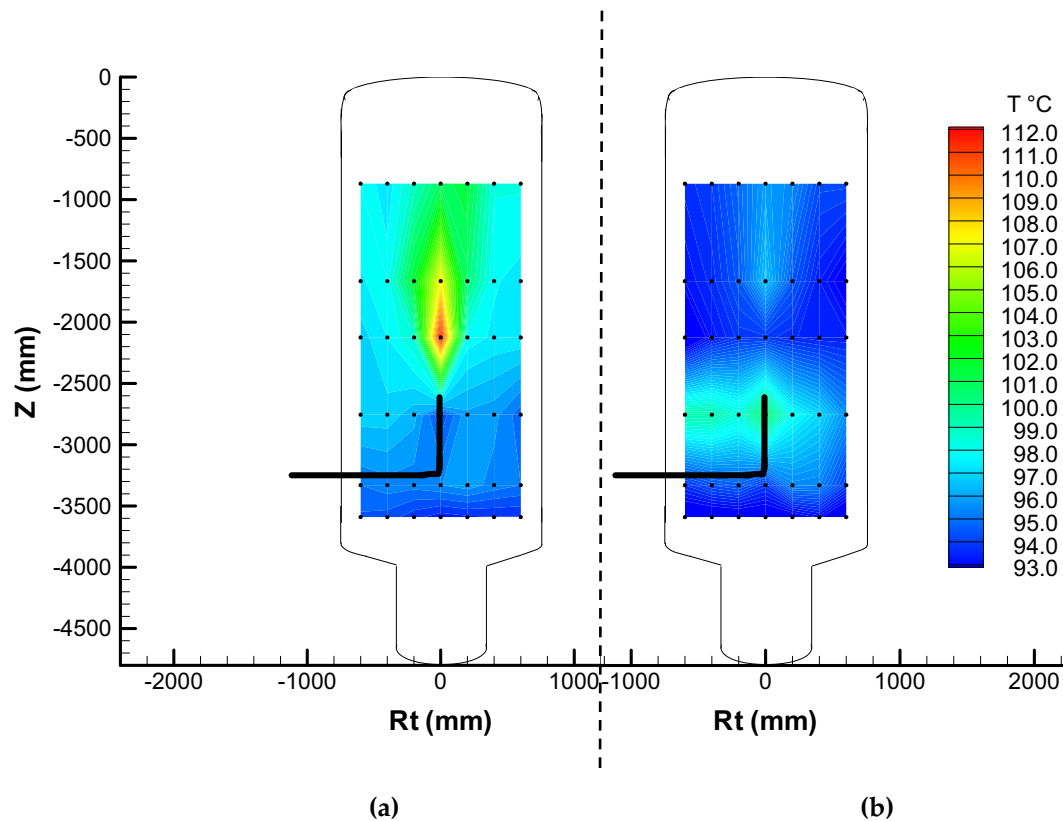
Au cours d'un essai, les évolutions temporelles des mesures globales (la pression de l'enceinte, le débit et la température de l'eau d'aspersion) et les évolutions temporelles des mesures locales (la température du gaz et les caractéristiques des aérosols) sont suivies en continu.

#### 4.2.2. CONDITIONS INITIALES DES ESSAIS ET REPRODUCTIBILITE DES GRANDEURS THERMOHYDRAULIQUES

La vapeur est injectée à un débit de  $13 \text{ g.s}^{-1}$  jusqu'à la pression de vapeur fixée à 0,5 bar dans TOSQAN.

La Fig. 4-3 (a) présente le champ de température du gaz obtenu au cours de la phase d'injection de la vapeur dans l'enceinte et la Fig. 4-3 (b) celui juste avant le déclenchement de l'aspersion.

L'injection de vapeur induit une pressurisation et un réchauffement du gaz de (Fig. 4-3 (a)). Ceci est principalement dû à la compression du gaz dans l'enceinte, mais aussi au fait que la vapeur est injectée surchauffée afin d'éviter sa condensation dans la ligne d'injection ou en sortie de la canne d'injection où intervient une détente.

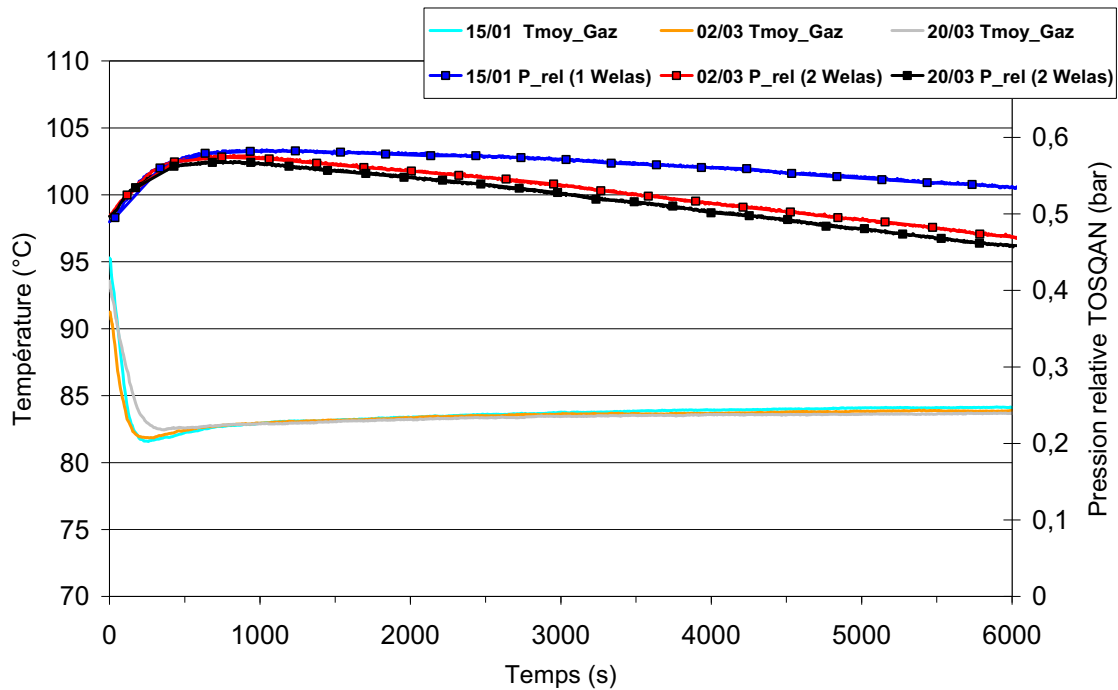


**Fig. 4-3 (a) Champ de température du gaz dans l'enceinte au cours de l'injection de vapeur (b) Champ de température du gaz dans l'enceinte avant déclenchement de l'aspersion**

Sur l'ensemble des courbes présentées dans ce mémoire, le temps  $t = 0$  s est pris comme instant de référence du déclenchement de l'aspersion.

#### **Etude de la reproductibilité des essais**

Pour réaliser les différentes mesures nécessaires à la caractérisation locale du gaz, des aérosols et des gouttes d'aspersion, nous sommes contraints de reproduire l'essai plusieurs fois. Pour vérifier la reproductibilité des essais, les évolutions temporelles de la température moyenne du gaz et de la pression relative dans TOSQAN sont comparées sur la Fig. 4-4. Ces essais sont réalisés à des températures d'injection du spray d'aspersion très proches. Précisons que pour l'essai du 15/01/07, une seule ligne de prélèvement des aérosols est activée, alors que pour les essais du 02/03/07 et du 20/03/07 les deux lignes de prélèvement des aérosols sont activées.



**Fig. 4-4** Reproductibilité des conditions thermohydrauliques dans l'enceinte TOSQAN au cours des essais

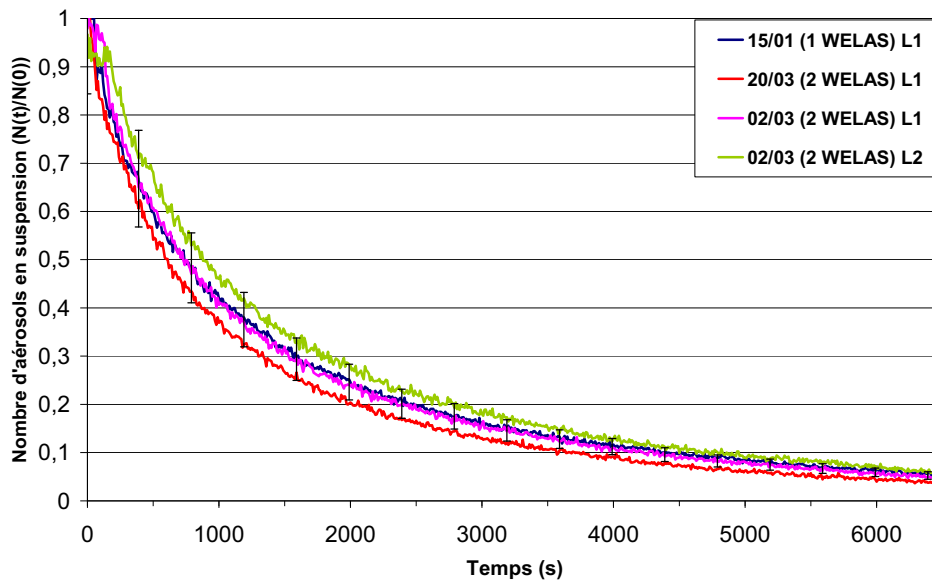
Nous observons sur cette figure (Fig. 4-4) que les différences de températures moyennes et de pressions relatives entre les deux essais n'excèdent jamais respectivement 0,5 °C et 0,01 bar. Or, ces écarts sont de l'ordre de grandeur de la précision des thermocouples pour la température (0,5 °C) et inférieurs à la précision des capteurs de pression (0,01 bar). A la pressurisation initiale de l'enceinte succède une dépressurisation qui est induite par la fuite générée par le prélèvement des aérosols sur une ligne (essai du 15/01) ou sur les deux lignes (essais du 02/03 et du 20/03).

Ainsi, on peut conclure que les évolutions temporelles des grandeurs thermodynamiques dans l'enceinte sont parfaitement reproductibles.

#### **4.2.3. CONDITIONS INITIALES DES ESSAIS ET REPRODUCTIBILITE DES GRANDEURS LIEES AUX AEROSOLS**

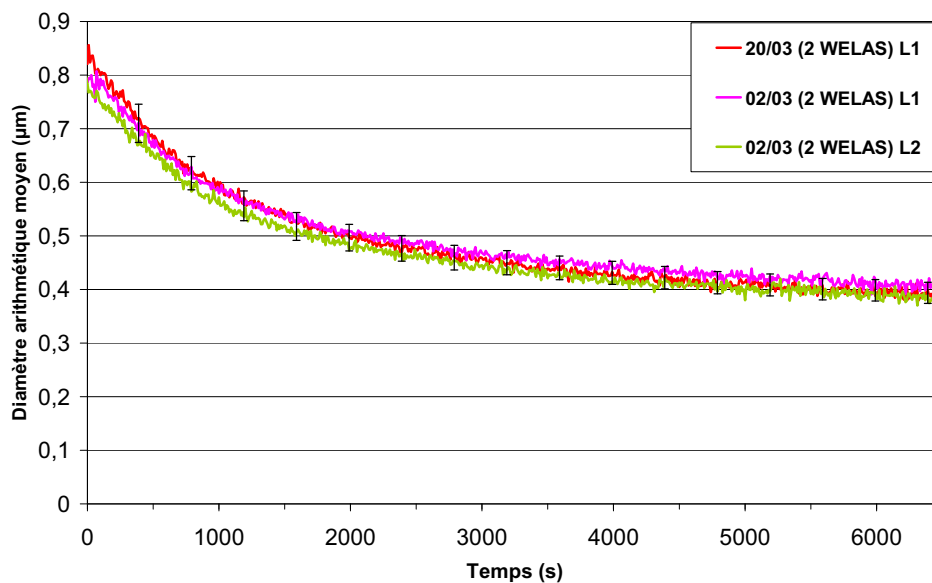
La masse d'aérosols en suspension au déclenchement de l'aspersion ( $t = 0$  s) est inférieure à la masse d'aérosols initialement chargée dans le piston du générateur RBG 1000 PALAS. Ceci est principalement dû à des dépôts d'aérosols dans la ligne d'injection en amont de l'enceinte mais aussi en raison du dépôt des aérosols sur les parois internes de l'enceinte qui intervient avant le déclenchement de l'aspersion. Les évolutions temporelles du nombre d'aérosols prélevés durant le temps d'acquisition de 5 s, normés par le nombre initial d'aérosols en suspension dans le gaz à  $t = 0$  s, sont présentées sur la Fig. 4-5. L'évolution temporelle du diamètre moyen des aérosols est présentée sur la Fig. 4-6.

La reproductibilité de la mesure du nombre d'aérosols en suspension dans le gaz au même point de prélèvement est bonne comme le montre la Fig. 4-5. De plus, pour un même essai (02/03), les deux lignes de prélèvement activées (L1 et L2) donnent des mesures du nombre d'aérosols très proches (valeurs absolues inférieures à 2 %). L'écart entre les 4 essais est inférieur à 15 % quelque soit le point de prélèvement L1 ou L2. Ce résultat permet de conclure que la répartition des aérosols dans l'enceinte est homogène avant le déclenchement de l'aspersion.



**Fig. 4-5 Nombre d'aérosols en suspension dans le gaz au cours d'un essai d'aspersion**

Sur la Fig. 4-6, pour un même essai (02/03), les deux lignes de prélèvement activées donnent des mesures du diamètre des aérosols très proches (valeurs absolues inférieures à 3 %). Concernant le même point de prélèvement (L1) pour deux dates d'essai différentes, les valeurs du diamètre moyen des aérosols sont identiques. Enfin, l'écart de la mesure du diamètre moyen des aérosols entre les 3 essais est inférieur à 7 % quel que soit le point de prélèvement.



**Fig. 4-6 Evolutions temporelles du diamètre moyen des aérosols en suspension dans le gaz au cours d'un essai d'aspersion**

Enfin, la Fig. 4-7 présente les évolutions temporelles des masses normées d'aérosols en suspension mesurées lors d'essais avec aspersion. La reproductibilité de la mesure de la masse normée d'aérosols en suspension dans le gaz est bonne, l'écart entre les 3 essais étant inférieur à 30 % quel que soit le point de prélèvement.



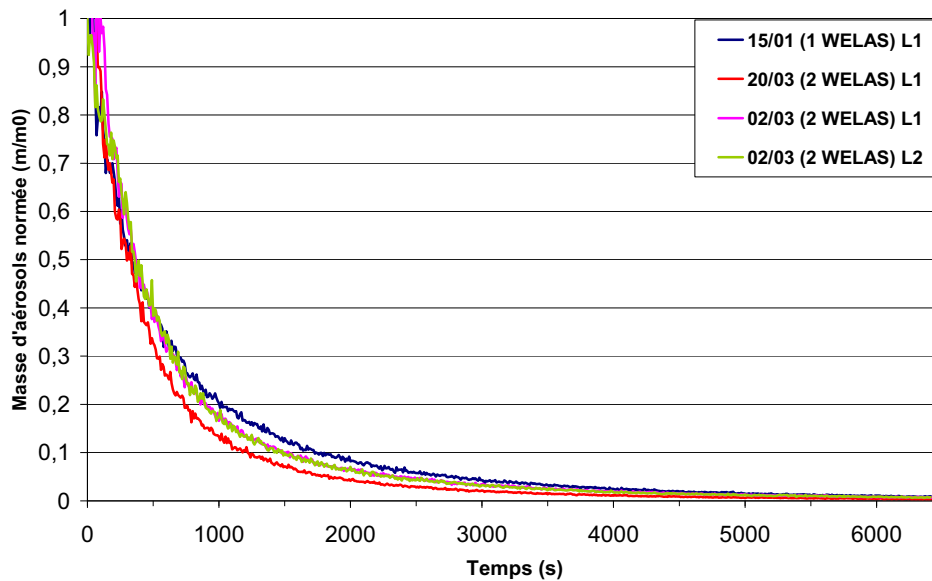


Fig. 4-7 Evolutions temporelles de la masse d'aérosols normée en suspension dans le gaz au cours d'un essai d'aspersion

Les Fig. 4-5, Fig. 4-6 et Fig. 4-7 ont montré une bonne reproductibilité des mesures sur les aérosols dans le gaz ainsi qu'une bonne homogénéité des caractéristiques des aérosols au niveau des deux points de prélèvement.

### 4.3. ANALYSE DES ESSAIS SANS ASPERSION (S0)

L'essai S0 (cf. §2.4) présenté dans cette partie est un essai sans aspersion. Le but de cet essai est d'obtenir une référence du comportement des aérosols injectés dans l'enceinte dans un mélange air / vapeur, sans aspersion. De plus, cet essai sera utilisé pour des comparaisons avec les essais avec aspersion aux paragraphes suivants §4.4 à §4.8.

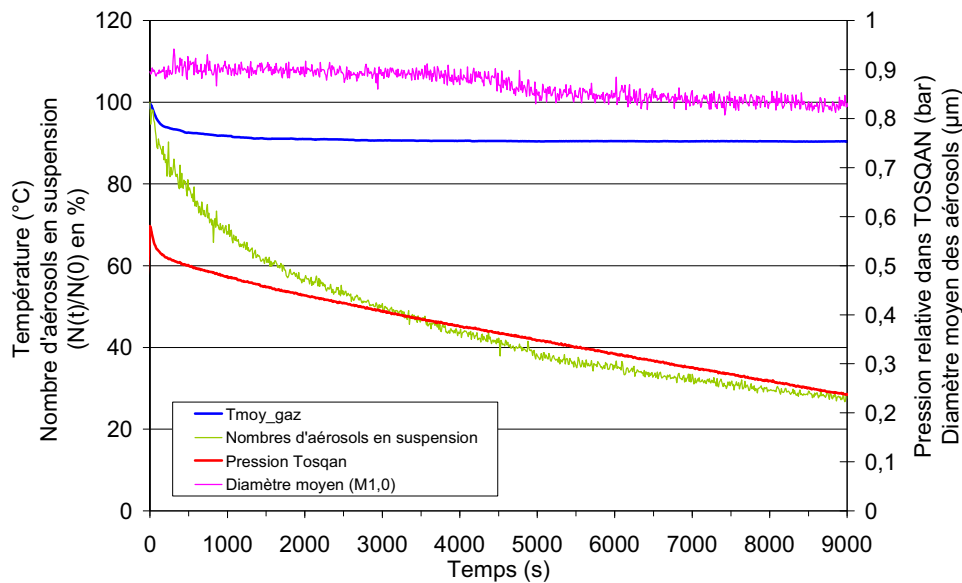
#### Conditions thermohydrauliques

Ce paragraphe présente l'évolution des conditions thermohydrauliques au cours de l'essai. Les conditions initiales de l'essai sont résumées dans le Tableau 4-1 :

Tableau 4-1 Conditions initiales de l'essai S0 à la fin de l'injection de vapeur

	Thermohydrauliques			Aspersion				Aérosols	
	P <sub>abs</sub> (bar)	T <sub>gaz</sub> (K)	s	Q <sub>asp</sub> (g/s)	T <sub>asp,inj</sub> (K)	d <sub>goutte,inj</sub> (μm)	Angle (°)	m <sub>a,init</sub> (g)	d <sub>10</sub> (μm)
<b>Essai de référence sans aspersion (S0)</b>	<b>1,6</b>	<b>373</b>	<b>0,5</b>	/	/	/	/	<b>2</b>	<b>0,95 (σ = 1,9)</b>

Le scénario et les conditions de cette essai S0 sont les mêmes que ceux décrits dans le paragraphe 4.2.1, mis à part qu'il n'y a pas déclenchement de l'aspersion. Pour cet essai S0, le temps de référence (t = 0 s) correspond à la fin de la phase d'injection de vapeur.



**Fig. 4-8 Evolutions temporelles des conditions thermohydrauliques et des caractéristiques des aérosols (en L1) au cours l'essai de référence sans aspersion S0**

L'injection de vapeur surchauffée (cf. §4.2.2) induit une augmentation initiale de la température du gaz et de la pression de l'enceinte. Durant la phase initiale qui suit l'arrêt de l'injection de la vapeur, la pression de l'enceinte diminue du fait du refroidissement du mélange gazeux induit par les parois de l'enceinte dont la température de consigne est régulée à une température de 90 °C.

A partir du moment où la température du gaz a atteint une température d'équilibre proche de celle des parois, la décroissance de la pression observée sur la Fig. 4-8, est liée à la fuite générée par les systèmes de prélèvement des aérosols (cf. §3.3.2.1). Le fait que le diamètre moyen des aérosols augmente légèrement pendant la phase initiale de l'essai juste après l'arrêt de l'injection de la vapeur est attribué au brassage des aérosols par les écoulements induits par l'injection de vapeur qui vient de se terminer. En effet, avant le déclenchement de l'injection de vapeur, les aérosols les plus gros avaient sédimenté laissant la zone supérieure de l'enceinte riche en aérosols de petites tailles. Les écoulements induits assurent donc la convection forcée des aérosols de toutes tailles vers le haut de l'enceinte augmentant le diamètre moyen des aérosols le temps de l'amortissement des écoulements induits.

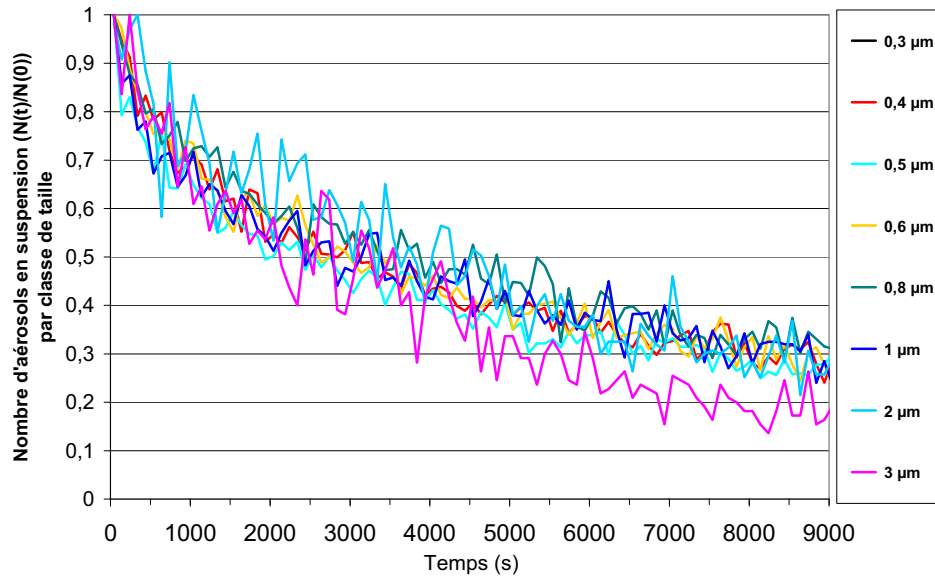
Par la suite, lorsque la dynamique des écoulements s'amortie et que le milieu gazeux peut être considéré comme au repos, le diamètre arithmétique moyen des aérosols diminue logiquement au cours du temps en accord avec le phénomène de sédimentation qui implique préférentiellement les particules les plus grosses.

#### **Evolution du nombre d'aérosols en suspension et de leur diamètre moyen**

La décroissance du nombre d'aérosols en suspension est lente (Fig. 4-8). Elle est due à la sédimentation des aérosols ainsi qu'aux dépôts diffusifs sur les parois verticales de l'enceinte en absence d'aspersion (Fuchs, 1964; Park et al., 2001; Park et Lee, 2002). La réduction de ce nombre d'aérosols en suspension de moitié ( $T_{nombre1/2}$ ) se fait en 3500 s. Le gaz étant supposé au repos, il y a compétition entre les phénomènes de sédimentation et de diffusion des aérosols dans le gaz, pour les aérosols dont le diamètre est inférieur à 2 µm.

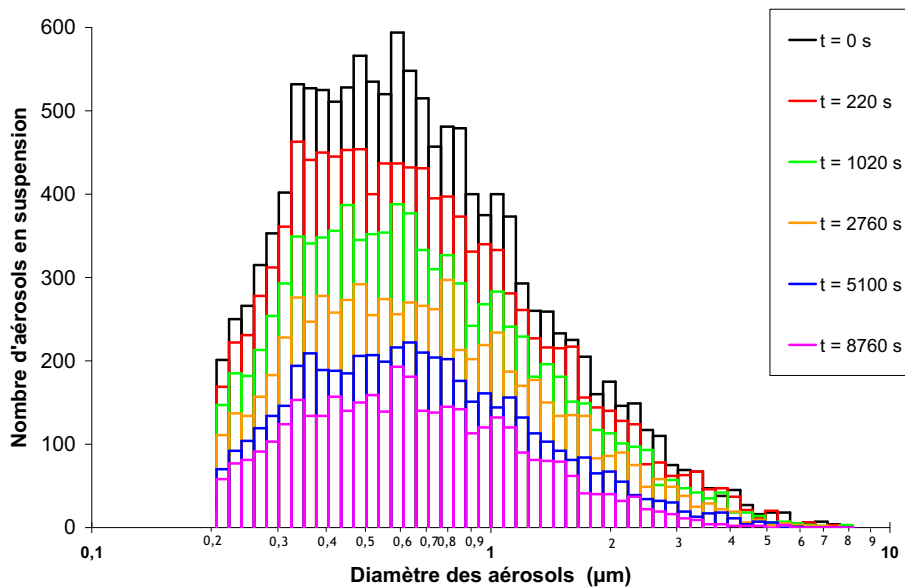
Les temps caractéristiques de ces phénomènes sont très proches. En effet au dessus de cette valeur de 2 µm, le phénomène prépondérant est la sédimentation. Le diamètre moyen des aérosols reste quasi

constant au cours du temps, ceci étant lié au fait que le nombre d'aérosols dans les classes inférieures à 2  $\mu\text{m}$  décroît de façon similaire comme ceci est observable sur la Fig. 4-9. Seuls les aérosols des classes supérieures à 2  $\mu\text{m}$  voient leur nombre diminuer de façon plus conséquente. Or comme leur nombre initial en suspension est plus faible ceci n'influe que peu sur le diamètre arithmétique moyen (Fig. 4-8).



**Fig. 4-9 Evolution temporelle du nombre normé d'aérosol en suspension par classe de taille pour l'essai S0**

Sur la Fig. 4-10, les distributions des aérosols au cours du temps évoluent et confortent ce résultat. La décroissance rapide du nombre d'aérosols pour les diamètres supérieurs à 2  $\mu\text{m}$  avant 2760 s puis ensuite leur très faible nombre encore en suspension entraîne la diminution rapide de leur poids dans le calcul du diamètre moyen comme ceci est visible Fig. 4-8.



**Fig. 4-10 Distributions des aérosols pour l'essai S0 pour différents temps**

L'efficacité globale des mécanismes de perte en nombre d'aérosols (GSRE) est définie par l'équation (4.1).

En comparant les taux de pertes globales (lié à la sédimentation et la diffusion sur les parois) exprimés en nombre d'aérosols ( $\tau_{\text{perte}}(t)$  - Eq. (4.1)) Fig. 4-11 et Fig. 4-12, on remarque que la valeur de ce taux est constant pour chacune des classes de taille d'aérosol comprises entre 0,3  $\mu\text{m}$  et 2  $\mu\text{m}$ .

$$\tau_{\text{perte}}(t) = \frac{n_i(t=0) - n_i(t)}{n_i(t=0)} \quad \text{Eq. (4.1)}$$

L'amplification des fluctuations du taux de pertes observée pour les classes de taille supérieures à 2  $\mu\text{m}$  (Fig. 4-11), vient du fait que pour ces classes de taille, le nombre d'aérosols est faible ce qui engendre une sensibilité à la statistique dans la mesure du granulomètre WELAS. On notera que pour le temps  $t = 8760$  s, les aérosols de diamètre supérieur à 5  $\mu\text{m}$  ne sont plus en suspension dans le gaz.

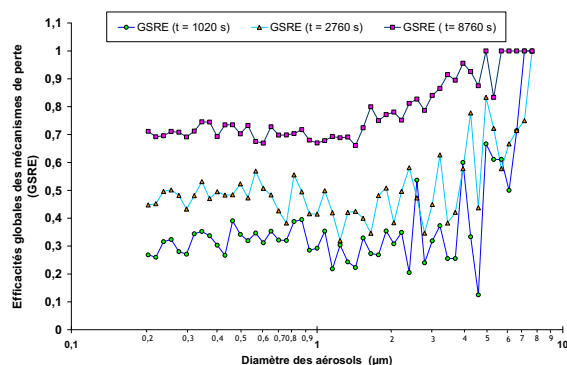


Fig. 4-11 Taux de pertes pour l'essai S0 en fonction du diamètre des aérosols

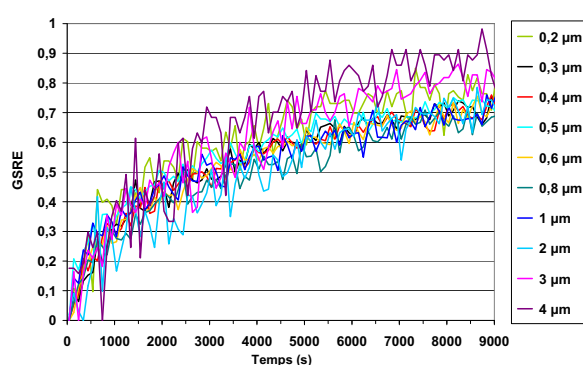


Fig. 4-12 Evolution temporelles des taux de pertes globales pour l'essai S0

### Facteur de Décontamination

Pour compléter cette analyse, on peut caractériser le pouvoir de décontamination du système à l'aide du Facteur de Décontamination (FD) qui représente le rapport entre la masse initiale d'aérosols en suspension dans l'enceinte sur la masse d'aérosols présente à l'instant  $t$ .

L'objectif de cette approche est de développer une équation simple qui peut être employée pour déterminer l'efficacité du système d'aspersion. Comme l'injection d'aérosols dans l'enceinte est nulle après le déclenchement de la vapeur, en prenant comme hypothèse le fait que les pertes de masse par sédimentations et par dépôt sur les parois sont négligeables, l'équation différentielle exprimant le Facteur de Décontamination de l'atmosphère est la suivante (Powers et Burson, 1993a) :

$$\frac{dm_p}{dt} = -\lambda_d m_p(t) \quad \text{Eq. (4.2)}$$

Soit 
$$\text{DF} = \frac{m_p(0)}{m_p(t)} \quad \text{Eq. (4.3)}$$

Un essai S0F (hors grille) a été réalisé avec une température du gaz initial et des parois « froide » à 30 °C sans injection de vapeur tout en conservant les autres paramètres identiques à l'essai de référence sans spray S0.

Les Facteurs de Décontamination de ces deux essais sont comparés sur la Fig. 4-13. On notera que le FD n'est pas constant au cours du temps du fait de la modification de la distribution en taille des aérosols qui évolue (Fig. 4-9) liée à la compétition entre les phénomènes de sédimentation et de diffusion.

Après 5 min le FD de l'essai S0 est supérieur à celui de l'essai à froid S0F. En effet, la diffusion des aérosols est une fonction croissante de la température du gaz, ainsi dans un gaz à 30 °C (303 K) la diffusion des aérosols est plus faible que dans un gaz à 90 °C (363 K) ce qui limite les pertes des aérosols en suspension par ce phénomène (Fuchs, 1964; Crowe, 2006).

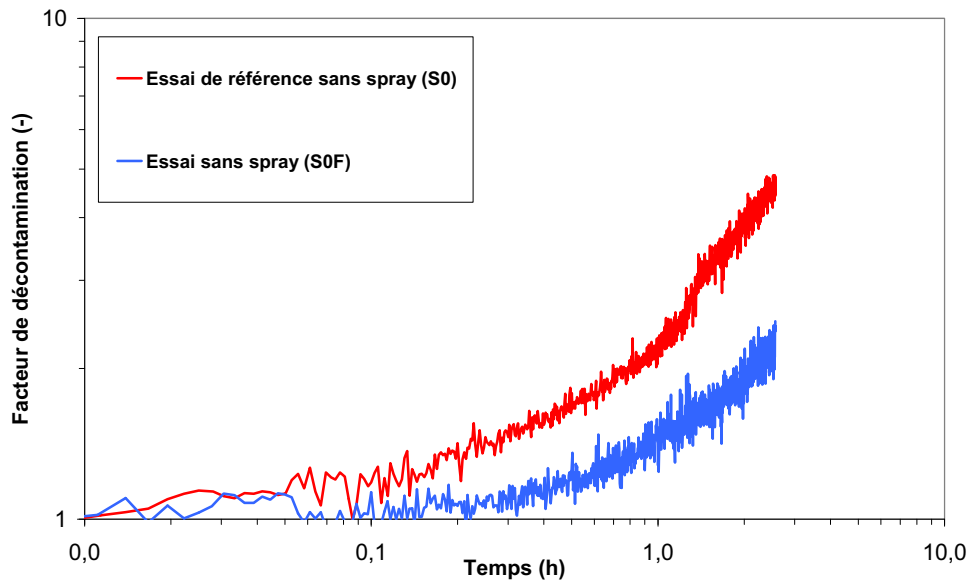


Fig. 4-13 Facteur de décontamination en fonction du temps pour l'essai de référence sans aspersion S0 et l'essai S0F

#### 4.4. ANALYSE DE L'ESSAI DE REFERENCE AVEC ASPERSION (AG0)

Ce paragraphe présente l'essai de référence avec aspersion AG0. La température d'injection de l'eau est « froide » ( $\approx 30\text{ °C}$ ) par rapport à la température du gaz. Dans la phase initiale du déclenchement de l'aspersion, la température de l'eau d'aspersion est de 90 °C liée à la conduction de la chaleur dans la l'eau stagnante présente dans le circuit d'aspersion, puis très rapidement elle atteint la température de consigne de 30 °C (Marchand et al., 2007b).

Les conditions initiales de l'essai sont résumées dans le Tableau 4-2. Elles correspondent au moment ( $t = 0\text{ s}$ ) du déclenchement de l'aspersion.

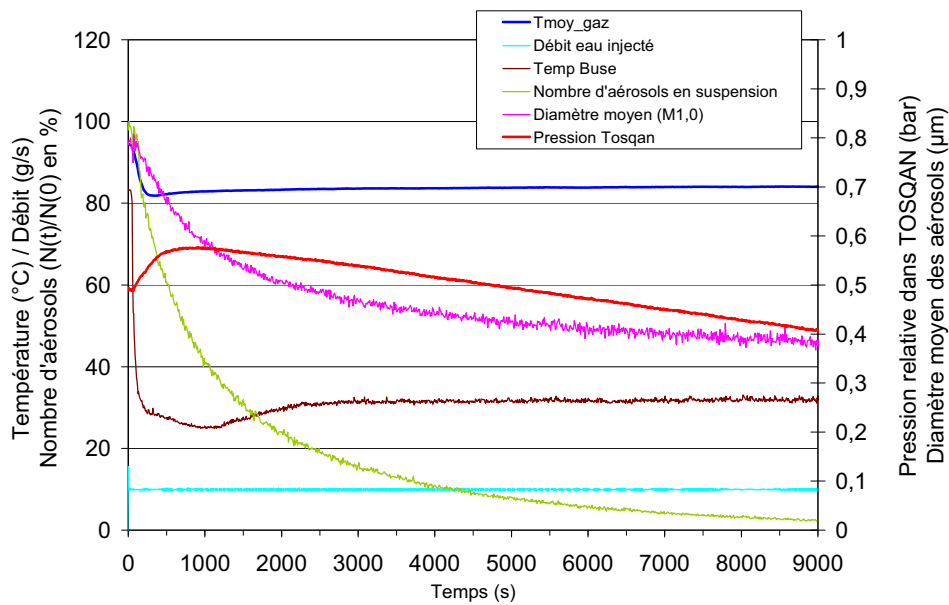
Tableau 4-2 Conditions initiales de l'essai de référence AG0 à  $t = 0\text{ s}$

	Thermohydrauliques			Aspersion			Aérosols		
	$P_{abs}$ (bar)	$T_{gaz}$ (K)	s	$Q_{asp}$ (g/s)	$T_{asp, inj}$ (K)	$d_{goutte, inj}$ ( $\mu\text{m}$ )	Angle ( $^\circ$ )	$m_{a, init}$ (g)	$d_{10}$ ( $\mu\text{m}$ )
<b>Essai de référence avec aspersion (AG0)</b>	<b>1,49</b>	<b>367,5</b>	<b>0,44</b>	<b>10</b>	<b>303</b>	<b>100</b>	<b>19</b>	<b>1</b>	<b>0,8</b> ( $\sigma = 1,8$ )

##### Conditions thermohydrauliques

Sur la Fig. 4-14 on peut observer un brutal refroidissement du gaz dans l'enceinte pendant les premières 200 s d'aspersion (la température moyenne du gaz passant de 94 °C à 82 °C). Ce brutal refroidissement du gaz est accompagné par une pressurisation de l'enceinte induite par la vaporisation

initiale des gouttes au cours de leur chute et lors de leur interaction avec la paroi chauffée du puisard de l'enceinte (Fig. 4-15) (Porcheron et al., 2007b).



**Fig. 4-14 Evolutions temporelles des conditions thermohydrauliques et des caractéristiques des aérosols (en L1) au cours l'essai de référence avec aspersion (AG0)**

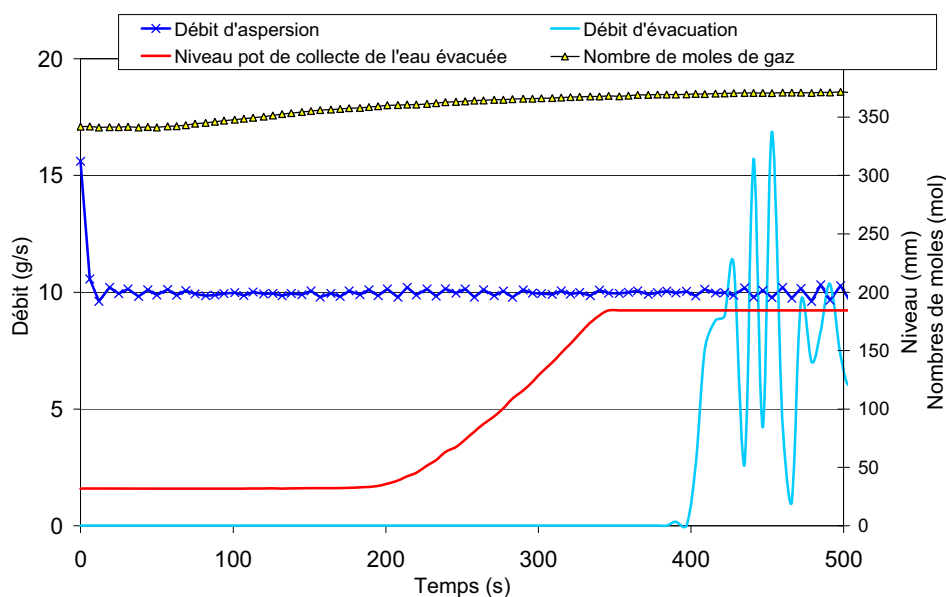
Pour décrire le déroulement global de l'essai, Lemaitre (2004) a calculé le nombre de moles de gaz total  $n_{Total}$  dans TOSQAN (Eq. (4.4)) en faisant l'hypothèse du gaz parfait en connaissant la température moyenne  $\bar{T}_{TOSQAN}$  (K) et la pression absolue  $P_{TOSQAN}$  (Pa) et dans l'enceinte ( $R = 8,32 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) :

$$n_{Total} = \frac{P_{TOSQAN} V_{TOSQAN}}{R \bar{T}_{TOSQAN}} \quad \text{Eq. (4.4)}$$

De plus, est tracée sur la Fig. 4-15 l'évolution temporelle du débit d'eau évacuée en sortie de l'enceinte TOSQAN ainsi que le niveau de remplissage du pot de collection de l'eau évacuée.

Nous remarquons, sur cette figure que le niveau d'eau du pot commence à augmenter à partir de  $t = 200$  s. Au cours des 200 premières secondes de l'essai, l'intégralité des gouttes d'eau d'aspersion sont vaporisées en arrivant dans la région du puisard, créant ainsi une source de vapeur qui génère le pic de pression dans l'enceinte observé précédemment. Après cette première phase de vaporisation, le débit d'évacuation de l'eau d'aspersion ne commence à se stabiliser qu'à partir de  $t = 400$  s). L'analyse de ces phénomènes a été exhaustivement détaillée dans (Lemaitre et al., 2007a; Porcheron et al., 2007c).

Ainsi, au cours des 400 s premières secondes de l'essai (la durée de cette phase varie en fonction des conditions de l'essai) nous ne pourrions pas utiliser les données issues de l'opacimètre qui nécessite que l'écoulement liquide soit bien établi dans la canalisation d'évacuation du puisard.



**Fig. 4-15 Evolutions temporelles du débit d'eau évacuée de l'enceinte et du nombre de mole de gaz dans l'enceinte**

A l'issue de cette phase, un régime permanent est obtenu, la pression de l'enceinte et la température moyenne du gaz sont quasi-stationnaires. La décroissance de la pression de l'enceinte observée est simplement liée à l'activation du système de prélèvement des aérosols comme nous l'avons vu précédemment (cf. §4.2.2). Les mesures avec le turbidimètre sont possibles au cours de cette phase.

La totalité de l'eau d'aspersion injectée est évacuée en sortie du puisard. Ainsi, pendant cette phase, l'énergie fournie par les parois de l'enceinte est égale à celle nécessaire pour faire passer les gouttes de leur température d'injection à leur température d'équilibre.

#### **Evolution du nombre d'aérosols en suspension et de leur diamètre moyen**

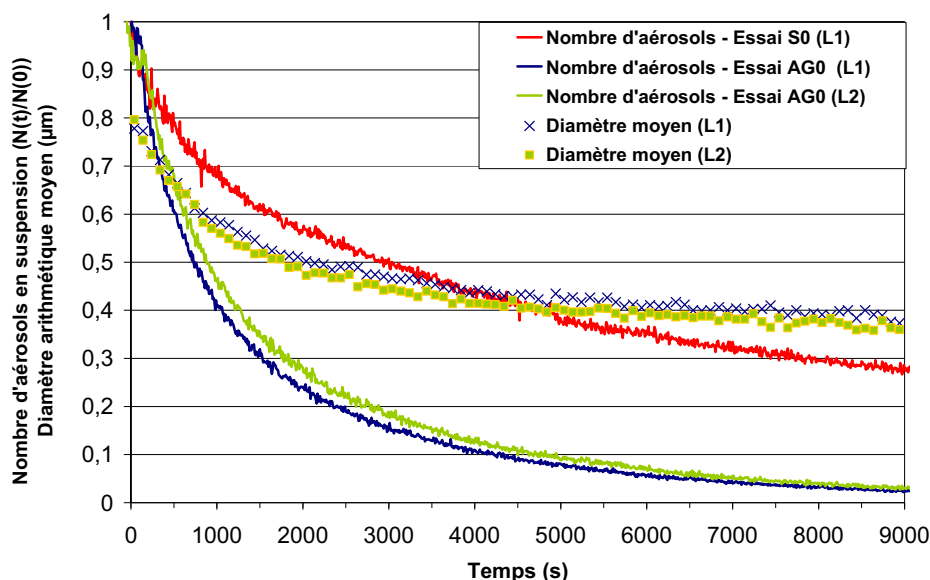
Rappelons que les caractéristiques des aérosols dans le gaz sont mesurées via deux lignes de prélèvements (L1) et (L2) respectivement situées dans le spray aux altitudes Z5 et Z4 (cf. §3.2).

On notera (Fig. 4-16) que l'évolution des caractéristiques des aérosols est similaire quelque soit la ligne de prélèvement. L'aspersion induit une réduction du nombre d'aérosols en suspension dans l'enceinte par rapport à l'essai sans spray (S0), ainsi qu'une réduction du diamètre moyen des aérosols quel que soit le point de prélèvement.

Dans le cas de l'essai sans aspersion (S0) nous avons vu que  $T_{\text{nombre}/2}$  est égale à 3500 s. Dans le cas de l'essai AG0, cette valeur diminue notablement de plus d'un facteur 3 pour atteindre  $T_{\text{nombre}/2} = 1000$  s. De plus, l'aspersion permet après 3000 s, une réduction d'au moins 40 % du diamètre moyen, par rapport au cas S0. En effet, le diamètre moyen des aérosols tend vers une valeur limite égale à 0,8  $\mu\text{m}$  pour l'essai S0, tandis que pour celui avec aspersion, le diamètre moyen des aérosols tend vers une valeur limite égale à 0,4  $\mu\text{m}$ , pour la durée d'essai considérée.

L'importante diminution du diamètre moyen des aérosols observée durant les 3000 premières secondes après le déclenchement de l'aspersion (de près de 40%) est due à la prédominance des mécanismes de collecte par interception et par impaction inertielle (cf. §2.4.2), compte tenu de la distribution granulométrique des aérosols en début d'essai qui est bornée entre 0,5  $\mu\text{m}$  et 2  $\mu\text{m}$  (Fig. 4-17) (Rimberg et Peng, 1977) mais aussi aux effets phorétiques qui ont lieu dans les premiers instants de la

chute des gouttes (cf. Chapitre 2). Puis, la diminution est plus lente, en raison de la prédominance de la diffusion (Rimberg et Peng, 1977) pour les aérosols de diamètre inférieur à 1  $\mu\text{m}$  car les aérosols de diamètre supérieur à 1  $\mu\text{m}$  ne sont quasi plus en suspension dans la gaz (Fig. 4-18). Au cours des 6000 s suivantes, le diamètre décroît de 20 % pour atteindre 0,4  $\mu\text{m}$ . Dans nos conditions expérimentales, cette gamme d'aérosols est la plus difficile à rabattre.



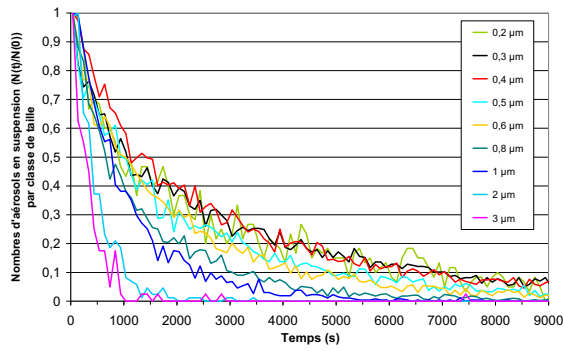
**Fig. 4-16 Evolution du nombre d'aérosols normé en suspension et du diamètre moyen des aérosols pour les essais AG0 et S0 dans TOSQAN**

Par rapport à l'essai précédent sans aspersion (S0 – cf. §4.3), l'évolution du nombre d'aérosols par classe, n'est pas identique dans chacune des classes selon l'intensité des effets mécaniques et des effets phorétiques (cf. §1.3.4). La diminution du nombre d'aérosols en suspension par classe est la plus faible pour les aérosols dont le diamètre est compris entre 0,3  $\mu\text{m}$  et 0,4  $\mu\text{m}$  pour lesquels l'efficacité globale de rabattement du spray est minimale.

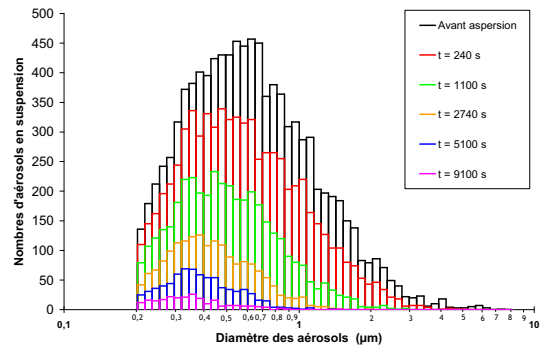
En outre, pour  $t < 2500$  s, le rabattement des aérosols est plus efficace pour les aérosols des classes supérieures à 2  $\mu\text{m}$ . Les principaux mécanismes de collecte pour ces diamètres d'aérosols sont les effets mécaniques. Après  $t > 3000$  s, les aérosols dont le diamètre est supérieur à 1  $\mu\text{m}$  ne sont plus présents dans le gaz. Enfin, après 9000 s, seuls les aérosols de diamètre inférieur à 0,6  $\mu\text{m}$  restent en suspension. Ceux sont les plus difficiles à rabattre dans cette configuration d'essai.

Les évolutions des distributions en taille des aérosols obtenues à différents temps avant et pendant l'aspersion, sont présentées Fig. 4-18. Comme on l'a vu dans les paragraphes précédents, on peut observer l'efficacité du spray pour épurer rapidement l'atmosphère des plus gros aérosols. Le nombre d'aérosols dans chaque classe diminue mais d'une manière non uniforme. Après 2500 s il n'y a plus d'aérosols de diamètre supérieur à 1,5  $\mu\text{m}$  en suspension dans le gaz. Après ce temps, les mécanismes de collecte mis en jeu sont quasiment identiques due au fait des faibles modifications des conditions thermohydrauliques et des caractéristiques des gouttes. Le mode des distributions granulométriques des aérosols en suspension n'évolue quasiment plus (Fig. 4-18).





**Fig. 4-17 Evolutions temporelles du nombre normé d'aérosols par classe de taille pour l'essai AG0**



**Fig. 4-18 Distributions des aérosols en suspension pour différents temps pour l'essai AG0**

Afin d'étudier le rabattement des aérosols trois approches sont développées :

- ❑ Une approche pour déterminer *l'efficacité globale de rabattement du système d'aspersion* (GSRE)
- ❑ Une approche pour déterminer le taux de rabattement afin d'en déduire *l'efficacité totale de collecte de la goutte* à partir des données fournies par deux techniques de mesure distinctes :
  - les données obtenues avec le granulomètre optique WELAS dans le gaz
  - les données obtenues avec le turbidimètre dans l'eau évacuée
- ❑ Une approche pour obtenir *l'efficacité élémentaire de collecte d'une goutte* pour chaque classe de taille d'aérosol

### L'efficacité globale du système d'aspersion

Les valeurs de GSRE, défini par l'Eq. (4.5), calculées pour différents temps (1100 s, 2740 s ou 8740 s), sont tracées sur les Fig. 4-19 et Fig. 4-20. GSRE est calculée pour chaque point de prélèvement L1 et L2, ainsi que pour l'essai sans aspersion (S0) (Marchand et al., 2006a).

$$GSRE(t) = \frac{n_i(t=0) - n_i(t)}{n_i(t=0)} \quad \text{Eq. (4.5)}$$

Sur la Fig. 4-19, après 2700 s le GSRE tend vers 1 pour les aérosols dont le diamètre est supérieur à 1 µm. Les conditions de cet essai ne permettent pas une grande efficacité pour la classe d'aérosol en-dessous de 0,6 µm.

L'efficacité globale de rabattement du système d'aspersion semble atteindre un minimum pour la gamme de taille d'aérosols située entre 0,3 µm et 0,4 µm mais il est difficile d'indiquer si elle est due à la limite inférieure de la mesure du granulomètre WELAS égale à 0,2 µm (Mölter et Keßler, 2004). Ce résultat est en accord avec ceux de (Grist, 1982) qui trouve que le minimum d'efficacité pour des gouttes de cette gamme de taille est obtenue pour des aérosols dont le diamètre est compris entre 0,3 µm et 0,4 µm.

On notera pour l'essai AG0, Fig. 4-20, que quelque soit le point de prélèvement L1 ou L2, les GSRE ont des valeurs similaires à un temps donné.

En revanche, l'influence du spray est visible sur les valeurs et les dynamiques en comparant les résultats avec spray (AG0) et sans spray (S0) pour l'ensemble des classes.

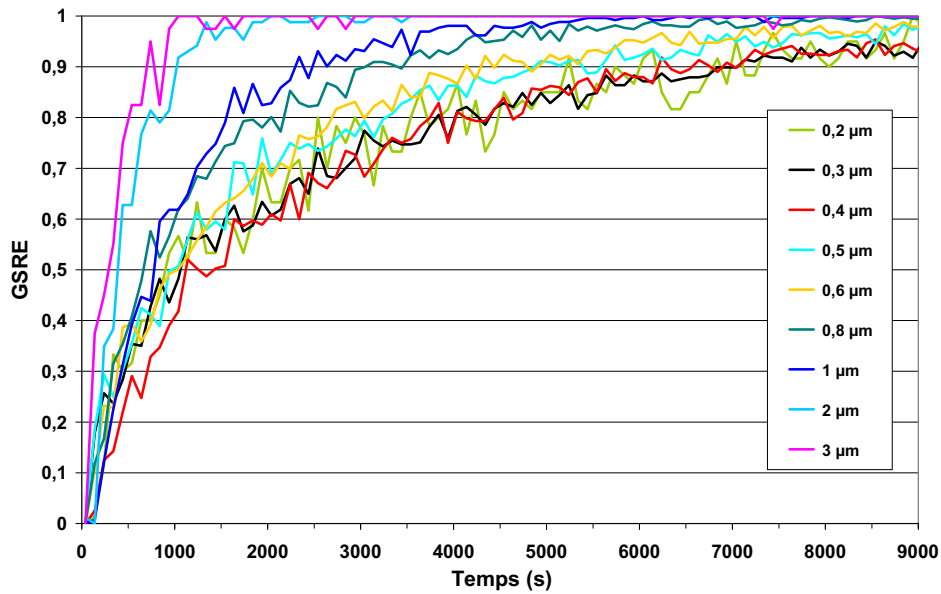


Fig. 4-19 Evolutions temporelles de l'efficacité globale de décontamination (en L1) pour l'essai AG0

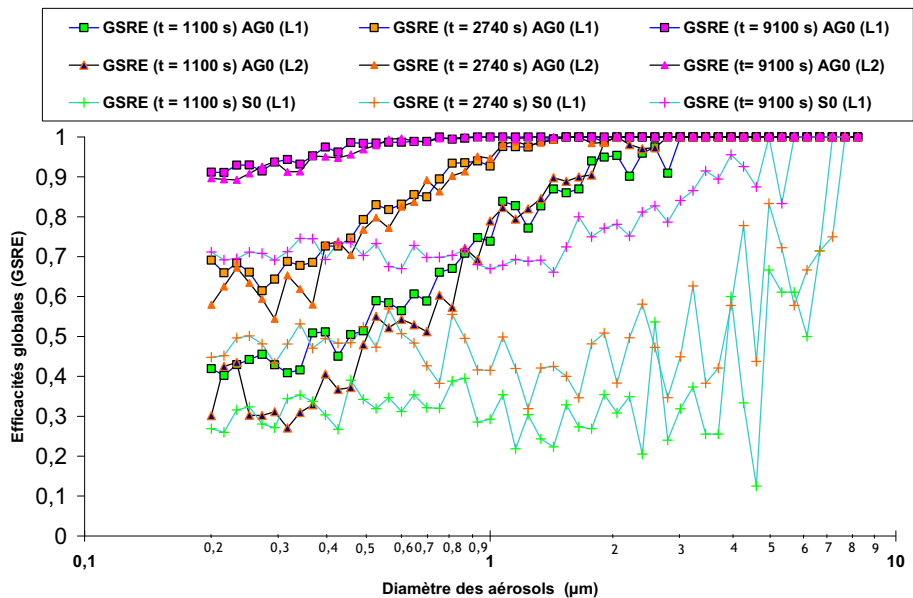


Fig. 4-20 Efficacités globales pour l'essai de référence AG0 et pour l'essai S0 en fonction du diamètre des aérosols

### Efficacité totale de collecte d'une goutte

Dans cette partie, nous allons étudier l'efficacité totale de collecte d'une goutte ( $E_{tot}$ ) (Marchand et al., 2007a).

L'efficacité totale de collecte d'une goutte est définie (cf. §1.3.3) comme le rapport entre la masse d'aérosols collectée par la goutte par la masse d'aérosols présente dans le volume balayé par la goutte.

Postma (1975) a démontré, en considérant certaines hypothèses, que l'on pouvait relier, Eq. (4.6) l'efficacité de collecte d'une goutte au taux de rabattement à l'aide d'une constante qui dépend des

caractéristiques des gouttes de l'aspersion et des caractéristiques de l'enceinte dans le cas d'une pulvérisation de gouttes monodispersées.

$$\lambda_s = \frac{3 Q_{\text{spray volumique}} \cdot h}{2 d_{\text{gouttes}} \cdot V_{\text{enceinte}}} \cdot E_{\text{totale}} \quad \text{Eq. (4.6)}$$

Connaissant l'équation qui régit l'évolution de la masse dans l'enceinte :

$$\frac{d m_{a\_gas}(t)}{dt} = -\lambda_s m_{a\_gas}(t) + \frac{d m_{a\_Sources}}{dt} - \frac{d m_{a\_Pertes}}{dt} \quad \text{Eq. (4.7)}$$

Et en faisant l'hypothèse qu'au cours de l'aspersion il n'y a plus de sources d'aérosols et que la perte de masse autre que par la collecte sont négligeables, on peut alors déterminer le taux de rabattement  $\lambda_s$  pour des gouttes mono dispersées (au vues des mesures PDA cf. §3.4.3) avec un spray arrosant le volume de gaz.

Méthode à partir des données obtenues dans le gaz :

Le granulomètre optique WELAS ne fourni qu'une concentration locale ( $C_0$ ). En supposant la concentration homogène dans l'enceinte, (Fig. 4-5, Fig. 4-6 et Fig. 4-7) une extrapolation au volume de TOSQAN est possible afin d'obtenir la masse en suspension.

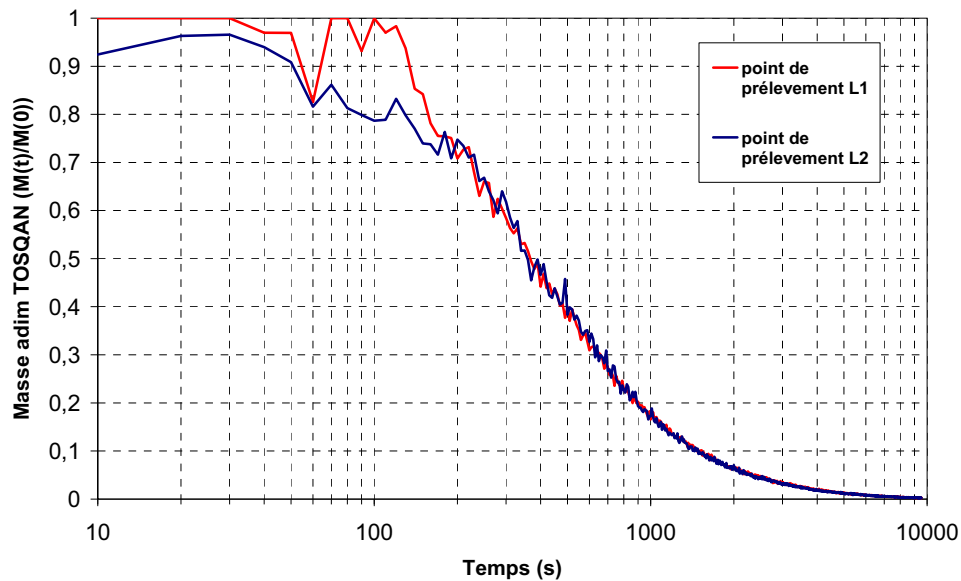
Dans la zone d'aspersion l'évolution de la masse est donnée par cette équation :

$$m_{a\_gas}(t) = m_{a\_gas}(t=0) \exp\left(-\int_0^t \lambda_s dt\right) \quad \text{Eq. (4.8)}$$

En faisant l'hypothèse que le taux de rabattement est indépendant du temps sur une période, on trouve :

$$m_{a\_gas}(t) = m_{a\_gas}(t=0) \exp(-\lambda_s t) \quad \text{Eq. (4.9)}$$

La Fig. 4-21 présente l'évolution temporelle de la masse d'aérosols en suspension, adimensionnée par la masse d'aérosols initiale à  $t = 0$  s, pour les deux points de prélèvement (L1 et L2). On observe une inflexion sur la courbe présentant l'évolution temporelle de la masse d'aérosols en suspension qui traduit une modification des phénomènes prépondérants qui gouvernent la collecte des aérosols par les gouttes d'aspersion.



**Fig. 4-21 Masse adimensionnelle en fonction du temps**

A partir de la linéarisation de la courbe présentant l'évolution de la masse d'aérosols dans le gaz, il est possible de déterminer deux taux de rabattement distincts (Fig. 4-22)

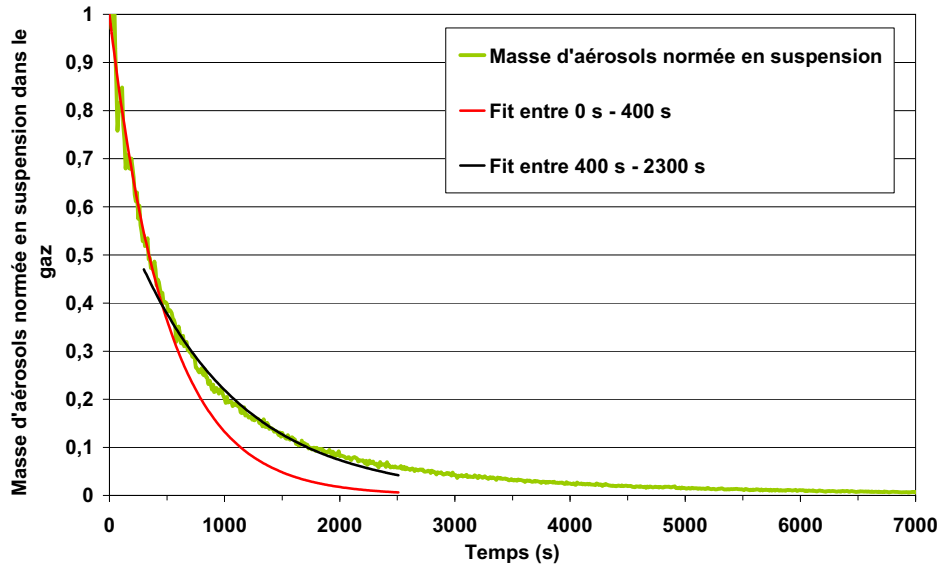
Une phase d'épuration plus rapide de la zone de spray où le temps caractéristique de rabattement des aérosols est nettement supérieur au temps caractéristique du transfert des aérosols de la zone hors du spray vers la zone de spray. En effet les vitesses d'entraînement des aérosols par le spray sont de l'ordre de grandeur des vitesses radiales des gouttes du spray qui sont très inférieures par rapport aux vitesses verticales des gouttes dont dépendent la dynamique des effets mécaniques de collecte. Nous avons noté au paragraphe 3.4 que le rapport entre la vitesse radiale et la vitesse verticale des gouttes pour l'essai de référence est de l'ordre du  $4,6 \cdot 10^{-2}$  à 50 cm de la buse.

Dans cette phase de 0 à 400 s, le volume balayé par le spray est épuré et le rabattement est principalement gouverné par la dynamique de collecte des gouttes.

De plus, cette phase correspond au régime transitoire en termes de stabilisation de la température du mélange gazeux.

Au cours, de la deuxième phase qui débute à partir de  $t = 400$  s et jusqu'à la fin de l'essai, la dynamique de collecte des aérosols est limitée par le transfert des aérosols de la zone située hors du spray vers la zone de spray. Cette phase n'est donc plus à proprement parlée une phase de rabattement pur où l'intensité du rabattement serait directement pilotée par les effets de collecte mécanique et phorétique.

Précisons qu'à partir de 2300 s les données relatives à la masse d'aérosols en suspension ne sont plus prises en compte pour le calcul du taux de rabattement, car étant donné la faible concentration d'aérosols en suspension, l'incertitude de mesure devient trop importante. (Fig. 4-22).



**Fig. 4-22 Evolution de la masse normée d’aérosols dans le gaz ( $m(t)/m(0)$ ) et du taux de rabattement pour l’essai de référence (AGO) au point de prélèvement (L1)**

Les taux de rabattement déterminés pour chacune des périodes identifiées précédemment sont présentés dans le tableau suivant :

Période [s]	0 – 400	400 – 2000
Taux de rabattement ( $\lambda_s$ ) [ $s^{-1}$ ]	$20,2 \cdot 10^{-4}$	$10,9 \cdot 10^{-4}$

Pour la période 0 s – 400 s, on peut utiliser la relation établie par Postma (Eq. 4.6), qui relie le taux de rabattement à l’efficacité de collecte totale d’une goutte ( $E_{tot}$ ). En effet, la dynamique du rabattement est, au cours de cette période, directement contrôlée par les différents mécanismes de collecte. Pour nos conditions de spray pour des gouttes de 90  $\mu m$  injectée à un débit de 10 g/s dans l’enceinte TOSQAN, l’efficacité de collecte est de  $E_{tot} = 1,12 \cdot 10^{-2}$ .

Méthode à partir des données obtenues par l’analyse de l’eau évacuée en sortie du puisard :

La deuxième méthode consiste à déterminer le taux de rabattement à partir de la masse totale d’aérosols collectée par l’ensemble des gouttes ( $m_{p\_collectée}$ ). Cette masse est déduite de la mesure de la concentration massique de l’eau évacuée. (cf. §3.3.3).

Comme on l’a vu précédemment (cf. §3.4), les gouttes n’impactent pas les murs verticaux de l’enceinte TOSQAN et il n’y a donc pas de ruissellement le long des parois verticales de l’enceinte.

D’autre part, au début de l’essai, l’eau évacuée initialement contient une partie des aérosols qui avaient été déposés avant l’activation du spray, sur la paroi constituant le fond du puisard. A cela s’ajoute un phénomène de vaporisation initiale des gouttes comme nous l’avons vu précédemment (Fig. 4-15). Pour ces raisons, l’évolution de la masse d’aérosols collectée au cours des 400 premières secondes de l’essai ne pourra pas être utilisée pour la détermination du taux de rabattement.

De plus à partir de  $t = 2500$  s, la concentration en aérosols dans l’eau collectée devient très faible, et par conséquent, compte tenu de l’incertitude du système de mesure, les données ne pourront être considérées au-delà de  $t = 2500$  s.

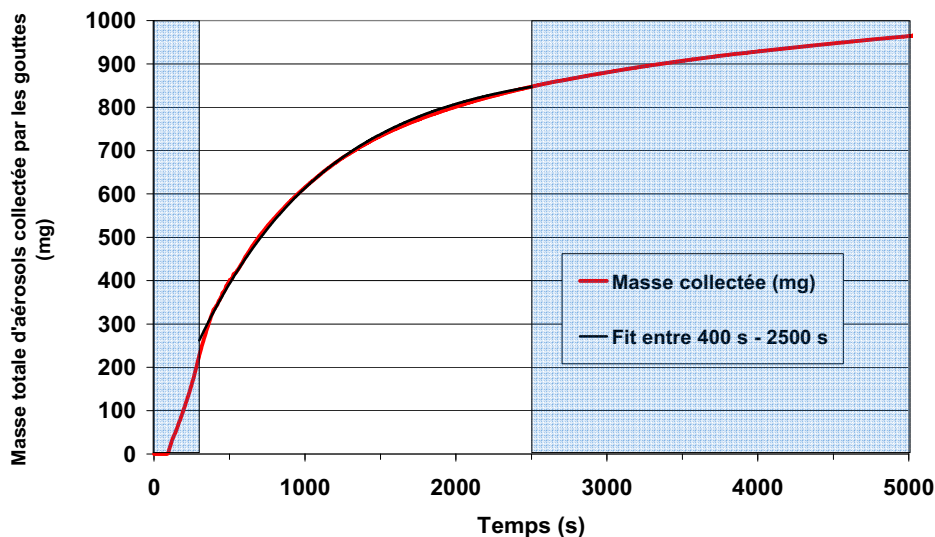
D'après le bilan de masse Eq. (4.7) et en faisant les mêmes hypothèses sur les sources et les pertes d'aérosols autres que celles induites par les mécanismes de collecte, et connaissant l'évolution de la masse d'aérosols dans le gaz (Eq. (4.9)), on en déduit l'évolution de la masse d'aérosols collectée en fonction de la masse totale d'aérosols injectée :

$$m_{a\_collectée}(t) = m_{a\_gas}(t=0) - m_{a\_gas}(t) \quad \text{Eq. (4.10)}$$

$$m_{a\_collectée}(t) = m_{a\_gas}(t=0)(1 - \exp(-\lambda_s t)) \quad \text{Eq. (4.11)}$$

A partir des données présentées sur la Fig. 4-23 et en ne considérant que la période de temps exploitable ( $t = 400 \text{ s}$  à  $t = 2500 \text{ s}$ ) on détermine le taux de rabattement.

Période [s]	400 – 2500
Taux de rabattement ( $\lambda_s$ ) [ $\text{s}^{-1}$ ]	$11,5 \cdot 10^{-4}$



**Fig. 4-23 Evolutions temporelles de la masse totale d'aérosols collectée par les gouttes**

Le taux de rabattement des aérosols a donc été déterminé à partir des deux techniques de mesure différentes, l'une portant sur la caractérisation des aérosols en suspension dans le gaz et l'autre portant sur la caractérisation de la masse totale d'aérosols collectée par le spray. On peut noter une très bonne concordance des valeurs du taux de rabattement obtenues par l'une et l'autre des approches expérimentales.

Pour  $400 \text{ s} < t < 2000 \text{ s}$ , une bonne concordance peut être trouvée avec les résultats de Powers pour des tailles de gouttes de  $200 \mu\text{m}$  (Powers et Burson, 1993a) et avec les résultats de Ducret pour une taille de gouttes égale à  $280 \mu\text{m}$  (Ducret et al., 1998a). Précisons le fait que les résultats de Ducret ont été obtenus pour des conditions d'état d'équilibre avec une atmosphère homogène dans l'enceinte CARAIDAS (cf. §1.2.4.4), où l'efficacité de collecte d'une goutte est constante tout au long de l'essai.

## Efficacité élémentaire de collecte d'une goutte

Une autre approche a consisté à déterminer l'efficacité élémentaire de collecte pour chaque classe d'aérosol (Porcheron et al., 2007a). Les hypothèses suivantes sont émises :

- Les distributions expérimentales en taille des aérosols dans le gaz (Fig. 4-18) sont approximées par des distributions de types log-normales.
- Les pertes massiques en aérosols sont simplement dues à la collecte par les gouttes et aux transferts avec le gaz environnant.
- Les gouttes sont supposées être également mono dispersées.

L'efficacité élémentaire de collection est définie ainsi (détails des calculs en Annexe 6) :

$$E_{elem}^i = \frac{m_{a\_collectée}^i}{m_{a\_dans\_le\_volume\_balayé}^i} \quad \text{Eq. (4.12)}$$

Les efficacités de collecte sont présentées sur la Fig. 4-24.

Nous avons vu Fig. 4-18 que l'aspersion modifie la distribution granulométrique des aérosols au cours du temps, du au fait que l'efficacité de collecte varie en fonction de la classe de taille des aérosols. La faible population d'aérosol dont le diamètre est supérieur à 3  $\mu\text{m}$  engendre une grande incertitude ce qui ne permet pas d'interpréter les données.

Le minimum d'efficacité (Fig. 4-24), est obtenu pour les aérosols dont la taille est comprise entre 0,3  $\mu\text{m}$  et 0,8  $\mu\text{m}$ . Une bonne concordance existe avec les résultats de Brockman (1998) pour des diamètre de gouttes de 100  $\mu\text{m}$  et des aérosols de Sarin . Cet auteur trouve des valeurs de minima d'efficacité comprises entre 0,2  $\mu\text{m}$  et 0,8  $\mu\text{m}$  en fonction des distributions granulométriques des gouttes.

La prépondérance des mécanismes phorétiques au début de l'aspersion est observable sur la Fig. 4-24. En effet, on notera que la valeur du minimum de l'efficacité de collecte est maximale au début de l'essai (au temps  $t = 150$  s) puis décroît par la suite. Pour les aérosols de diamètre inférieurs à environ 0,5  $\mu\text{m}$  le phénomène mis en jeu lors de la collecte est lié aux mécanismes browniens. Pour les aérosols de diamètre supérieur à 0,8  $\mu\text{m}$ , les mécanismes d'interception et d'impaction sont prépondérants dans la collecte. Entre ces deux gammes de diamètre, en fonction de la période d'analyse de l'essai, il y a compétition entre les effets phorétiques et mécaniques. Peu à peu les effets phorétiques diminuent laissant place à la compétition entre les effets mécaniques de diffusion et d'interception, induisant une diminution du minimum d'efficacité.

L'analyse avec ce modèle est bridée par le fait que les gouttes du spray sont décrites par le spray en termes d'association de simples gouttes monodispersées. De plus, ce calcul a une très grande sensibilité à l'interpolation des distributions ainsi qu'aux valeurs des vitesses et des diamètres des gouttes imposées pouvant engendrer une dispersion des résultats. L'efficacité globale du spray diminue au fur et à mesure que la collecte des aérosols progresse principalement lié à la modification de la distribution granulométrique des aérosols en suspension.

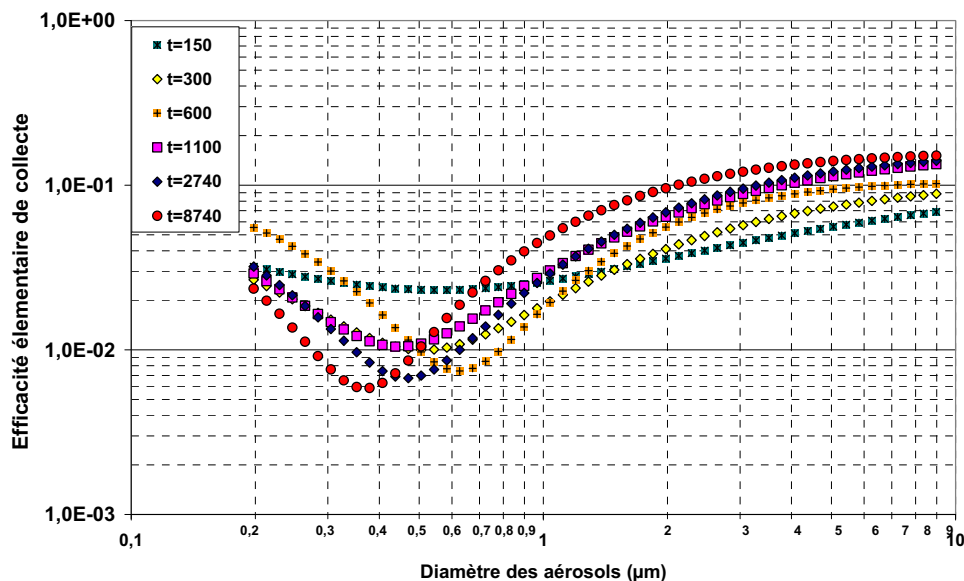


Fig. 4-24 Efficacité élémentaire de collecte à différents temps pour chaque classe de taille d'aérosol (en L1)

#### Facteur de Décontamination (FD)

Pour terminer l'analyse de l'essai de référence AG0, les facteurs de décontamination définis par l'Eq. (4.3) sont tracés pour les essais avec et sans aspersion sur la Fig. 4-25 ainsi que le FD calculé avec la valeur constante ( $\lambda = 4 \text{ h}^{-1}$ ) du taux de rabattement du spray souvent pris par la littérature (Powers et Burson, 1993a; Ducret et al., 1998a) pour un volume de spray identique au volume du gaz et un débit d'aspersion de goutte monodispersée constant (pour une seule rampe d'aspersion activée).

Au cours de l'essai AG0, les facteurs de décontamination sont quasiment identiques pour les deux points de prélèvements L1 et L2. On signalera juste comme attendu que le FD est meilleur pour l'essai avec aspersion par rapport à celui sans aspersion. Après 3 h, un rapport 100 existe entre les 2 essais.

Les valeurs de FD des essais avec aspersion sont du même ordre de grandeur que les estimations de Ducret (1998a) et Powers (1993a) et les évaluations de Parsly (1971a) qui trouvent un  $\text{FD} \approx 100$  après 1 h.

Le FD calculé avec la valeur constante de  $\lambda = 4 \text{ h}^{-1}$  sous estime dans la première heure la décontamination au cours de l'essai avec aspersion (AG0). A l'inverse, après une heure, le FD calculé surestime la décontamination.

Alors que la décontamination progresse, le taux de rabattement des aérosols ralentit, ainsi il n'est pas constant au cours du temps. Au début de l'aspersion, les effets inertiels et phorétiques sont importants, or ils ne dépendent pas fortement de la taille des aérosols et de la taille de gouttes.

Comme vue précédemment Fig. 4-19, l'évolution de la distribution en taille des aérosols dévie progressivement vers les classes pour lesquelles le rabattement est le moins efficace. Le fait que le mode de la distribution des aérosols se translate vers les petites classes de taille montre que les effets (de diffusion et d'interception) qui dépendent des tailles de ces aérosols sont, à ce moment, les mécanismes principaux impliqués dans la collecte des aérosols.



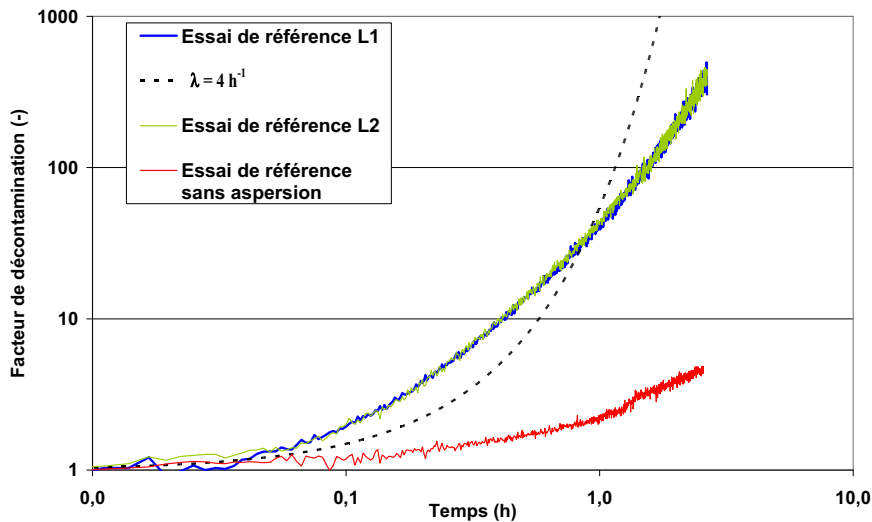


Fig. 4-25 Facteur de Décontamination en fonction du temps pour les essais AG0 et S0

## 4.5. INFLUENCE DU DEBIT D'ASPERSION

Après avoir décrit l'essai de référence AG0 (débit d'aspersion de 10 g/s), nous étudions l'influence du débit d'aspersion sur la collecte des aérosols. De nombreux auteurs ((Hilliard et Postma, 1971; Grist, 1982; Plumecocq, 1997) ont montré l'influence du débit d'aspersion sur le rabattement mais peu d'étude expérimentale ont été réalisées dans des conditions bien maîtrisées. Dans ce paragraphe, l'influence du débit est étudié pour deux températures d'aspersion différentes : une dites « froide » pour l'injection des gouttes, induisant une différence importante de température entre les gouttes injectées et le gaz afin d'étudier globalement l'ensemble des mécanismes de collecte. Une autre gamme de température (dites « chaude ») a été choisie, voisine de la température du gaz, de manière à limiter la collecte des aérosols par les effets phorétiques.

### 4.5.1. ESSAIS AVEC UNE TEMPERATURE D'INJECTION DES GOUTTES « FROIDES »

2 essais sont réalisés en fixant le débit  $Q_{asp}$  respectivement à 5 g/s et 18 g/s. Ces essais correspondent au numéro AG51 et AG52 de la grille d'essais. Les conditions initiales de ces essais sont rappelées dans le tableau suivant :

**Tableau 4-3 Conditions initiales des essais à t = 0 s**

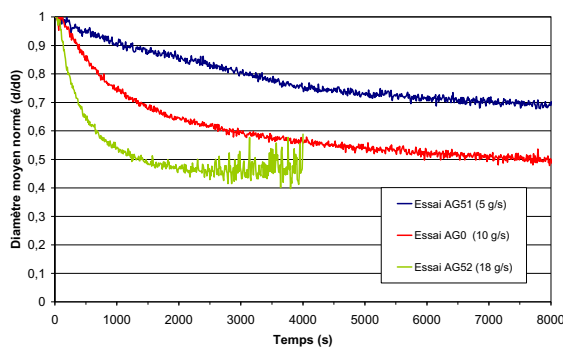
	Thermohydrauliques			Aspersion				Aérosols	
	P <sub>abs</sub> (bar)	T <sub>gaz</sub> (K)	s	Q <sub>asp</sub> (g/s)	T <sub>asp,inj</sub> (K)	d <sub>goutte,inj</sub> (μm)	Angle (°)	m <sub>a_init</sub> (g)	d <sub>10</sub> (μm)
<b>Essai en fonction du débit d'aspersion</b>	<b>1,49</b>	<b>367,5</b>	<b>0,44</b>	Q <sub>asp</sub>	<b>298</b>	<b>100</b>	<b>19</b>	<b>1</b>	<b>0,8</b> (σ=1,8)

Les figures Fig. 4-26 et Fig. 4-27 présentent les évolutions temporelles des diamètres moyens normés et de la masse d'aérosols normée au cours des 3 essais. La modification du débit va influencer l'angle de spray, la vitesse et le diamètre des gouttes.

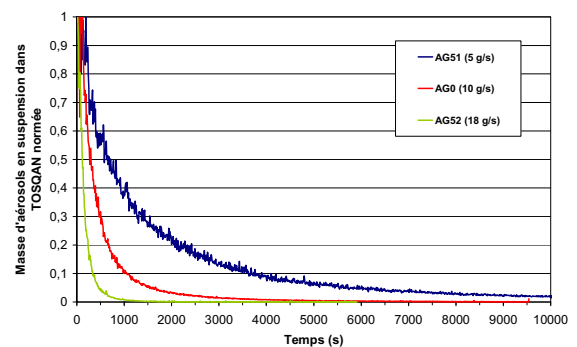
Concernant la diminution du débit d'aspersion, elle implique une plus lente décroissance de la masse en suspension liée à la diminution plus lente du diamètre moyen des aérosols en suspension. Cette dernière est moins rapide, étant donné que le débit numérique de gouttes injecté est plus faible malgré un diamètre de goutte plus important. En revanche, la vitesse d'injection plus faible à 5 g/s qu'à 10 g/s (cf. §3.4.3) induit une diminution de l'intensité des effets mécaniques. En effet, à 5 g/s le diamètre des gouttes est 40 % plus important que pour l'essai de référence AG0. De plus quelque soit le débit d'aspersion, la variation du diamètre des gouttes au cours de leur chute est inférieure à 5 %. Les gouttes atteindront donc leur vitesse terminale à une distance de la buse d'injection plus courte pour l'essai AG51 limitant ainsi la zone où l'efficacité de collecte a lieu par les effets phorétiques en ne faisant varier que très peu les effets mécaniques.

L'efficacité globale du spray est aussi fonction de la surface totale d'échange entre les gouttes et les aérosols, elle est donc naturellement fonction du débit.

Concernant l'augmentation de débit de 10 g/s à 18 g/s, le paramètre modifié de façon prépondérante est la vitesse des gouttes à l'injection donc le débit de gouttes, ce qui se traduit par un accroissement de la surface de collecte. Pour le débit d'aspersion égal à 18 g/s, les gouttes atteindront dans l'enceinte, leur vitesse terminale à une distance de la buse plus importante, modifiant ainsi la collecte par les effets mécaniques et phorétiques.



**Fig. 4-26 Evolutions du diamètre moyen normé des aérosols pour les essais AG51, AG0 et AG52**



**Fig. 4-27 Evolutions de la masse normée d'aérosol en suspension pour les essais AG51, AG0 et AG52**

Pour conforter cette étude, sont tracées Fig. 4-28, Fig. 4-29 et Fig. 4-30 les efficacités globales du spray (définie par l'Eq. (4.1)) en fonction des classe de taille, pour les essais réalisés à différents débits.

La diminution du débit d'aspersion par rapport à l'essai de référence ne semble pas modifier de façon significative les classes d'aérosols où l'efficacité est minimum. Elle est toujours minimum pour des classes autour de  $0,3 \mu\text{m}$  et  $0,4 \mu\text{m}$ .

En revanche l'augmentation du débit par rapport à l'essai de référence permet de rabattre plus rapidement les aérosols des classes supérieurs à  $0,8 \mu\text{m}$  en augmentant les effets mécaniques liés aux phénomènes d'impaction et d'interception. On notera que la dynamique de rabattement de ces classes est la même pour un débit de  $18 \text{ g/s}$  mais que le minimum d'efficacité de collecte semble se rapprocher de celui de la classe de taille d'aérosol de  $0,2 \mu\text{m}$ .

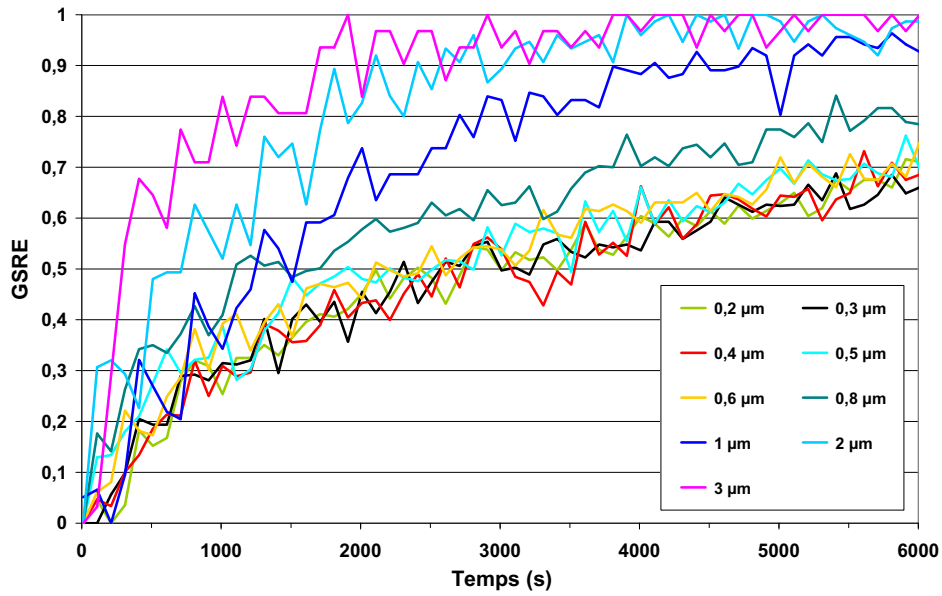


Fig. 4-28 Evolutions temporelles de l'efficacité globale de décontamination (en L1) pour l'essai AG51 à un débit de  $5 \text{ g/s}$

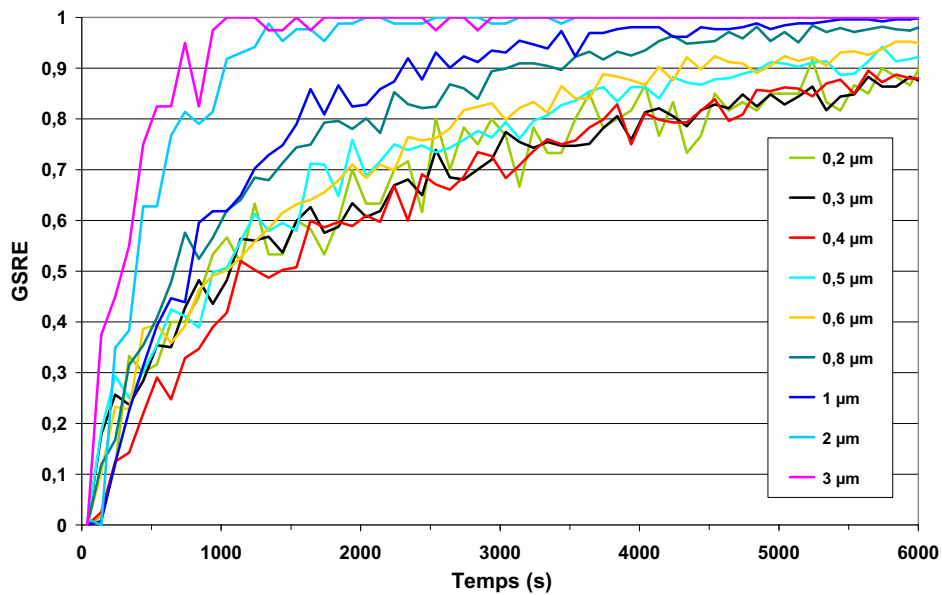


Fig. 4-29 Evolutions temporelles de l'efficacité globale de décontamination (en L1) pour l'essai AG0 à un débit de  $10 \text{ g/s}$

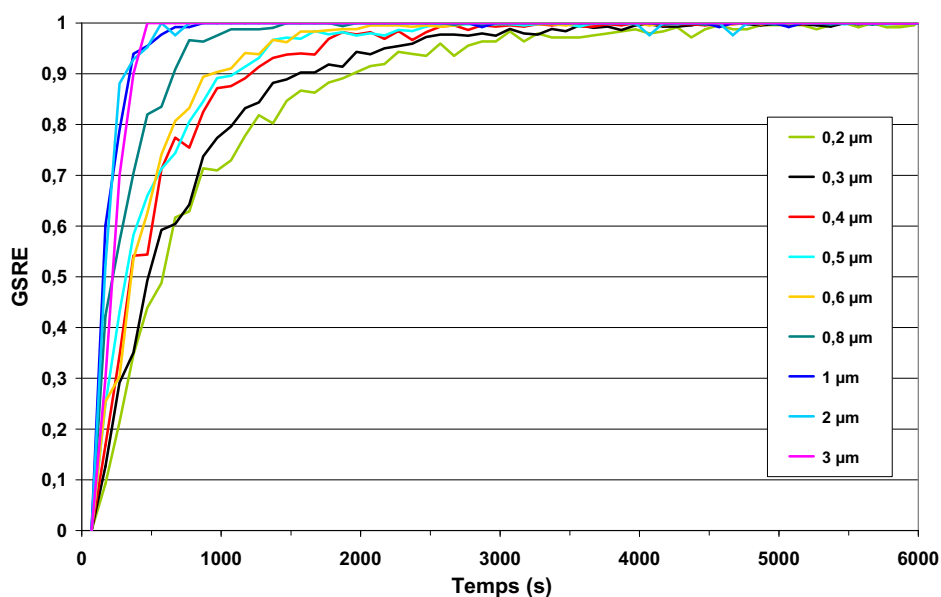


Fig. 4-30 Evolutions temporelles de l'efficacité globale de décontamination (en L1) pour l'essai AG52 à un débit de 18 g/s

#### Efficacité totale de collecte d'une goutte

A l'aide de la méthode présentée au paragraphe 4.4, nous déterminons les efficacités totales de collecte d'une goutte pour les essais AG51 et AG52 afin de les comparer à l'essai de référence à partir des données obtenues dans le gaz.

Le Tableau 4-4 présente les valeurs du taux de rabattement obtenue pour les deux périodes correspondant aux deux régimes rabattement précédemment identifiés (rabattement pour  $t = 0$  s à  $t = 400$  s essai AG51 et AG0 et  $t = 0$  s à  $t = 300$  s essai AG52 et rabattement limité par le transfert pour  $t > 400$  s AG51 et AG0, et  $t > 300$  s essai AG52 à 2000 s).

En diminuant le débit d'un facteur 2 (essai AG51) par rapport à l'essai de référence, on diminue le taux de rabattement d'un facteur 2,3 pour la première période et d'un facteur 2,6 pour la seconde période en raison de la diminution de l'efficacité de collecte des gouttes à induite par la réduction de la surface totale de collecte des gouttes et de la vitesse des gouttes. En revanche augmenter le débit d'un facteur 1,8 (essai AG52) permet une augmentation du taux de rabattement d'un coefficient 2,8 pour les deux périodes. L'augmentation de débit qui permet d'obtenir des gouttes d'eau injectée avec un diamètre plus faible (cf. §3.4.3), induit un meilleur rabattement des aérosols.

Tableau 4-4 Taux de rabattement ( $10^{-4} s^{-1}$ ) à partir des données du gaz

Essai	AG51	AG0	AG52
Période (s)	5 g/s	10 g/s	18 g/s
0 – (300-400)	8,8	20,2	56,8
(300-400) – 2000	4,2	10,9	30,8

## Efficacité élémentaire de collecte d'une goutte

Les efficacités élémentaires de collecte d'une goutte en fonction des diamètres des aérosols pour 3 débits sont présentées sur les Fig. 4-31, Fig. 4-32 et Fig. 4-33. Elles sont calculées à l'aide de la l'Eq. (4.12). La faible population d'aérosol dont le diamètre est supérieur à 3  $\mu\text{m}$  (Fig. 4-18) engendre une grande incertitude ce qui ne permet pas d'interpréter les données.

On notera la diminution générale de l'efficacité élémentaire de collecte pour toutes les classes de taille d'aérosol pour l'essai à 5 g/s par rapport à l'essai de référence.

Comme nous l'avons vu précédemment la diminution de la vitesse d'injection des gouttes et l'augmentation du diamètre initiale de la goutte contribue à minimiser l'efficacité élémentaire de collecte d'une goutte par effet mécanique lié à l'interception et l'impaction pour les aérosols de diamètre supérieur à 1  $\mu\text{m}$  ainsi que les aérosols inférieurs à 0,5  $\mu\text{m}$  (lié à la diffusion).

Quant aux effets phorétiques qui ont lieu dans les premiers centimètres de chute des gouttes, leur diminution est due au fait que les gouttes atteignent leur température d'équilibre à une distance plus courte de l'injection et ainsi le volume de la zone où interviennent ces effets diminue.

Concernant l'augmentation du débit à 18 g/s (Fig. 4-33), on notera que l'efficacité élémentaire de collecte de la goutte sur les aérosols de diamètre supérieur à 0,8  $\mu\text{m}$  est sensiblement du même ordre de grandeur que celle obtenue pour l'essai de référence, ceci étant lié à la faible différence de vitesse d'injection des gouttes. En revanche, la légère diminution du diamètre des gouttes injectées semble influencer sur les mécanismes d'interception dont l'effet est visible sur les aérosols de diamètre compris entre 0,6  $\mu\text{m}$  et 1  $\mu\text{m}$ . Ceci implique une diminution du diamètre des aérosols où l'efficacité de collecte élémentaire est minimum, pour atteindre après 2740 s les classes de taille d'aérosol de 0,3  $\mu\text{m}$ .

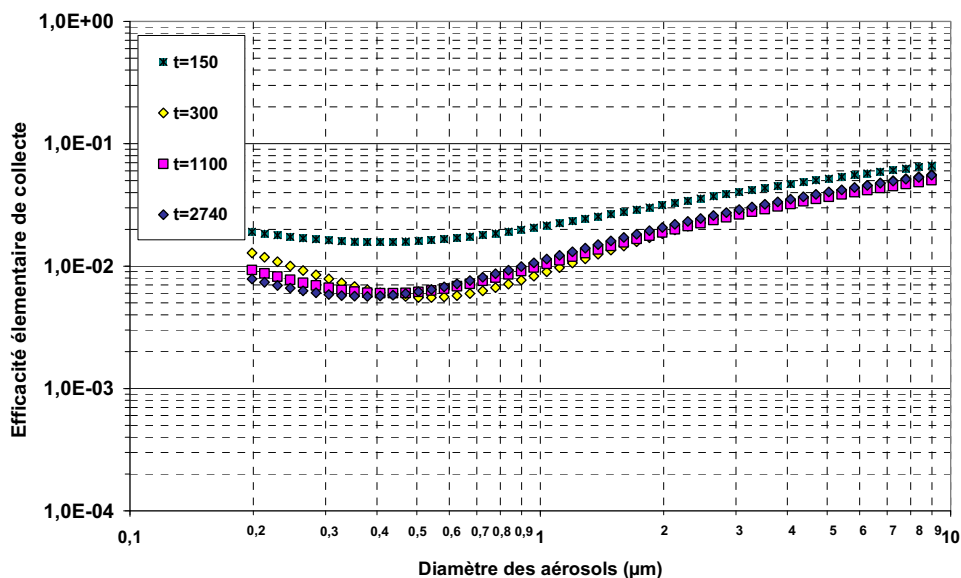


Fig. 4-31 Efficacité élémentaire de collecte pour l'essai à 5 g/s (AG51)

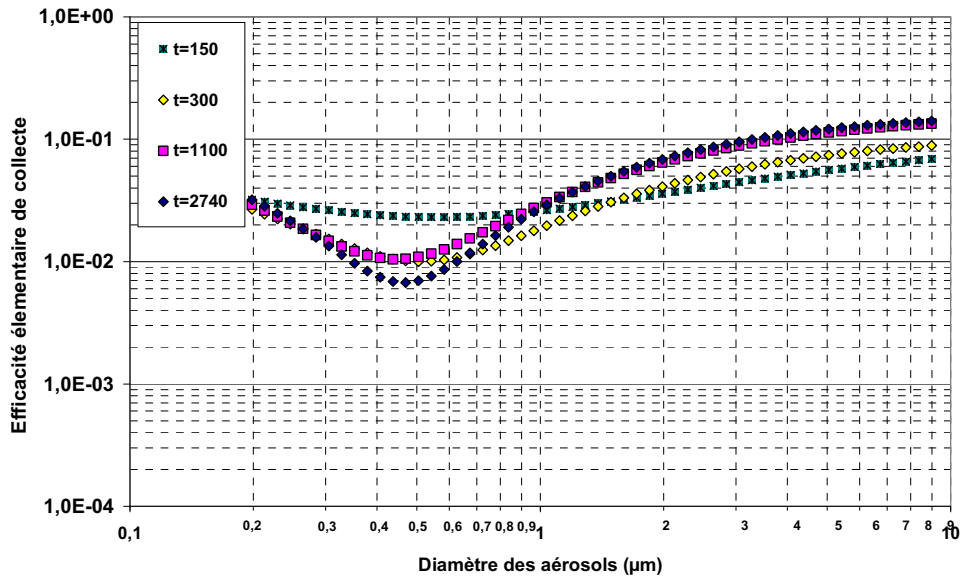


Fig. 4-32 Efficacité élémentaire de collecte pour l'essai de référence à 10 g/s (AG0)

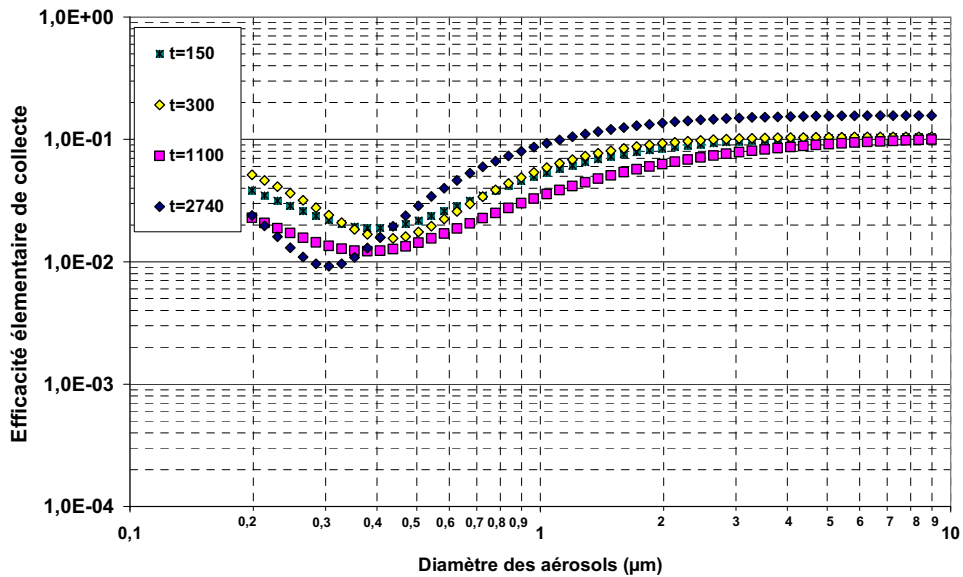


Fig. 4-33 Efficacité élémentaire de collecte pour l'essai à 18 g/s (AG52)

### Facteur de Décontamination

Pour terminer l'étude de l'influence du débit d'injection des gouttes à une température de 30 °C, les facteurs de décontamination sont tracés pour les 3 débits sur la Fig. 4-34.

On notera que l'augmentation du débit d'aspersion influence directement sur la décontamination de l'enceinte dès les premières secondes et jusqu'à la fin de l'essai.

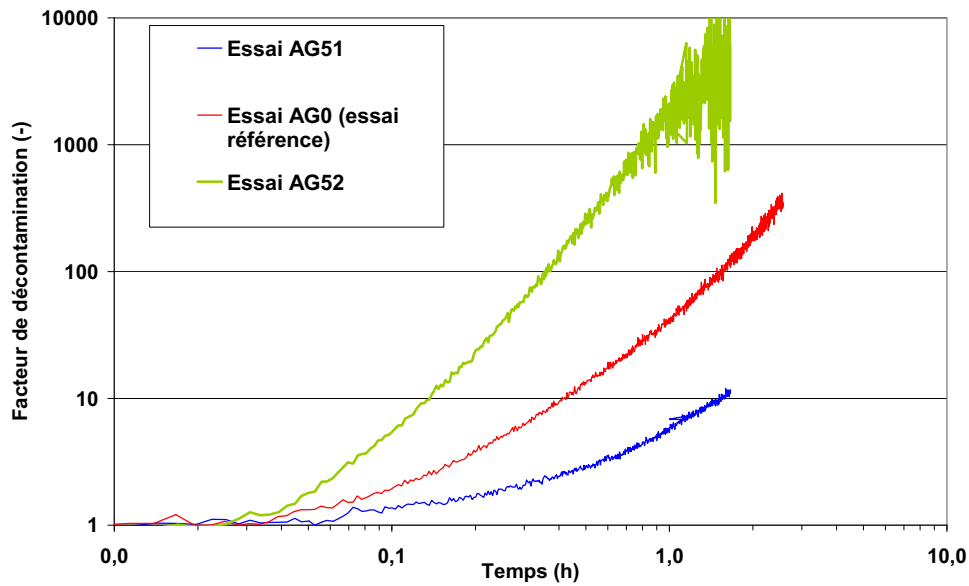


Fig. 4-34 Facteur de décontamination en fonction du débit massique d'aspersion des gouttes injectées à une température de 30 °C

#### 4.5.2. ESSAIS AVEC UNE TEMPERATURE D'INJECTION DES GOUTTES « CHAUDES »

Les essais avec une température d'aspersion dite « chaude » sont dimensionnés pour limiter l'impact des effets phorétiques sur le rabattement des aérosols de manière à pouvoir étudier de façon la plus découplée possible, les effets mécaniques. D'autres auteurs dans des études précédentes (Hilliard et al., 1971; Ducret et al., 1998a; Viswanathan, 1999) ont utilisé ce mode opératoire.

La température d'injection des gouttes étant sensiblement proche de celle du gaz, les gradients de température entre le gaz et les gouttes (thermophorèse) et les gradients de concentration de vapeur autour des gouttes (diffusiophorèse) sont limités.

3 essais sont réalisés et correspondent au numéro AG10, AG11 et AG12 de la grille d'essais respectivement effectués à un débit d'aspersion de 5 g/s, 10 g/s et 18 g/s. La température du gaz et de l'eau d'aspersion sont fixés à 100 °C.

Les conditions initiales fixes des essais sont résumées dans le Tableau 4-5, elles correspondent au moment  $t = 0$  s du déclenchement de l'aspersion.

Tableau 4-5 Conditions initiales des essais à  $t = 0$  s

	Thermohydrauliques			Aspersion				Aérosols	
	$P_{abs}$ (bar)	$T_{gaz}$ (K)	s	$Q_{asp}$ (g/s)	$T_{asp,inj}$ (K)	$d_{goutte,inj}$ ( $\mu m$ )	Angle ( $^{\circ}$ )	$m_{a\_init}$ (g)	$d_{10}$ ( $\mu m$ )
<b>Essai en fonction du débit d'aspersion</b>	<b>1,49</b>	<b>373</b>	<b>0,44</b>	$Q_{asp}$	<b>373</b>	<b>100 – 140</b>	<b>19</b>	<b>1</b>	<b>0,8 (<math>\sigma = 1,8</math>)</b>

Avec  $Q_{asp}$  qui prends successivement les valeurs 5, 10 et 20 g/s.

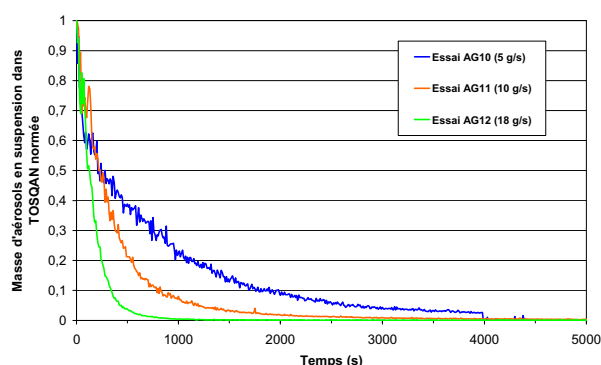
Afin de comparer les données obtenues pour ces 3 débits nous comparons les évolutions temporelles de la masse normée d'aérosols en suspension puis nous en déduisons les taux de rabatement.

Les figures Fig. 4-35 et Fig. 4-36 présentent les évolutions temporelles de la masse d'aérosols normée et des diamètres moyens normés au cours des 3 essais considérés.

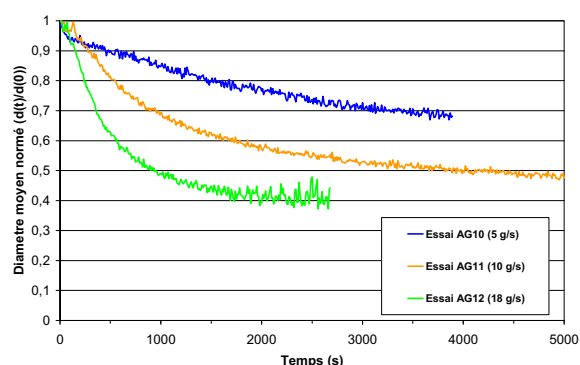
Avec une température d'injection des gouttes « chaudes », l'influence de l'augmentation du débit d'aspersion sur la masse et le diamètre moyen des aérosols en suspension est similaire à celle vue précédemment avec les gouttes injectées à 20 °C, à savoir :

Plus le débit augmente plus la masse d'aérosols en suspension diminue rapidement.

De plus, le rabatement rapide des aérosols de diamètre supérieur à 1  $\mu\text{m}$  (Fig. 4-37, Fig. 4-38 et Fig. 4-39) contribue à diminuer rapidement la masse en suspension. Concernant la diminution du diamètre moyen, les mêmes effets produisent les mêmes conséquences en terme de diminution de diamètre moyen.



**Fig. 4-35 Evolutions de la masse normée d'aérosol en suspension pour les essais AG10, AG11 et AG12**



**Fig. 4-36 Evolutions du diamètre moyen normé des aérosols pour les essais AG10, AG11 et AG12**

L'étude de l'évolution du nombre d'aérosols par classe via le calcul du GSRE (Fig. 4-37, Fig. 4-38 et Fig. 4-39) montre aussi les mêmes conclusions que pour des gouttes injectées à une température de 30 °C : une diminution plus rapide du nombre d'aérosols par classe avec l'augmentation du débit.

On notera que le diamètre où l'efficacité de collecte est minimale, se situe aux alentours de 0,3  $\mu\text{m}$  pour les essais dont le débit est de 5 ou 10 g/s alors qu'il diminue pour l'essai à 18 g/s (autour de 0,2  $\mu\text{m}$ ).



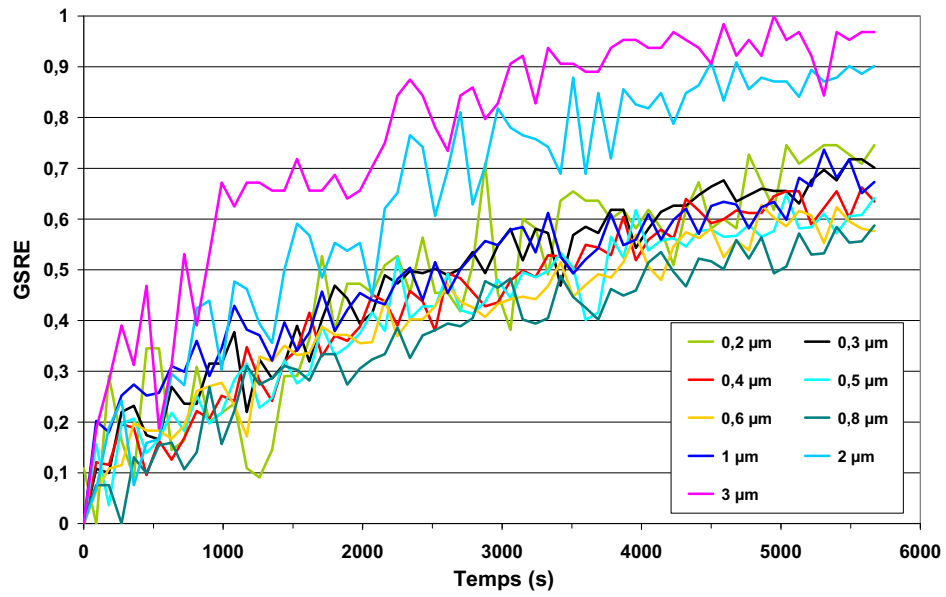


Fig. 4-37 Evolutions temporelles de l'efficacité globale de décontamination (en L1) pour l'essai AG10

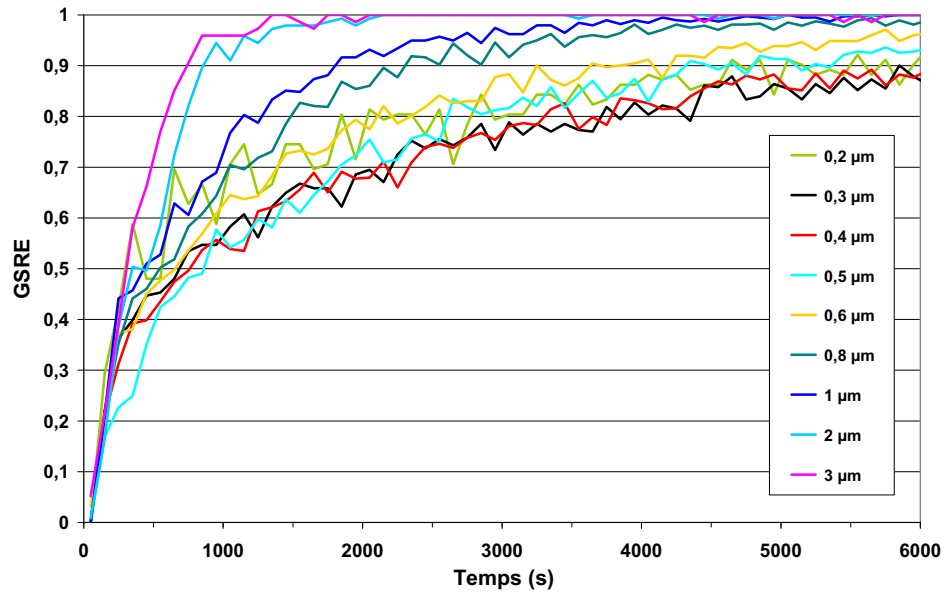


Fig. 4-38 Evolutions temporelles de l'efficacité globale de décontamination (en L1) pour l'essai AG11

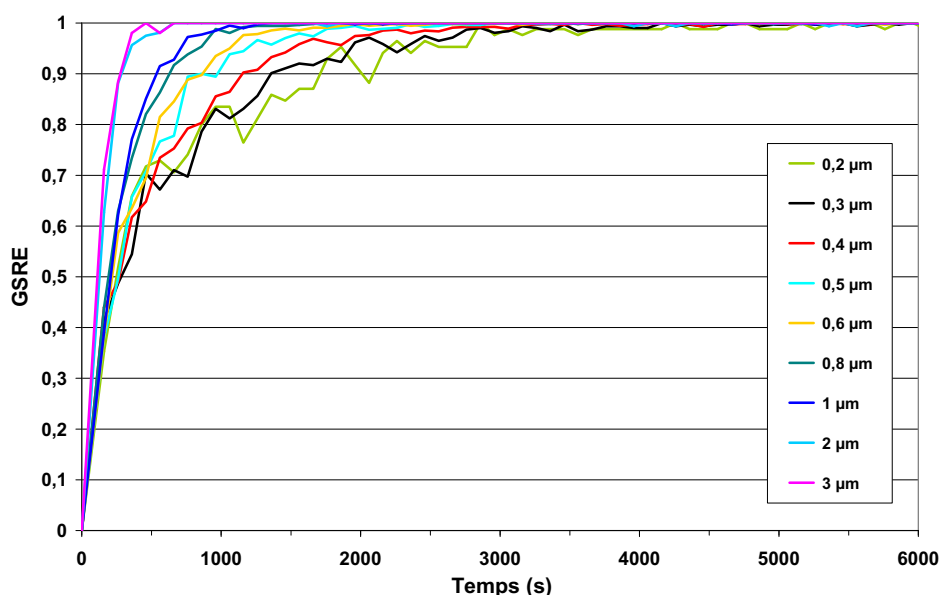


Fig. 4-39 Evolutions temporelles de l'efficacité globale de décontamination (en L1) pour l'essai AG12

### Efficacité totale de collecte d'une goutte

Méthode à partir des données obtenues dans le gaz :

Toujours à l'aide de la méthode présentée au paragraphe 4.4, nous déterminons l'efficacité totale de collecte d'une goutte pour les 3 essais avec une température des gouttes d'aspersion « chaudes » afin de comparer le rabattement à partir des données obtenues dans le gaz.

Le Tableau 4-6 présente les valeurs du taux de rabattement obtenues pour les deux périodes correspondant soit à un régime dominant dit « d'épuration » (0 s à 400 s essai AG10 et AG11, et 0 s à 300 s essai AG12) et soit à un régime où le rabattement est limité par le transfert des aérosols de la zones hors du spray vers la zone de spray (400 s à 2000 s essai AG10 et AG11, et 300 s à 2000 s essai AG12).

Tableau 4-6 Taux de rabattement ( $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ) à partir des données du gaz

Essai	AG10	AG11	AG12
Période (s)	5 g/s	10 g/s	18 g/s
0 – (300-400)	8,2	19,9	54,4
(300-400) – 2000	6,5	7,8	29,4

La température des gouttes (« chaudes ») limite les effets phorétiques (diffusiophorèse et thermophorèse), et par conséquent diminue l'efficacité de collecte des aérosols des petites classes où ces phénomènes phorétiques dominaient en début d'essai dans le cas de gouttes injectées avec une différence importante de température par rapport à celle du gaz.

## Efficacité élémentaire de collecte d'une goutte

Les efficacités élémentaires de collecte d'une goutte en fonction des diamètres des aérosols pour 3 débits, avec une température d'aspersion « chaude », sont présentées sur les Fig. 4-40, Fig. 4-41 et Fig. 4-42. Elles sont calculées à l'aide de la l'Eq. (4.12). La faible population d'aérosol dont le diamètre est supérieur à 3  $\mu\text{m}$  (Fig. 4-18) engendre une grande incertitude ce qui ne permet pas d'interpréter les données.

Comme nous l'avons vu précédemment, on notera la diminution générale de l'efficacité élémentaire de collecte pour toutes les classes avec la diminution du débit d'aspersion. Concernant les essais AG11 et AG12 les variations de diamètre et de vitesse des gouttes injectées étant faibles, on notera que l'efficacité élémentaire de collecte de la goutte sur les aérosols de diamètre supérieur à 0,8  $\mu\text{m}$  est sensiblement du même ordre de grandeur.

En revanche, on notera le diamètre ou l'efficacité de collecte est minimum pour les essais à 10 g/s et 18 g/s est identique alors qu'il augmente légèrement à un débit à 5 g/s.

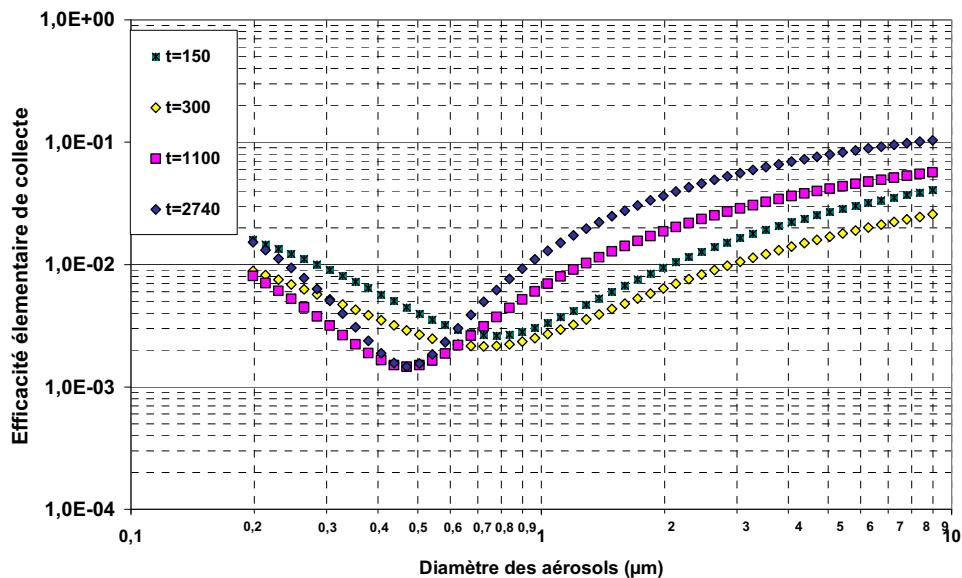


Fig. 4-40 Efficacité élémentaire de collecte pour l'essai à 5 g/s (AG10)

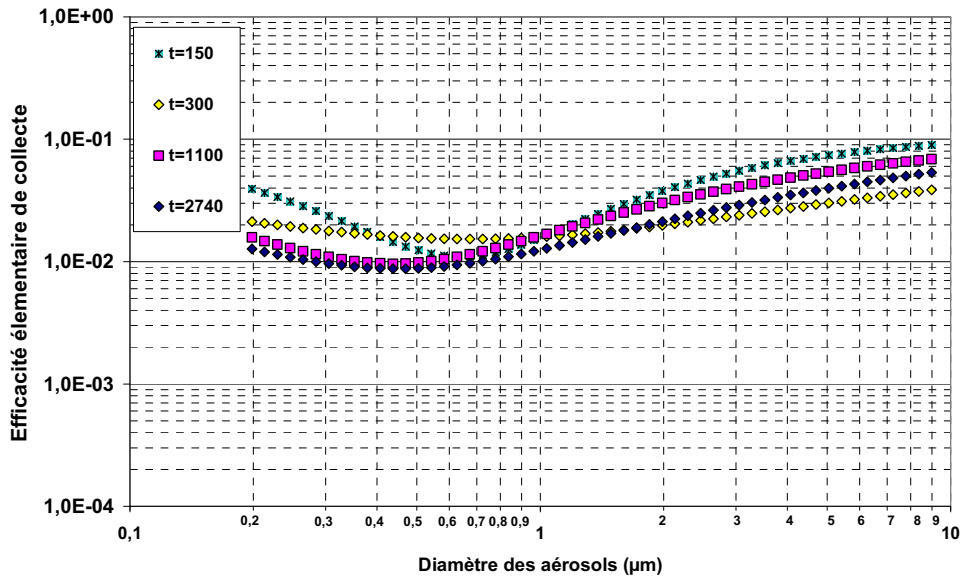


Fig. 4-41 Efficacité élémentaire de collecte pour l'essai à 10 g/s (AG11)

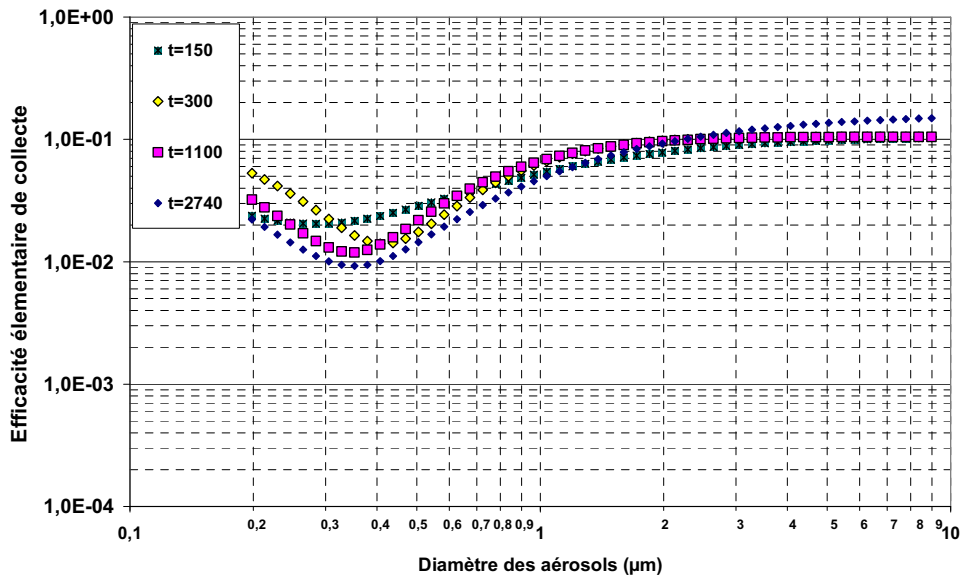


Fig. 4-42 Efficacité élémentaire de collecte pour l'essai à 18 g/s (AG12)

Les efficacités moyennes pour la période 2 (cf. §4.4) de chaque essai sont représentées sur la Fig. 4-43. On remarquera les différences d'amplitude d'efficacité de collecte quelles que soient les classes de taille d'aérosol avec des variations importantes entre 0,4  $\mu\text{m}$  et 2  $\mu\text{m}$  liées aux variations des diamètres et des vitesses des gouttes pour les 3 essais considérés (paragraphe §2.4.2). De plus, dans cette plage de classe de taille d'aérosol, le diamètre où l'efficacité est minimale augmente avec le débit d'aspersion.

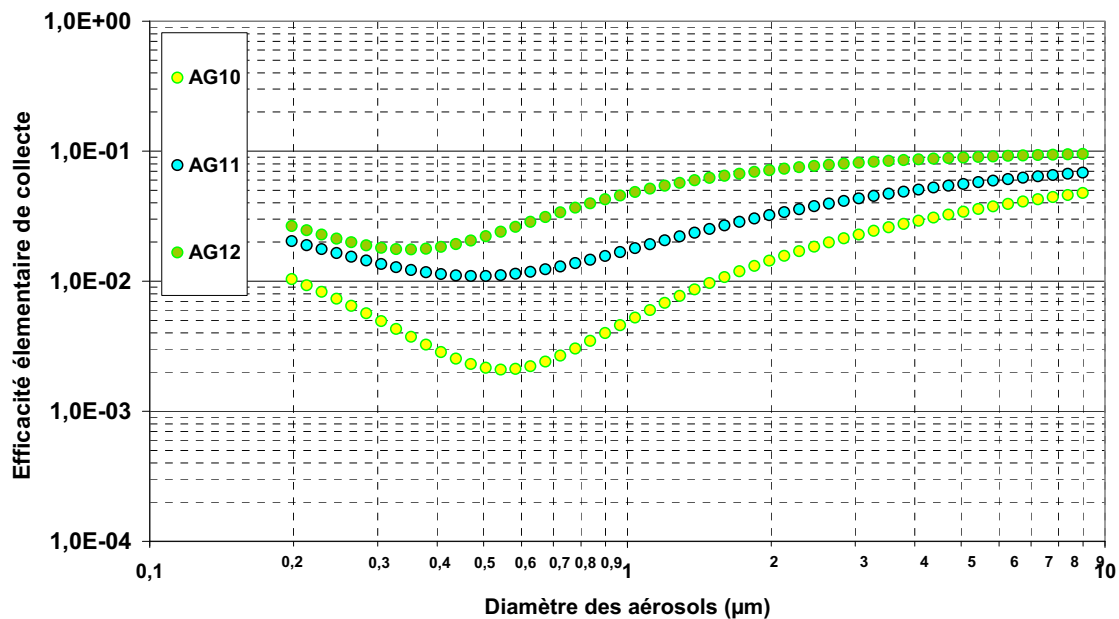


Fig. 4-43 Efficacités moyennes pour les 3 essais à température d'aspersion « chaude » pendant la période 2

#### Facteur de Décontamination

Pour terminer l'étude de l'influence du débit d'injection des gouttes à une température de 100 °C, les facteurs de décontamination pour les 3 débits sont tracés Fig. 4-44.

On notera que l'augmentation de débit influe directement sur la décontamination de l'enceinte dès les premières secondes et jusqu'à la fin de l'essai comme nous l'avons vu à une température d'aspersion « froide ».

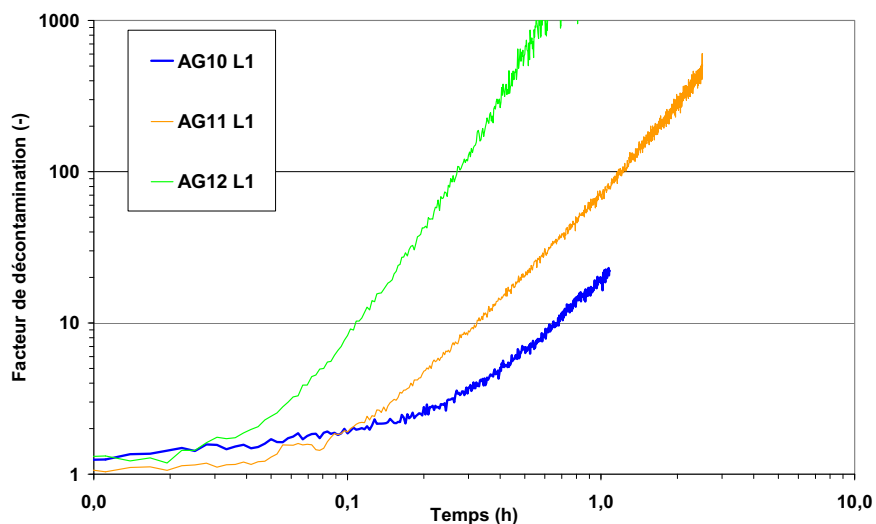


Fig. 4-44 Facteur de décontamination en fonction du débit massique d'aspersion des gouttes injectées à une température de 100 °C

## 4.6. INTER-COMPARAISON : INFLUENCE DE LA TEMPERATURE A DEBIT CONSTANT

Dans ce paragraphe est réalisée une inter-comparaison de l'influence de la température d'injection des gouttes à débit constant sur les effets gouvernant la collecte des aérosols par des gouttes d'eau. Pour se faire, les efficacités moyennes pour chaque classe d'aérosol obtenue au cours de la période 2 de chaque essai sont comparées.

### 4.6.1. DEBIT D'APERSION DE 5 G/S

La Fig. 4-45 présente les efficacités moyennes en fonction de la température d'injection des gouttes pour un débit de 5 g/s pour les essais AG10 (température d'injection des gouttes « chaudes ») et AG51 (température d'injection des gouttes « froides »). La vitesse d'injection des gouttes est sensiblement la même pour un débit d'aspersion identique.

Au cours de l'essai AG10, la température des gouttes d'eau injectées est sensiblement la même que celle du gaz. En revanche l'essai AG51 réalisé avec une température d'injection des gouttes nettement plus froide que celle du gaz, les effets mécaniques et phorétiques sont couplés augmentant globalement l'efficacité de collecte comme on peut le constater sur la Fig. 4-45 pour les diamètres des aérosols comprise entre 0,4  $\mu\text{m}$  et 1  $\mu\text{m}$ . En effet, le diamètre minimum d'efficacité pour une température d'injection « froides » est de 0,4  $\mu\text{m}$  alors qu'il augmente à 0,6 – 0,7  $\mu\text{m}$  pour une température d'injection « chaudes ».

Nous pouvons observer que les courbes sont confondues à leur extrémité. Ceci est du au fait que les effets phorétiques ne contribuent que peu à la collecte pour ces classes de taille d'aérosol.

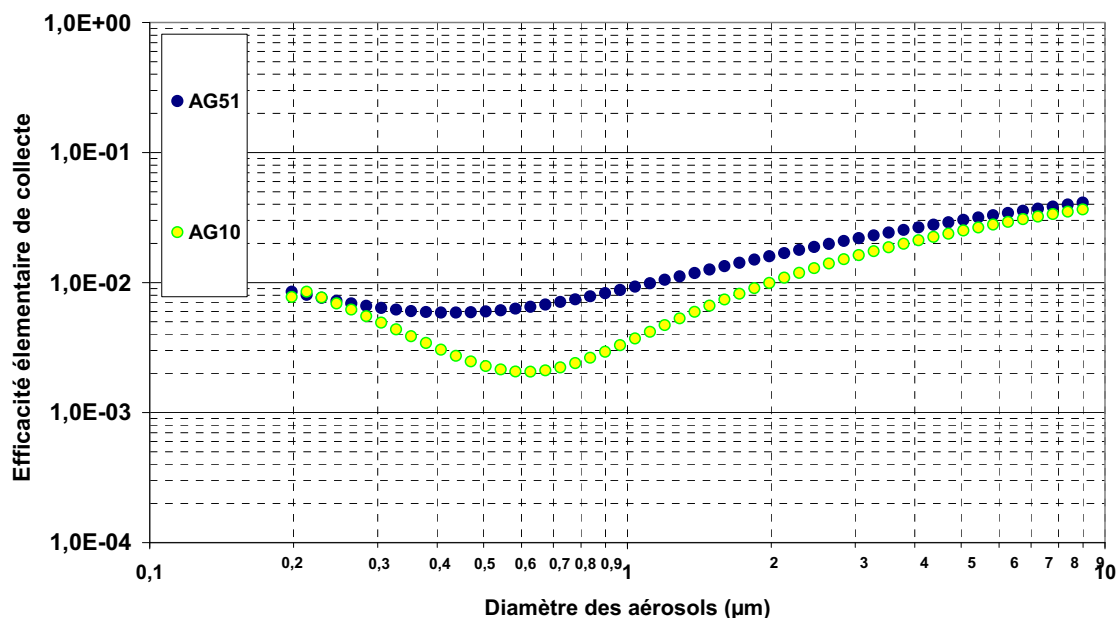


Fig. 4-45 Efficacités moyennes pour un débit de 5 g/s pendant la période 2 en fonction de la température d'injection des gouttes

#### 4.6.2. DEBIT D'APERSION DE 10 G/S

La Fig. 4-46 présente les efficacités moyennes en fonction de la température d'injection des gouttes pour un débit de 10 g/s pour les essais AG11 (température d'injection des gouttes « chaudes ») et AG0 (température d'injection des gouttes « froides »).

Pour l'essai avec effet phorétique (AG0), on peut observer une augmentation du diamètre des aérosols où l'efficacité est minimum. Celui-ci passant de 0,4  $\mu\text{m}$  (pour une température d'injection des gouttes « chaudes ») à 0,5  $\mu\text{m}$  (pour une température d'injection des gouttes « froides »). On notera que pour l'essai AG0, une augmentation générale de l'efficacité de collecte observée pour les aérosols de diamètre inférieur à ce minimum d'efficacité.

A 5 g/s et 10 g/s les efficacités sont identiques dans la zone du minimum d'efficacité. En revanche on observe une tendance inverse à chaque extrémité des courbes d'efficacité, qui s'explique par le fait que les effets mécaniques augmentent en fonction du débit.

A un débit d'aspersion de 10 g/s la diminution de la température d'injection des gouttes induit une augmentation des effets phorétiques mais cette tendance semble moins marquée que pour l'essai réalisé avec un débit d'aspersion de 5 g/s. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que la dynamique du refroidissement du gaz est fonction du débit d'aspersion injecté d'eau froide qui se traduit par une augmentation des échanges convectifs (Fig. 4-48). Ainsi pour le débit égal à 10 g/s, le gradient de température entre le gaz et les gouttes d'eau froide est moins important que pour l'essai réalisé à un débit de 5 g/s. L'influence de la variation de la température d'injection des gouttes est donc minorée lorsque le débit d'aspersion augmente.

De plus, un autre effet lié à la diminution de la taille des gouttes en fonction de l'augmentation du débit peut aussi intervenir. En effet, plus la goutte est petite plus elle atteint rapidement une température d'équilibre avec le gaz environnant, ce qui réduit l'intensité des effets phorétiques.

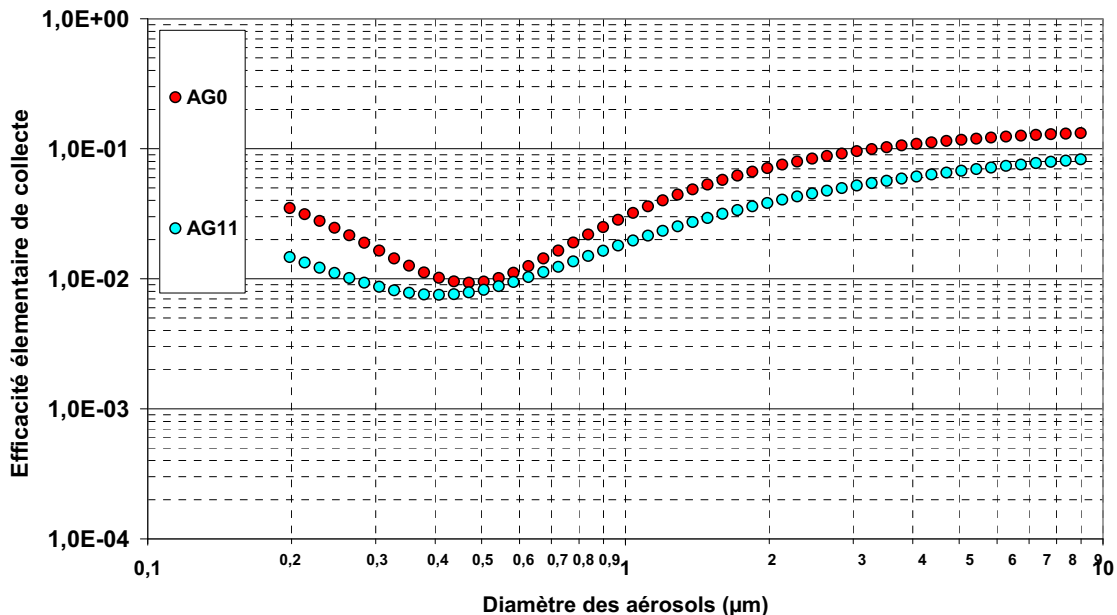


Fig. 4-46 Efficacités moyennes pour un débit de 10 g/s pendant la période 2 en fonction de la température d'injection des gouttes

### DEBIT D'APERSION DE 18 G/S

La Fig. 4-47 présente les efficacités moyennes en fonction de la température d'injection des gouttes pour un débit de 18 g/s pour les essais AG12 (température d'injection des gouttes « chaudes ») et AG52 (température d'injection des gouttes « froides »). A un débit de 18 g/s et pour nos conditions d'essai nous ne pouvons pas mettre en évidence de différences d'efficacité de collecte en fonction de la température d'aspersion (Fig. 4-47). Les conclusions émises dans le cas précédent (débit 5 g/s) s'applique aussi ici.

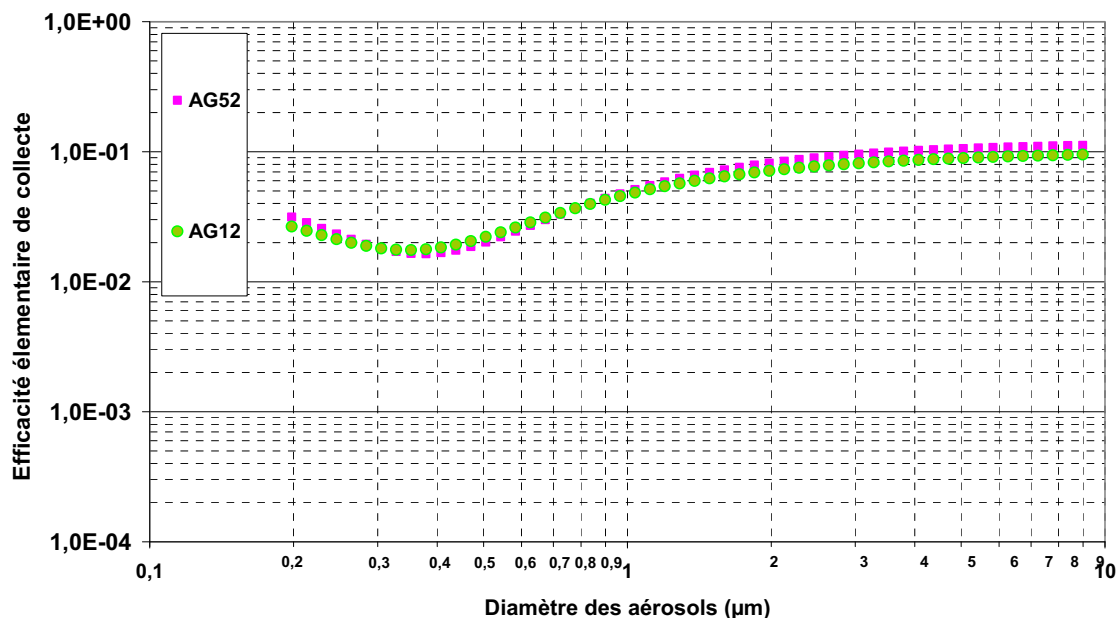


Fig. 4-47 Efficacités moyennes pour un débit de 18 g/s pendant la période 2 en fonction de la température d'injection des gouttes

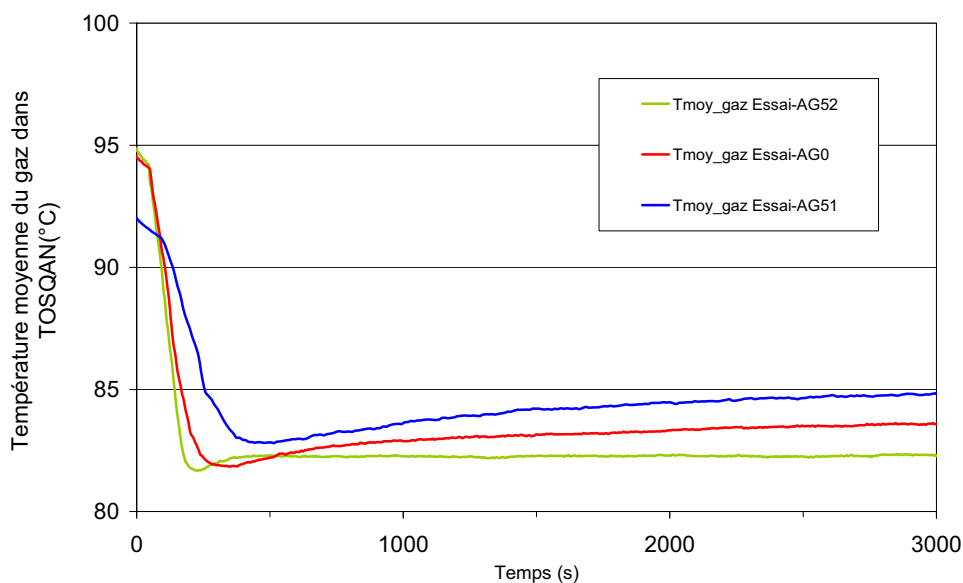


Fig. 4-48 Evolution de la température moyenne du gaz en fonction du débit



## 4.7. INFLUENCE DE LA GEOMETRIE DU SPRAY

La Fig. 4-49 présente les efficacités moyennes de collecte calculées au cours du régime permanent de l'essai, en fonction de l'angle de spray pour un débit massique d'injection d'eau de 18 g/s et une température d'injection d'eau de 30°C pour les essais AG52 et AG2. Pour ce dernier, le spray est considéré comme large.

On notera sur la Fig. 4-49 que les mécanismes de collecte par interception et impaction (pour les aérosols de diamètre supérieurs à 1µm) ne sont pas affectés par l'augmentation de la section de spray. En effet l'augmentation de la section de spray n'entraîne de modifications significatives du diamètre des gouttes injectées, seule la composante radiale de la vitesse des gouttes varie.

L'augmentation de la section de spray influe sur l'efficacité de collecte des aérosols de diamètre compris entre 0,2 µm et 1 µm. En revanche, le diamètre des aérosols présentant le minimum d'efficacité de collecte n'évolue quasiment pas. On peut juste observer que l'efficacité de collecte est plus faible pour l'essai réalisé avec la section de spray la plus large. Dans ce cas, c'est la plus faible concentration de gouttes pour l'essai AG2 qui induit cette diminution d'efficacité pour les aérosols de 0,4 µm.

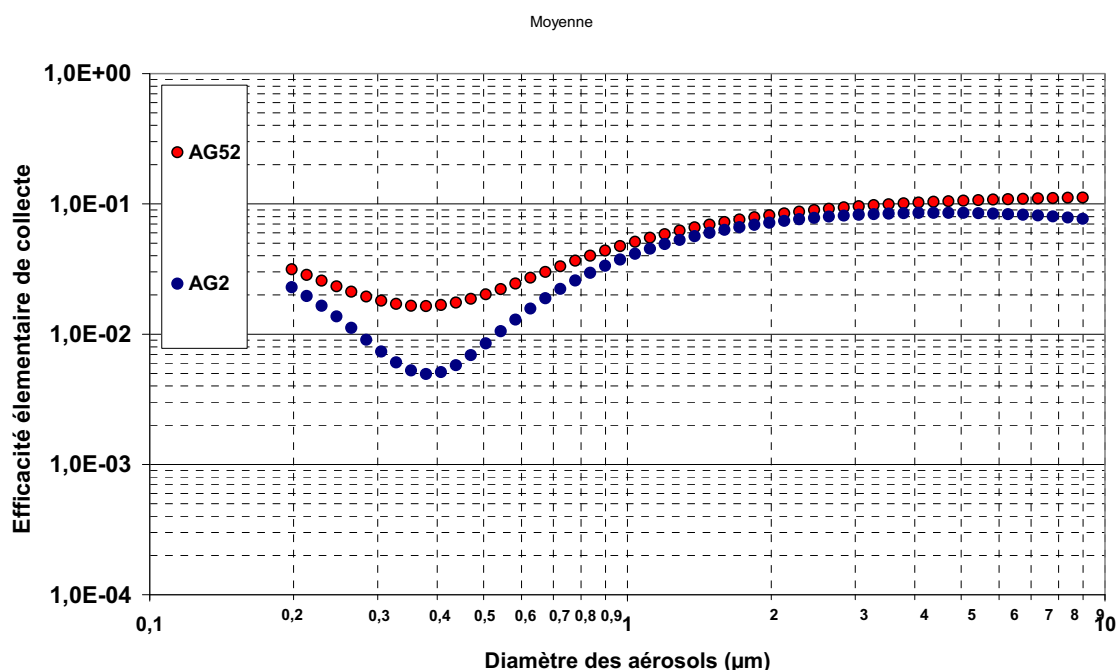


Fig. 4-49 Efficacités élémentaires moyennes de collecte pour les essais à 18 g/s (AG52 et AG2)

Pour terminer, la Fig. 4-50 présente le facteur de décontamination pour un débit de 18 g/s en faisant varier l'angle de spray pour les essais AG2 et AG52.

L'augmentation de l'angle du spray engendre une diminution du facteur de décontamination par rapport à l'essai AG0 observable Fig. 4-50. Ceci est principalement dû à la diminution de l'efficacité de collecte pour les aérosols dont le diamètre est inférieur à 0,8 µm. Même si leur masse individuelle est faible, leur nombre étant bien supérieur aux aérosols de diamètre supérieur, il apparaît, Fig. 4-50, une diminution du facteur de décontamination après 10 min d'aspersion par rapport à l'essai AG0.

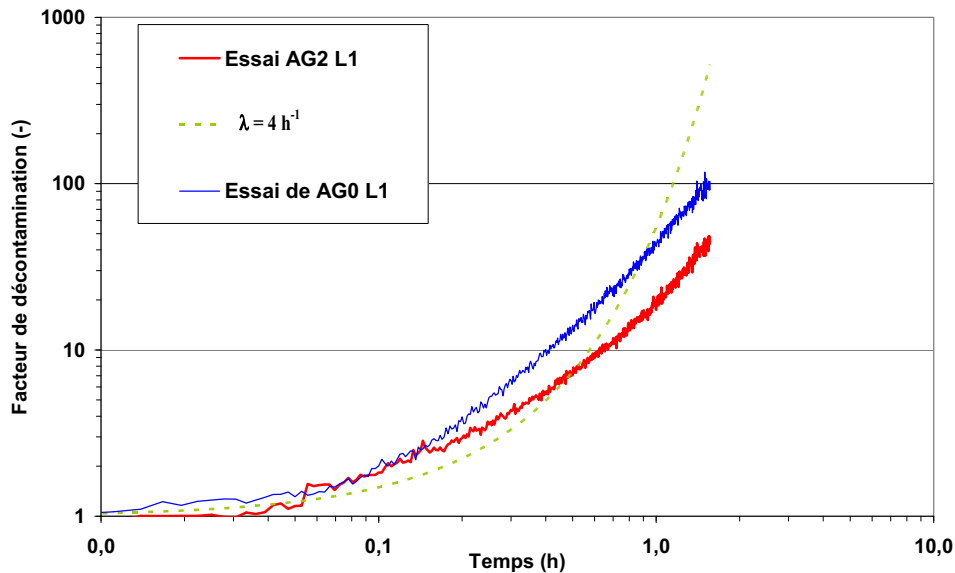


Fig. 4-50 Facteur de décontamination en fonction de la section du spray

## 4.8. COMPARAISON CODE EXPERIENCE

L'objectif de ce paragraphe est de confronter les résultats obtenus expérimentalement, aux évolutions calculées avec le module CPA du code ASTEC (cf. Chapitre 2). Une bonne adéquation entre ces résultats permettrait de valider les hypothèses retenues et les modèles proposés.

Les comparaisons concerneront les distributions granulométriques des aérosols à différents temps pour l'essai S0 sans aspersion aux résultats issus du code pour étudier les pertes par sédimentation et diffusion sur les parois. Ensuite, les résultats obtenus pour l'essai de référence sont confrontés à ceux issus des simulations en termes de distributions granulométriques, d'efficacité de collecte par les gouttes et de masse d'aérosols collectée. Enfin, l'influence des paramètres tels que le débit d'aspersion et la température d'injection des gouttes est étudiée.

### 4.8.1. ESSAI SANS ASPERSION (S0)

La Fig. 4-51 présente la comparaison des résultats expérimentaux et numériques relative aux concentrations numériques en aérosols en suspension et ceci pour différent temps.

L'étude de l'évolution temporelle des distributions granulométrique présentée sur la Fig. 4-51, montre que nous sommes dans un régime intermédiaire entre les pertes par sédimentation et les pertes par diffusion sur les parois, aucuns des phénomènes ne peut être négligés (Park et Lee, 2002).

Le code a tendance à légèrement surestimer la décroissance du nombre d'aérosols en suspension dans le gaz par rapport à l'expérience quelque soit le temps ( $t = 1000 \text{ s}$  ou  $t = 9000 \text{ s}$ ). Certaines hypothèses sont émises quant à l'origine des ces écarts entre les valeurs expérimentales et celles issues du code CPA : la non prise en compte des boucles de recirculation liées à la convection naturelle, la non prise en compte des échanges de quantité de mouvement entre les aérosols.

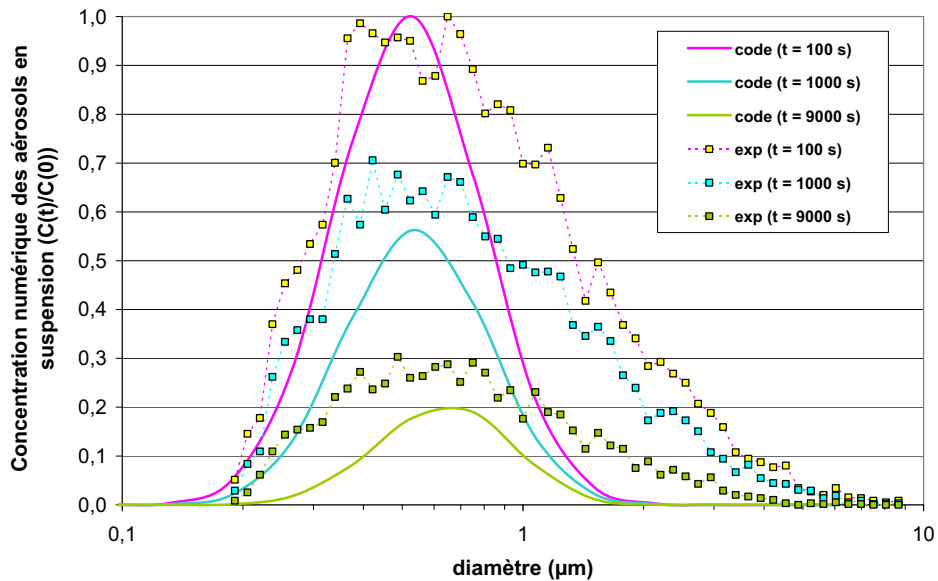


Fig. 4-51 Comparaison des concentrations numériques des aérosols en suspension dans le gaz issues du code et de l'expérience pour l'essai S0

#### 4.8.2. ESSAI DE REFERENCE AVEC ASPERSION AG0

Ce paragraphe présente les comparaisons entre les résultats expérimentaux obtenues lors de l'essai de référence AG0 et ceux issus du code CPA.

##### 4.8.2.1. Efficacité de collecte par les gouttes

L'efficacité élémentaire de collecte moyenne sur la hauteur de chute est comparée aux efficacités de collecte déterminées expérimentalement (Eq. (4.12)) sur la Fig. 4-52. On observe un bon accord entre les résultats expérimentaux et ceux issus du code qui sont du même ordre de grandeur. Mais on notera quand même une divergence entre les résultats du code et ceux de l'expérience dans l'estimation de l'efficacité moyenne pour les aérosols dont le diamètre est supérieur à  $1 \mu\text{m}$ . Ce résultat peut s'expliquer par le fait que le code CPA ne prend pas en compte directement le transfert de quantité de mouvement entre le gaz et les gouttes induisant un biais sur la vitesse des gouttes au cours de leur chute. En effet, les gouttes n'induisent ni accélération du gaz ni écoulement gazeux mais leur vitesse évolue pendant leur chute.

La sous-estimation de la vitesse des gouttes conduit à minimiser les efficacités de collecte pour les aérosols dont le diamètre est compris entre  $1 \mu\text{m}$  et  $3 \mu\text{m}$ . De plus, cette diminution de vitesse a pour autre conséquence la diminution du diamètre critique lié à l'impaction surestimant ainsi au delà de  $3 \mu\text{m}$ , l'efficacité de collecte.

La sensibilité de l'efficacité de collecte aux variations du diamètre des gouttes étant faible, on notera, pour les aérosols dont le diamètre est inférieur à  $1 \mu\text{m}$ , le bon accord entre le code et l'expérience. La classe de diamètre où l'efficacité de collecte est minimum est quasiment la même (égale à  $0,5 \mu\text{m}$ ) pour les résultats expérimentaux et ceux issus du code.

Enfin, ces légères divergences peuvent être dues au fait qu'expérimentalement, le spray n'est pas strictement mono dispersé alors qu'avec le code CPA, une seule classe de taille de goutte est considérée.

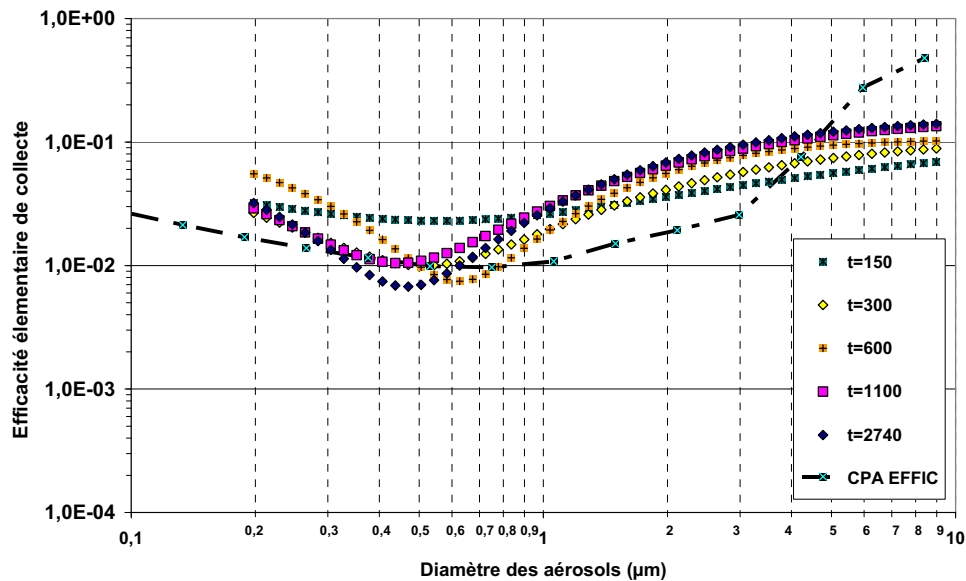


Fig. 4-52 Comparaisons des efficacités de collecte déterminées expérimentalement avec les résultats issus du code pour l'essai de référence avec aspersion

#### 4.8.2.2. Distributions granulométriques

La Fig. 4-53 présente la comparaison entre les distributions granulométriques expérimentales et celles issues du code CPA à différents temps.

Au cours des premières 500 s, la décroissance expérimentale des aérosols est bien représentée par le code. A partir de 1000 s, il existe une surestimation par le code par rapport aux données l'expérience, de la diminution de la concentration en aérosols dans les classes de diamètres inférieures à 0,7 µm. Ceci peut s'expliquer par deux phénomènes :

- une forte sensibilité du code aux « petits aérosols » lié aux conditions thermohydrauliques (température et pression) qui évoluent au cours du temps dans l'enceinte et qui influencent le mouvement brownien des aérosols,
- le fait que le spray induit des écoulements qui ne peuvent être modélisés par le code.

De plus, le biais du code CPA sur la vitesse terminale des gouttes et sur leur mise à l'équilibre thermique induit un biais sur les effets de collecte par les mécanismes phorétiques de diffusiophorèse qui sont alors attendus comme étant plus importants.

Il sera intéressant, pour les études futures, de raffiner les dispositifs de mesures sur cette gamme d'aérosols dont le diamètre est inférieur à 0,5 µm.

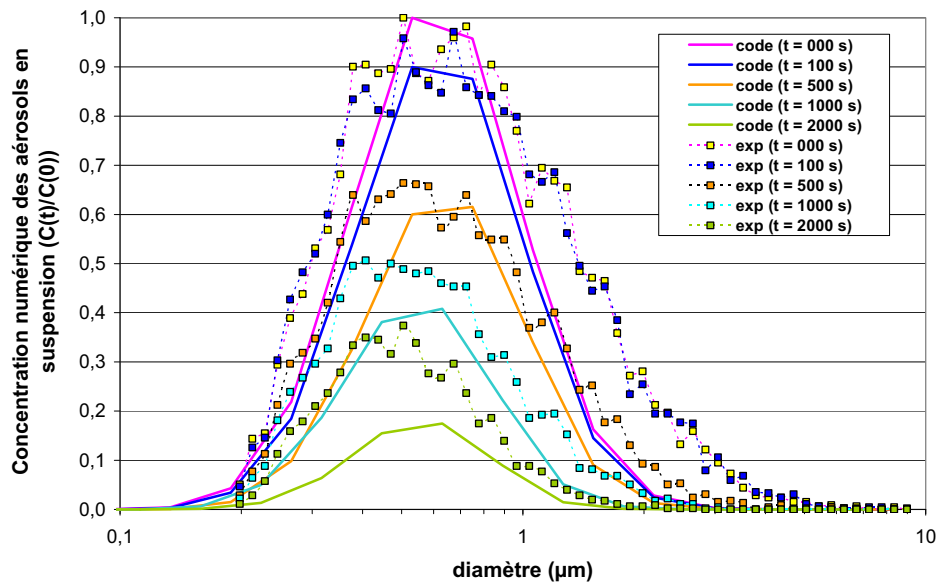


Fig. 4-53 Comparaisons des distributions granulométriques expérimentales des aérosols en suspension avec les résultats issus du code pour l'essai de référence avec aspersion

#### 4.8.2.3. Masse collectée

La dernière comparaison pour l'essai de référence concerne un point important en sûreté nucléaire : la masse d'aérosols collectée. Plus le débit massique d'aérosols collecté sera important moins le relâchement potentiel de produits de fission dans l'environnement aura des conséquences graves en cas de brèche de l'enceinte.

La Fig. 4-54 présente la comparaison entre la masse d'aérosols collectée par les gouttes mesurée expérimentalement et celle issue du code CPA à différents temps. Le dépôt massique d'aérosols sur les parois verticales de l'enceinte au cours de l'aspersion est aussi présenté.

Au cours de l'aspersion, on observe sur la Fig. 4-54 que les dépôts sur les parois verticales sont quasi nuls. Ils sont inférieurs à 2 % de la masse totale. Expérimentalement, les dépôts sur les parois ne peuvent pas être mesurés avec une grande précision sur ce type d'essai réalisé avec cette géométrie de spray.

Les deux paragraphes précédents ont montré des divergences entre les résultats expérimentaux et ceux issus du code CPA, à partir de 1000 s. On retrouve la même observation sur la Fig. 4-54, due aux mécanismes précédemment cités à savoir la non prise en compte direct du transfert de la quantité de mouvement entre le gaz et les gouttes engendrant une sous estimation de l'efficacité de collecte des aérosols de diamètre compris entre 1  $\mu\text{m}$  et 3  $\mu\text{m}$ . Ces derniers contribuant de façon importante dans le calcul de la masse des aérosols collectés et engendrant ce biais. De plus comme présenté au paragraphe §4.4, la concentration en aérosols dans l'eau collectée mesurée expérimentalement devient trop faible après 2500 s pour avoir une mesure assez fiable.

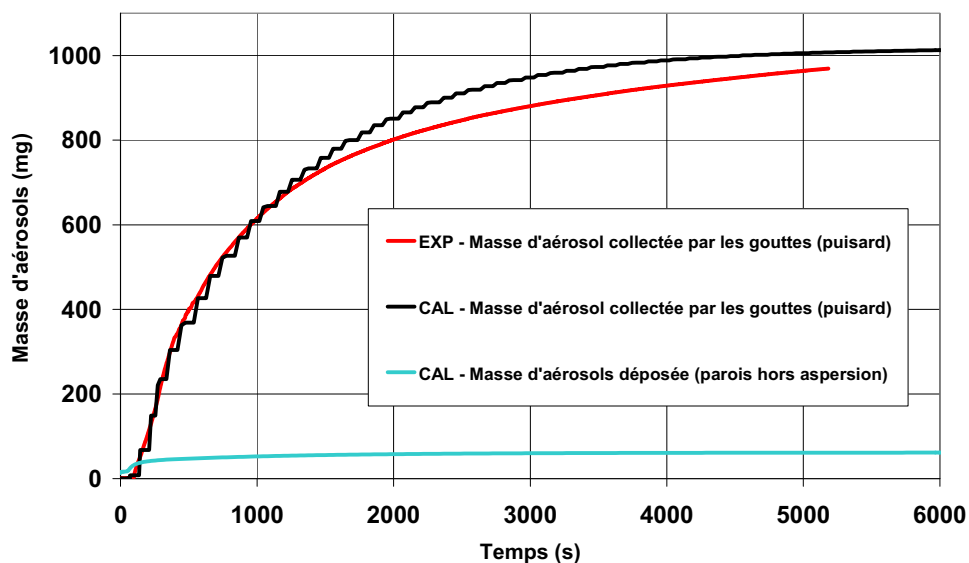


Fig. 4-54 Comparaison entre la masse expérimentale d'aérosols collectée par les gouttes et celle issue du code CPA pour l'essai de référence

#### 4.8.3. INFLUENCE DU DÉBIT D'ASPERSION

Le paragraphe 4.5.1 a présenté les comparaisons expérimentales de l'influence du débit d'aspersion. Ce paragraphe étudie l'influence du débit d'aspersion sur les comparaisons entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus avec le code CPA en terme d'efficacité de collecte des gouttes, de distribution granulométrique des aérosols en suspension dans le gaz, et enfin de masse collectée par les gouttes.

##### 4.8.3.1. Efficacité de collecte par les gouttes

L'efficacité élémentaire de collecte moyenne sur la hauteur de chute issue du code est comparée aux efficacités de collecte déterminées expérimentalement (Eq. (4.12)) sur la Fig. 4-55 et les efficacités moyennes expérimentales sur la Fig. 4-56.

Lors de l'étude de sensibilité du code CPA au débit d'aspersion avec les autres paramètres constant (cf. §2.4.2), il ressortait que l'efficacité élémentaire de collecte d'une goutte variait peu avec le débit.

On peut remarquer Fig. 4-55 que l'efficacité élémentaire de collecte évolue légèrement par rapport à la Fig. 4-52. Le diamètre où l'efficacité est minimum se décalant vers les aérosols de diamètre plus petit (autour de  $0,4 \mu\text{m}$ ) aussi bien pour les résultats expérimentaux que ceux issus du code. Cette diminution du diamètre où l'efficacité de collecte est minimale, est induite par une vitesse d'injection des gouttes plus importante. Ceci a pour conséquence directe une augmentation des efficacités de collecte par interception et par impaction (cf. Fig. 2-25) induisant une augmentation du diamètre critique pour le mécanisme d'impaction de collecte qui peut être observé sur la Fig. 4-56. On notera sur cette dernière, une bonne cohérence entre les résultats expérimentaux et ceux issus du code.

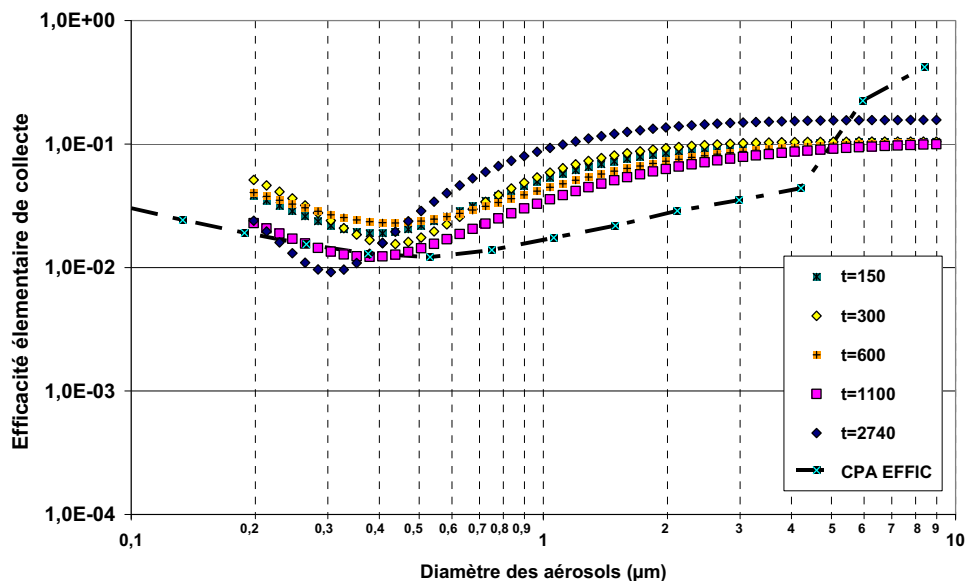


Fig. 4-55 Comparaisons des efficacités de collecte déterminées expérimentalement avec les résultats issus du code pour l'essai à un débit de 18 g/s (AG52)

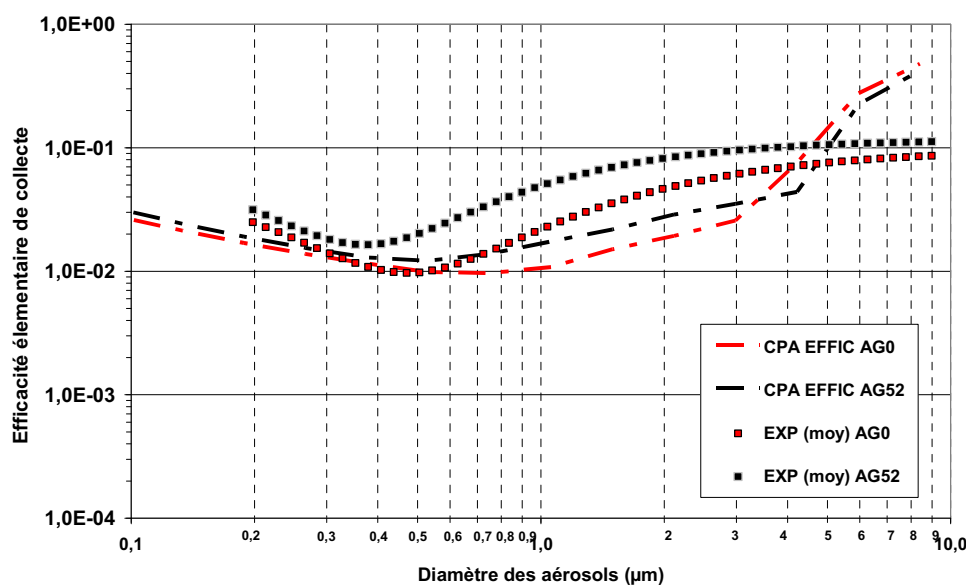


Fig. 4-56 Comparaisons des efficacités moyennes de collecte expérimentales avec les résultats issus du code pour les essais à un débit de 10 g/s (AG0) et de 18 g/s (AG52)

#### 4.8.3.2. Distributions granulométriques

La Fig. 4-57 présente la comparaison entre les distributions granulométriques expérimentales et celles issues du code CPA pour différents temps pour un débit d'aspersion de 18 g/s.

On remarquera sur la Fig. 4-57 une bonne cohérence entre les valeurs expérimentales et numériques quelque soit le temps. L'augmentation du débit de 10 g/s à 18 g/s a permis d'obtenir une meilleure cohérence entre les résultats de l'expérience et ceux du code. En effet, dans les premières 500 s, le rabattement rapide des aérosols dont le diamètre est supérieur à 1µm estompe le léger biais dans le calcul de l'efficacité de collecte induit par la sous-estimation de la vitesse des gouttes.

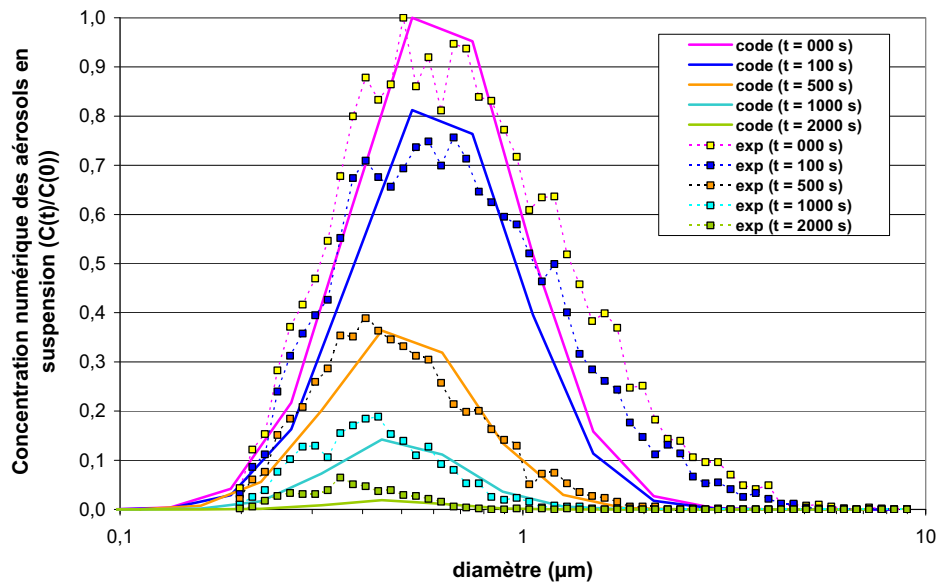


Fig. 4-57 Comparaisons des distributions granulométriques expérimentales des aérosols en suspension avec les résultats issus du code pour l'essai à un débit de 18 g/s (AG52)

#### 4.8.3.3. Masse collectée

La dernière comparaison pour l'influence du débit sur le rabattement, présentée Fig. 4-58 concerne la comparaison entre la masse d'aérosols collectée et celle calculée par le code CPA pour différents temps ainsi que le dépôt sur les parois verticales au cours de l'aspersion.

Fig. 4-58, l'évaluation par le code de la masse totale déposée sur les parois au cours de l'aspersion est de 3 %, soit le même ordre de grandeur que pour l'essai de référence (cf. §4.8.2.3). Le débit n'influence pas de façon significative les dépôts sur les parois comme nous l'avons vu lors de l'étude de sensibilité avec CPA.

Concernant la masse collectée par les gouttes, on remarquera le parfait accord entre le code et l'expérience. Le fait d'augmenter le débit d'aspersion, comme vu précédemment, permet de rabattre plus rapidement les aérosols d'un diamètre supérieur à 1 µm ce qui se traduit en terme de masse par une rapide augmentation de la masse collectée pendant les premières 500 s. Il ne reste quasiment plus alors que les aérosols en suspension dont le diamètre est compris entre 0,2 µm et 0,9 µm avec une distribution centrée sur le diamètre des aérosols où l'efficacité est minimum autour de 0,5 µm. Le poids de ces aérosols est faible dans le calcul de la masse alors collectée, induisant une bonne corrélation entre le code et l'expérience pour l'essai AG52.



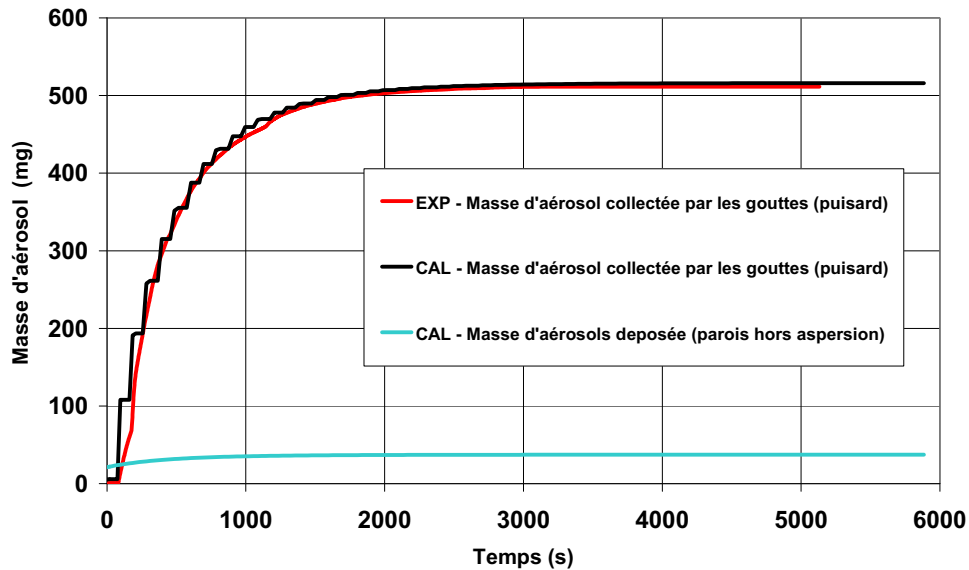


Fig. 4-58 Comparaison entre la masse expérimentale d'aérosols collectée par les gouttes et celle issue du code CPA pour l'essai AG52 à 18 g/s

#### 4.8.4. INFLUENCE DE LA TEMPERATURE D'INJECTION DES GOUTTES

Ce paragraphe décrit l'influence de la température d'injection des gouttes sur les comparaisons entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus avec le code CPA en terme d'efficacité de collecte des gouttes, de distribution granulométrique des aérosols en suspension dans le gaz, et enfin de masse collectée par les gouttes. Comme vu précédemment (cf. §4.6), injecter les gouttes à la même température que le gaz permet de limiter les effets phorétiques au cours de l'essai (AG11).

##### 4.8.4.1. Efficacité de collecte par les gouttes

L'efficacité élémentaire de collecte moyenne sur la hauteur de chute est comparée aux efficacités de collecte déterminées expérimentalement (Eq. (4.12)) sur la Fig. 4-59 et les efficacités moyennes expérimentales sur la Fig. 4-60.

Les résultats issus du code et ceux expérimentaux Fig. 4-59 sont en bon accord. Les gouttes atteignent plus rapidement l'équilibre thermique et leur vitesse terminale à ce débit.

Le biais observable Fig. 4-60 pour les aérosols dont le diamètre est supérieur à  $0,7 \mu\text{m}$  est lié à l'écart entre le temps de relaxation des gouttes dans le cas réel et celui calculé par le code qui est sous-estimé.

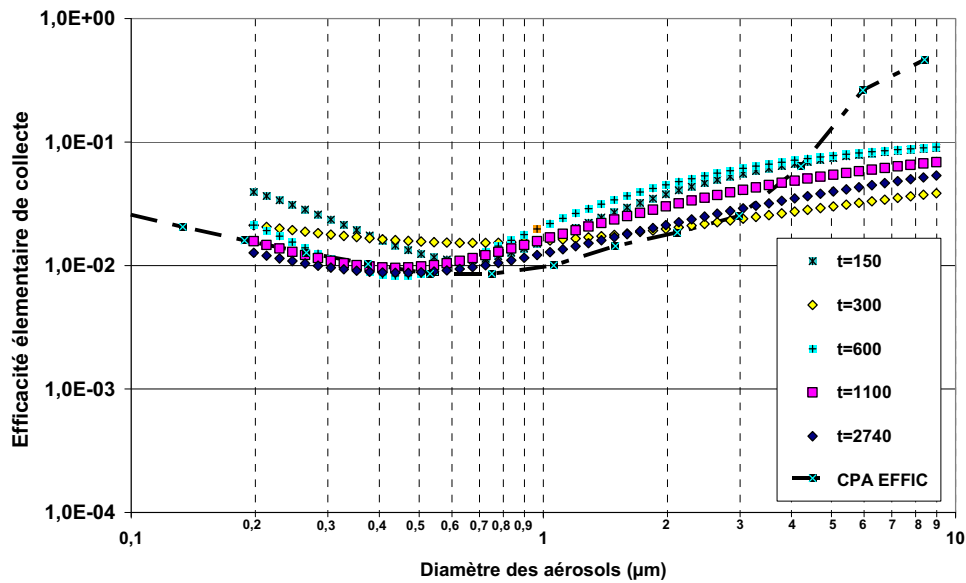


Fig. 4-59 Comparaisons des efficacités expérimentale de collecte avec les résultats issus du code pour l'essai à un débit de 10 g/s avec des gouttes injectées « chaudes » (AG11)

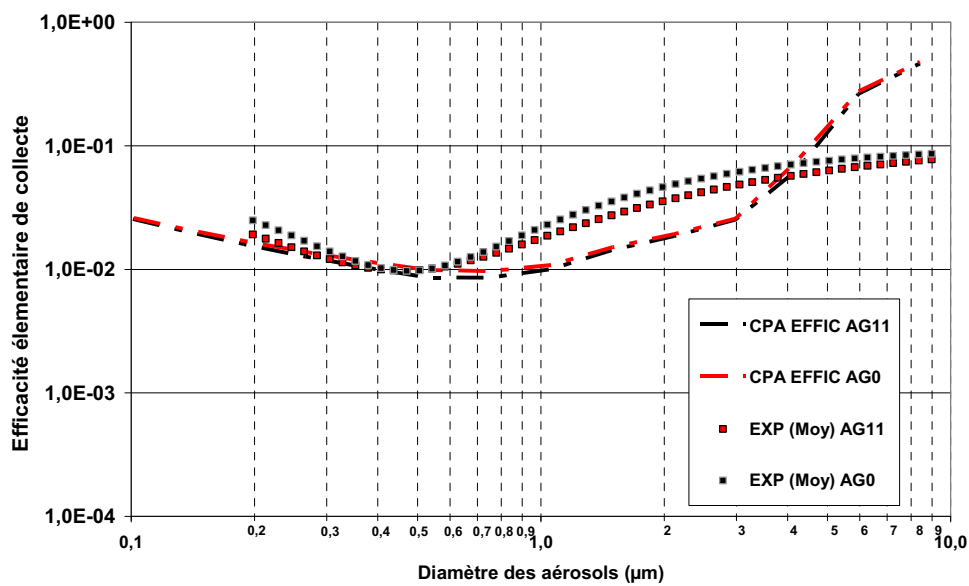


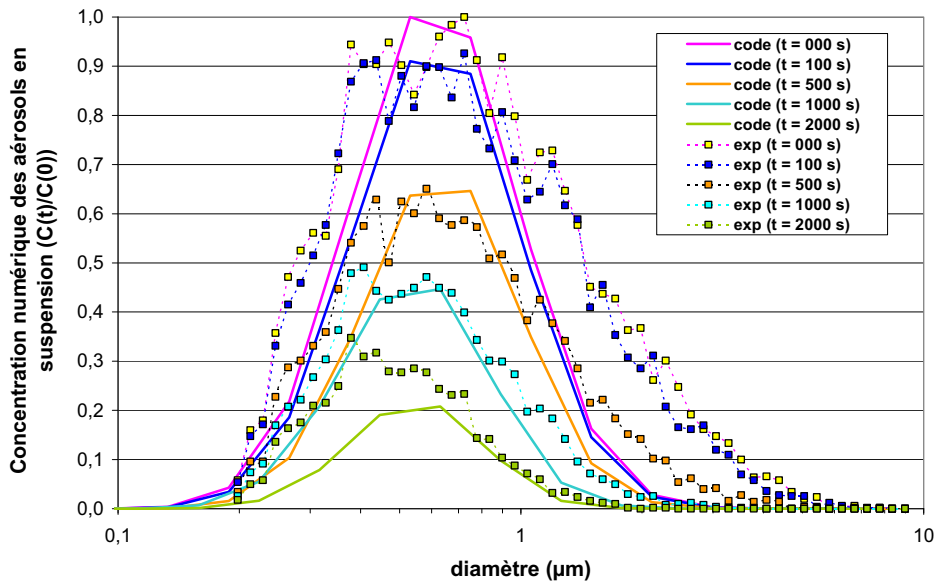
Fig. 4-60 Comparaisons des efficacités moyennes de collecte expérimentales avec les résultats issus du code pour les essais à un débit de 10 g/s avec des gouttes injectées « froides »(AG0) et « chaudes » (AG11)

#### 4.8.4.2. Distributions granulométriques des aérosols

La Fig. 4-61 présente la comparaison entre les distributions granulométriques expérimentales et celles issues du code CPA pour différents temps pour l'essai à un débit de 10 g/s avec des gouttes injectées « chaudes » (AG11).

Les distributions granulométriques, Fig. 4-61, issues du code sont en bon accord avec celles obtenues expérimentaux jusqu'au temps  $t = 1000$  s. Ensuite, il existe une légère surestimation de la diminution des aérosols dans les classes de diamètres inférieures à  $0,5 \mu\text{m}$  par le code par rapport aux

données de l'expérience. Ceci, non réellement mis en évidence au paragraphe précédent, peut s'expliquer par les écoulements de convection forcée induit par le spray qui affecte préférentiellement ces aérosols de faible inertie.



**Fig. 4-61 Comparaisons des distributions granulométriques expérimentales des aérosols en suspension avec les résultats issus du code pour l'essai à un débit de 10 g/s avec des gouttes injectées « chaudes » (AG11)**

#### 4.8.4.3. Masse collectée

La dernière comparaison pour l'influence de la température d'injection des gouttes sur le rabattement, présentée Fig. 4-62 concerne la comparaison entre la masse expérimentale d'aérosols collectée par les gouttes et celle issue du code CPA pour différents temps ainsi que le dépôt sur les parois verticales au cours de l'aspersion.

Fig. 4-62, l'évaluation par le code de la masse totale déposée sur les parois au cours de l'aspersion est de 3 % de la masse injectée, soit le même ordre de grandeur que pour l'essai de référence (cf. §4.8.2.3).

Au paragraphe précédent, nous avons noté qu'avant 1000 s il y avait une sous estimation du code sur le rabattement des aérosols de diamètre inférieur à 0,5  $\mu\text{m}$ . Sur la Fig. 4-62 nous notons la même tendance sur la masse collectée par les gouttes induite par le rabattement moins rapide par le code de ces aérosols de diamètre inférieur à 0,5  $\mu\text{m}$  dont le poids dans le calcul de la masse est moindre.

Rappelons que l'incertitude des mesures issues du turbidimètre devient significative au-delà de  $t = 2500$  s.

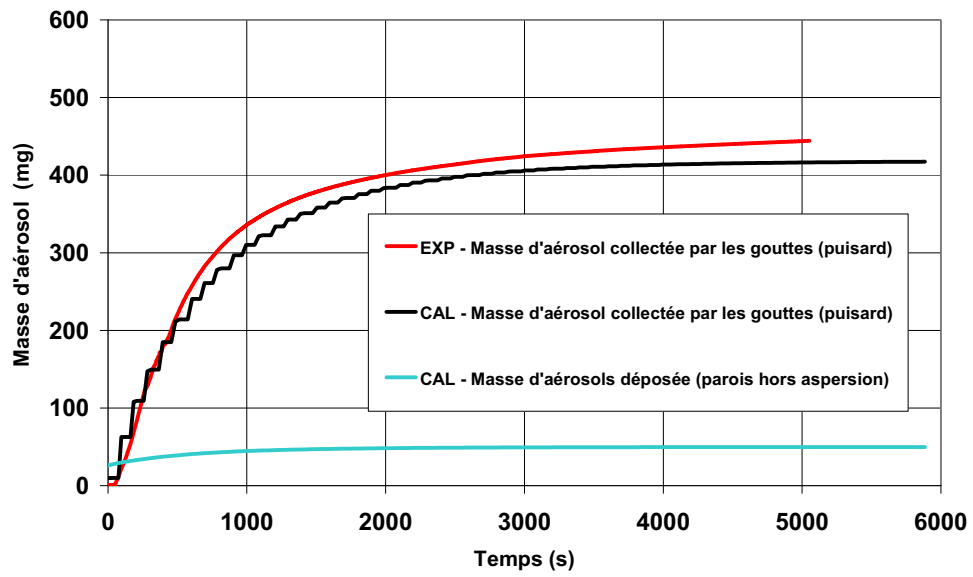


Fig. 4-62 Comparaison entre la masse expérimentale d'aérosols collectée par les gouttes et celle issue du code CPA pour l'essai à un débit de 10 g/s avec des gouttes injectées « chaudes » (AG11)

## C ONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'objectif de ce travail était de contribuer à une meilleure connaissance des phénomènes physiques concernant le rabattement des aérosols par un spray d'eau pour des conditions représentatives de celles d'un accident dans un réacteur nucléaire.

Pour atteindre cet objectif, notre démarche a consisté premièrement (Chapitre 1) à décrire les réacteurs de type REP en se focalisant sur l'enceinte de confinement et les moyens de sauvegarde qui y sont implantés pour prévenir du relâchement des produits de fission dans l'environnement. Ensuite, a été effectuée une synthèse des connaissances sur les expériences étudiant le comportement des aérosols représentatifs de produits de fission dans une enceinte de confinement et une revue des modèles présents dans la littérature utilisés pour modéliser la collecte des aérosols par des gouttes d'eau. Dans cette partie, la revue des codes internationaux traitant de ce domaine a aussi été présentée, en s'intéressant plus particulièrement au module CPA du code ASTEC ainsi qu'aux modèles y étant implantés. Enfin, ce Chapitre 1 a montré que les mécanismes de base liés à la physique de collecte des aérosols sont décrits par des modèles éprouvés, bâtis à partir de données expérimentales ou issues de simulation provenant souvent d'études réalisées en dehors du domaine nucléaire, tel que la météorologie, le rabattement de polluant atmosphérique...

Par conséquent, relativement peu de modèles implémentés dans les codes de calcul sont totalement validés, étant donné le peu de données expérimentales disponibles obtenues dans des conditions thermohydrauliques bien maîtrisées.

Deuxièmement, le Chapitre 2 est dédié à une étude de sensibilité à divers paramètres avec le module CPA du code ASTEC pour les essais envisagés. En effet, l'étude bibliographique avait mis en avant, dans les conditions thermohydrauliques représentatives d'un accident grave, deux familles de mécanisme de rabattement des aérosols résultant d'effets mécaniques ou phorétiques. De ces mécanismes, les principaux paramètres tels que les caractéristiques liées à la thermohydraulique, à l'aspersion ou encore aux aérosols ont été étudiés. Cette étude de sensibilité a permis de mieux appréhender les phénomènes physiques impliqués dans le rabattement des aérosols et de définir la grille d'essais en prenant en compte les contraintes technique liées à l'expérience TOSQAN.

L'installation TOSQAN dédiée à l'étude de la thermohydraulique des accidents graves, a donc été utilisée avec une instrumentation spécifique mise en œuvre (Chapitre 3). Une attention particulière a été portée sur le choix de l'instrumentation (phase gazeuse et phase liquide) ainsi que sur le développement d'un dispositif de prélèvements des aérosols dans l'enceinte afin d'assurer la représentativité de nos prélèvements. La validation de l'instrumentation et du dispositif a été menée à l'aide de deux appareils de référence dans le domaine des aérosols : un Aerodynamic Particle Sizer (APS, mod. 3321 TSI©) et un Particle Size Distribution Analyzer (Aerosizer, mod. PSDA 3603, TSI©). Une réflexion a été menée suite à ces comparaisons afin de déterminer les facteurs correctifs à appliquer aux résultats obtenus à l'aide du granulomètre optique WELAS.

Avec cet ensemble de dispositifs de mesures innovantes implantés sur l'expérience TOSQAN, nous avons pu caractériser localement et avec une bonne résolution temporelle, la concentration et la distribution en taille des aérosols pendant l'aspersion dans des mélanges composés d'air et de vapeur dont les caractéristiques évoluent au cours du temps. Ces mesures ont permis de déterminer les efficacités élémentaires de collecte.

Le dernier chapitre (Chapitre 4) a constitué la phase applicative de cette étude. Il s'appuie sur les données expérimentales obtenues au cours des essais réalisés dans l'enceinte TOSQAN à partir de la grille définie précédemment. Il présente le traitement des données et l'analyse des résultats expérimentaux.

Premièrement, le protocole d'essai a été défini ainsi que les conditions initiales permettant d'obtenir une bonne reproductibilité des essais aussi bien au niveau des conditions thermohydrauliques du mélange gazeux et des caractéristiques du spray qu'au niveau des grandeurs liées aux aérosols.

Deuxièmement, l'analyse des résultats a permis de montrer que la dynamique de collecte des aérosols comportait deux phases caractérisées par deux taux de rabattement distincts : une phase d'épuration très rapide de la zone de spray puis une phase où la dynamique de collecte des aérosols est limitée par le transfert des aérosols de la zone située hors du spray vers la zone de spray. Cette phase n'est donc plus à proprement parlé une phase de rabattement pur où l'intensité du rabattement serait directement pilotée par les effets de collecte mécaniques et phorétiques. Les valeurs trouvées pour nos conditions thermohydrauliques et pour des particules de SiC, sont en bon accord avec celles de la littérature (valeur de l'ordre de  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ).

Ensuite, les efficacités élémentaires moyennes de collecte par classe d'aérosol ont pu être estimées en fonction du débit d'aspersion et de la température d'injection des gouttes. Dans notre configuration, l'influence de ces paramètres est la plus visible pour les petits débits d'aspersion ; ceci est lié au fait que dans ce cas, la faible densité de gouttes induit un refroidissement global du gaz plus lent tant au niveau global que local ce qui induit une augmentation de l'intensité des effets phorétique et du temps pendant lequel ceux-ci sont significatifs.

Pour terminer, les comparaisons, pour différentes conditions d'essais, entre les résultats expérimentaux et ceux issus des simulations réalisées à l'aide du module CPA du code ASTEC ont été réalisées. Elles ont mis en évidence quelques divergences sur le rabattement de certaines classes de taille d'aérosol liées principalement à la sous estimation de la vitesse des gouttes au cours de leur chute induisant une diminution des effets mécaniques. En revanche ces biais n'affectent quasiment pas l'évolution de la masse globale collectée au début de l'essai. La comparaison entre l'approche numérique et les résultats expérimentaux a montré un bon accord au début de l'essai. Cependant, un petit désaccord existe avec l'évaluation du code ASTEC sur la masse collectée par le spray après un certain temps lié aux limites expérimentales de mesure et aux limites du code. En première approximation, le code ASTEC peut donc être utilisé pour évaluer le rabattement des aérosols insolubles par un spray dans des conditions représentatives d'accident grave de REP.

## **PERSPECTIVES**

Les perspectives de ce travail sont nombreuses, tant au niveau des voies d'amélioration possible des modèles implémentés dans le module CPA du code ASTEC qu'au niveau des programmes expérimentaux qu'il serait souhaitable de conduire, notamment dans TOSQAN.

Les modèles implémentés dans le module CPA du code ASTEC pourraient bien sûr être améliorés comme tout code de calcul mais souvent au détriment du temps de calcul. Les faiblesses

observées concernent singulièrement les effets d'interception et d'impaction principalement liés à la non prise en compte des transferts de la quantité de mouvement entre le gaz et les aérosols ou les gouttes.

Concernant l'aspect expérimental, tout d'abord, les dispositifs expérimentaux installés sur l'enceinte TOSQAN, optimisés pour être mobile, ouvrent la possibilité de prolonger ces travaux en cartographiant de manière plus détaillée l'ensemble de l'enceinte en termes de localisation des points de prélèvement des aérosols en suspension dans le gaz en reproduisant les essais. De plus, d'autres conditions thermohydrauliques peuvent être envisagées ainsi que d'autres types d'aérosols (plus petits ou avec une autre densité matérielle) afin de lever les incertitudes sur l'influence des caractéristiques des aérosols les plus fins. Les classes de diamètre d'aérosols d'intérêt sont autour de 0,3  $\mu\text{m}$ . Ceux sont les particules les plus difficiles à collecter. Ce dernier point est important à étudier pour la sûreté de l'environnement, en cas de fuite de produits radioactifs hors de l'enceinte de confinement. D'autres paramètres importants de la collecte des aérosols par des gouttes à étudier sont les caractéristiques du spray (un diamètre de gouttes et/ou un angle de spray plus importants).

Il serait intéressant de modifier le système de turbidimétrie afin de pouvoir obtenir les distributions de classes de taille des particules collectées afin de faire des comparaisons avec les distributions des aérosols en suspension dans le gaz pour obtenir une information complémentaire. Il serait aussi intéressant d'utiliser des aérosols solubles en développant une instrumentation dédiée, afin d'étudier plus précisément la collecte de ce type d'aérosols et la saturation des gouttes au cours de leur chute et d'arriver à estimer un taux de remise en suspension des aérosols en fonction de certaines conditions thermohydrauliques bien déterminées.

Ensuite, une autre perspective très intéressante serait d'améliorer la finesse du calcul de l'efficacité élémentaire de collecte obtenue à partir des données expérimentales, non plus décrivant le spray en terme d'association de simples gouttes monodispersées, mais de façon plus réaliste en termes de distribution en taille de gouttes nécessitant alors un calcul complexe qui dépassait le cadre fixé par la thèse.

En terme de sûreté du bâtiment réacteur, il serait intéressant d'utiliser un système d'aspersion qui permet de générer des sprays de différentes granulométries dans l'espace de l'enceinte de confinement afin de rabattre toutes les classes d'aérosol.

Enfin, au niveau des programmes expérimentaux, il serait souhaitable de conduire, notamment dans TOSQAN, afin de lever les incertitudes sur l'influence des caractéristiques des aérosols les plus fins mais aussi sur d'autres natures d'aérosols comme des suies, par exemple, pouvant être issues d'incendies engendrant un accident grave mais aussi le rabattement des aérosols en voie humide dans l'environnement en cas de rejets radioactifs ou autres.





# R

## EFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ABBAS, A. F. (1984) "Modélisation du comportement des aérosols solubles dans l'atmosphère d'un réacteur nucléaire PWR en cas d'accident hypothétique," Thèse de doctorat, Créteil - Paris XII, Saclay.
- [2] Abramzon, B. et Sirignano, W. A. Approximate theory of a single droplet vaporization in a convective field : Effect of variable properties, Stefan flow and transient liquid heating. *Proc. 2nd ASME-JSME Thermal Engng, Joint Conf.*, Honolulu, HI, vol 1, 11-18.
- [3] Adams, R. E., Longest, A. W. et Tobias, M. L. Influence of steam-air environments on the behavior of aerosols in containment. *2nd International Aerosol Conference*, Berlin, 1078-1081.
- [4] Allelein, H. J., Neu, K. et Van Dorsselaere, J. P. (2005) European Validation of the Integral Code ASTEC (EVITA): First experience in validation and plant sequence calculations. *Nuclear Engineering and Design*, **235**(2-4), 285-308.
- [5] Allelein, H. J., Neu, K., Van Dorsselaere, J. P., Muller, K., Kostka, P., Barnak, M., Matejovic, P., Bujan, A. et Slaby, J. (2003) European validation of the integral code ASTEC (EVITA). *Nuclear Engineering and Design*, **221**(1-3), 95-118.
- [6] ASN. (2004) Echelle de classement des incidents de radioprotection. DGSNR.
- [7] ASN. (2005) Les réacteurs à eau sous pression. DGSNR.
- [8] Bachalo, W. D. et Houser, M. J. (1984) Phase/Doppler spray analyzer for simultaneous measurements of drop size and velocity distribution. *Optical Engineering*, **23**(5), 583-590.
- [9] Bakanov, S. P. et Derjaguin, B. V. (1960) Discuss. Faraday Soc., **30**, 130-138.
- [10] Balachandran, W., Jaworek, A., Krupa, A., Kulon, J. et Lackowski, M. (2003) Efficiency of smoke removal by charged water droplets. *Journal of Electrostatics*, **58**(3-4), 209-220.
- [11] Baron, P. A. et Willeke, K. (2001) *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*, Wiley-Interscience.
- [12] Beard, K. V. (1974) Experimental and numerical collision efficiencies for submicron particles scavenged by small raindrops. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **31**(6), 1595-1603.

- [13] Bestebe, J. et Klein-Heßling, W. (2000) ASTEC V0, CPA Module - Containment thermalhydraulics and aerosol and fission product behaviour - User Guidelines, rev 0. *GRS Report ASTEC-VO/DOC/00-14,2000*.
- [14] Bieder, U., Rosa, F., Fynbo, P., Jokiniemi, J., Paller, A. et Schatz, A. (1993) Coupling of aerosol behaviour and thermal-hydraulics. *IKE-2-108*.
- [15] Bourdon, S., Jacquemain, D. et Zeyen, R. (2002) Résultats des deux premiers essais Phébus PF, FTP-0 et FTP-1. IRSN.
- [16] Brock, J. R. (1962) On the theory of thermal forces acting on aerosol particles. *Journal of Colloid and Interface Science*, **17**, 768-780.
- [17] Brockmann, J. E. (1998) Removal of sarin aerosol and vapor by water sprays. *SAND98-1890*, Sandia National Laboratories, Albuquerque.
- [18] Brun, P., Lemaitre, P., Menet, B. et Nuboer, A. (2005) Description et qualification du système d'aspersion TOSQAN. *DSU/SERAC/LECEV/05-04*, IRSN, Saclay.
- [19] Chate, D. M. et Kamra, A. K. (1997) Collection efficiencies of large water drops collecting aerosol particles of various densities. *Atmospheric Environment*, **31**(11), 1631.
- [20] Cheng, Y. S., Barr, E. B., Marshall, I. A. et Mitchell, J. P. (1993) Calibration and performance of an API aerosizer. *Journal of Aerosol Science*, **24**(4), 501-514.
- [21] Cheng, Y. S. et Dahneke, B. E. (1979) Properties of continuum source particle beams: II. Beams generated in capillary expansions. *Journal of Aerosol Science*, **10**(4), 363-368.
- [22] Clement, B., Haste, T., Krausmann, E., Dickinson, S., Gyenes, G., Duspiva, J., de Rosa, F., Paci, S., Martin-Fuertes, F., Scholytssek, W., Allelein, H. J., Guntay, S., Arien, B., Marguet, S., Leskovar, M. et Sartmadjiev, A. (2005) Thematic network for a Phebus FPT1 international standard problem (THENPHEBISP). *Nuclear Engineering and Design*, **235**(2-4), 347-357.
- [23] Cordfunke, E. H. P. et Konings, R. J. M. (1993) The release of fission products from degraded UO<sub>2</sub> fuel: Thermochemical aspects. *Journal of Nuclear Materials*, **201**, 57-69.
- [24] Costaz, J.-L. (2002) "Confinement - Enceintes." *Techniques de l'ingénieur N° B 3 290*.
- [25] Crowe, C. T. (2006) *Multiphase Flow Handbook*, CRC Press.
- [26] Dahneke, B. E. et Cheng, Y. S. (1979) Properties of Continuum Source Particle Beams. I. Calculation Methods and Results. *Journal of Aerosol Science*, **10**, 257-274.
- [27] Dahneke, B. E. et Flachsbar, H. (1972) An aerosol beam spectrometer. *Aerosol Science & Technology*, **3**, 345-349.
- [28] Devouton, L. (1995) Simulation numérique de la capture des aérosols par un dispositif d'aspersion. IPSN.
- [29] Dubourg, R., Faure-Geors, H., Nicaise, G. et Barrachin, M. (2005) Fission product release in the first two PHEBUS tests FPT0 and FPT1. *Nuclear Engineering and Design*, **235**(20), 2183-2208.

- [30] Duco, J. (1984) Phénoménologie du dégagement des produits de fission hors du combustible en conditions accidentelles. *SFRP - Meeting on mitigation and confinement of radioactive products in water cooled reactors*, Saclay.
- [31] Ducret, D., Roblot, D. et Vendel, J. (1996) Etude de l'efficacité de collection des produits de fission par l'aspersion : montage expérimental et modélisation. *24th DOE / NRC Nuclear Air Cleaning And Treatment Conference*, Portland Oregon.
- [32] Ducret, D., Roblot, D. et Vendel, J. (1998a) Etude analytique du comportement des gouttes et du rabattement des produits de fission par l'aspersion : résultats expérimentaux et modèles. *OECD Specialist Meeting On Nuclear Aerosols In Reactor Safety*, Cologne.
- [33] Ducret, D., Roblot, D., Vendel, J., Plumecocq, W. et Layly, V. D. (1998b) Enseignements tirés des essais sur l'efficacité des systèmes d'aspersion et application à l'analyse de la fonction confinement dans les REP. *GRS/IPSN Séminaire Fachgesprach 1998*, Berlin.
- [34] Ducret, D. et Vendel, J. (1998) Description détaillée d'ACACIA : algorithme appliqué à CARAIDAS pour la capture de l'iode et des aérosols. *SERAC/LPMC/98-17*, IPSN, Saclay.
- [35] Ducret, D., Vendel, J. et Vigla, D. (1993) Etude préliminaire de l'aspersion. *IPSN/SERAC/LECEV - 93-22*, IPSN, Saclay.
- [36] Ducros, G., Malgouyres, P. P., Kissane, M., Boulaud, D. et Durin, M. (2001) Fission product release under severe accidental conditions: general presentation of the program and synthesis of VERCORS 1-6 results. *Nuclear Engineering and Design*, **208**(2), 191-203.
- [37] Durand-Smet, R. (1996) "Réacteurs à eau sous pression - Description." *Technique de l'ingénieur N°3100*.
- [38] Ebert, P., Kibler, M., Mainka, A., Tenberken, B., Baechmann, K., Frank, G. et Tschiersch, J. (1998) A field study of particle scavenging by raindrops of different sizes using monodisperse trace aerosol. *Journal of Aerosol Science*, **29**(1-2), 173-186.
- [39] EDF. (2005) Dossier de système élémentaire - 4ème stade - Palier 900 MW - Aspersion - recirculation de l'aspersion. EDF, France.
- [40] Femandjian, J. (1982) "Etude de la modélisation du comportement des aérosols sodés dans une enceinte," Thèse de Doctorat, PARIS XII, Paris.
- [41] Femandjian, J. (1984) Comportement des aérosols dans l'enceinte de Confinement. *SFRP - Meeting on mitigation and confinement of radioactive products in water cooled reactors*, Saclay.
- [42] Femandjian, J., Cenerino, G., Dumas, J. et L'Heriteau, J. (1987) Evaluation des rejets de produits de fission hors de l'enceinte de confinement lors d'un accident grave sur un REP-900 MWe (Séquence accidentelle AF). *SASC 87/55*.
- [43] Firnhaber, M. (1996) International Standard Problem ISP37. VANAM M3 - A Multi-Compartment Aerosol Depletion Test with Hygroscopic Aerosol Material. *Report NEA/CSNI/R(96)*, 26.
- [44] Fischer, K. et Kanzleiter, T. (1999) Experiments and computational models for aerosol behaviour in the containment. *Nuclear Engineering and Design*, **191**(1), 53.

- [45] Friehmelt, R. et Heidenreich, S. (1999) Calibration of a white-light /90° optical particle counter for “aerodynamic” size measurements-experiments and calculations for spherical particles and quartz dust. *Journal of Aerosol Science*, **30**(10), 1271-1279.
- [46] Fromentin, A., Haschke, D., Taubenberger, R., Schikarski, W., Schoeck, W., Bunz, H., Kanzleiter, T., Schroeder, T., Peehs, M. et Ruhmann, H. (1988) DEMONA: Etude du comportement d'aérosols dans un confinement. *Journal of Aerosol Science*, **19**(1), 65-72.
- [47] Fuchs, N. A. (1964) *The Mechanics of Aerosols*, Pergamon Press, Oxford.
- [48] Gauchet, N., Del Fabbro, L., Ducret, D., Vendel, J. et Renoux, A. (1997) Simulation numérique de la collecte des aérosols par un obstacle sphérique. *13ème Congrès Français sur les Aérosols - ASFERA*, Paris.
- [49] Gauchet, N. (1999) "Influence de la densité spatiale des gouttes d'aspersion sur l'efficacité de collecte des produits de fission," Thèse de doctorat, Université PARIS XII - Val de Marne, Paris.
- [50] Gaunt, L. F., Hughes, J. F. et Harrison, N. M. (2003) Removal of domestic airborne dust particles by naturally charged liquid sprays. *Journal of Electrostatics*, **58**(3-4), 159-169.
- [51] Girault, N., Dickinson, S., Funke, F., Auvinen, A., Herranz, L. et Krausmann, E. (2006) Iodine behaviour under LWR accident conditions: Lessons learnt from analyses of the first two Phebus FP tests. *Nuclear Engineering and Design*, **236**(12), 1293-1308.
- [52] Grist, D. R. (1982) Spray removal of fission products in PWR containments. *SRD-R-267*, United Kingdom Atomic Energy Authority.
- [53] Gustafsson, G. (1999) Factors affecting the Release and Concentration of Dust in Pig Houses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **74**(4), 379-390.
- [54] Hatch, T. et Choate, S. P. (1929) Statistical description of the size properties of non uniform particulate substances. *Journal of the Franklin Institute*, **207**(3), 369-387.
- [55] Heyder, J. et Gebhart, J. (1977) Penetration efficiency of an inclined tube under laminar and turbulent flow conditions, gravitational settling.
- [56] Hilliard, R. K., Coleman, L. F., Linderoth, C. E., McCormack, J. D. et Postma, A. K. (1970) Removal of iodine and particles from containment atmospheres by sprays : containment systems experiment interim report. *BNWL-1244*, Pacific Northwest Laboratory.
- [57] Hilliard, R. K. et Postma, A. K. (1971) Effect of spray flow rate on washout of gases and particles in the containment systems experiment. *BNWL-1591*, Battelle Pacific Northwest Laboratory.
- [58] Hilliard, R. K. et Postma, A. K. (1981) Large-scale fission product containment tests. *Nuclear Technology*, **53**(2), 163-175.
- [59] Hilliard, R. K., Postma, A. K., McCormack, J. D. et Coleman, L. F. (1971) Removal of iodine and particles by sprays in the containment systems experiment. *Nuclear Technology*, **10**, 499.
- [60] Hinds, W. C. (1999) *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, Wiley New York.

- [61] Hofmann, A. et Dominik, J. (1995) Turbidity and mass concentration of suspended matter in lake water: a comparison of two calibration methods. *Aquatic Sciences-Research Across Boundaries*, **57**(1), 54-69.
- [62] IRSN, CEA et EDF. (2006) R&D relative aux accidents graves dans les réacteurs à eau pressurisée : Bilan et perspectives. *Rapport IRSN-2006/73 Rev 1 - Rapport CEA-2006/474 Rev 1*.
- [63] Jones, A. V., Dickinson, S., de Pascale, C., Hanniet, N., Herranz, L., De Rosa, F., Henneges, G., Langhans, J., Housiadas, C. et Wichers, V. (2003) Validation of severe accident codes against Phebus FP for plant applications: status of the PHEBEN2 project. *Nuclear Engineering and Design*, **221**(1-3), 225-240.
- [64] Kljenak, I. (2001) Simulation of international standard problem no.44 "KAEVER" experiments on aerosol behavior with the contain code. *International Conference Nuclear Energy in Central Europe 2001*, Hoteli Bernardin, Portorož, Slovenia.
- [65] Kmetyk, L. N. (1994) MELCOR 1.8.3 assessment: CSE containment spray experiments. *SAND--94-2316 ; DE95006405*, Sandia National Labs., Albuquerque, NM.
- [66] Kousaka, Y. et Endo, Y. (1993) Experiment on diffusio-phoresis of aerosol particles at low knudsen numbers. *Journal of Aerosol Science*, **24**(5), 611-617.
- [67] Langmuir, I. (1948) The production of rain by a chain reaction in cumulus clouds at temperatures above freezing. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **5**(5), 175-192.
- [68] Layly, V. D. (2004) Développement du code ASTEC : Interprétation des essais CARAIDAS de rabattement des aérosols par l'aspersion. *DPAM/SEMIC 2004/05*, IRSN.
- [69] Layly, V. D. et Plumecocq, W. (2004) Emergency spray modelling in the ASTEC code Description and Qualification. *DPAM/SEMIC 2004/15*, IRSN.
- [70] Lecomte, C. (1994) Evaluation et limitation des transferts de radioactivité lors d'un accident grave hypothétique de REP. *NT SEAC/93/142*, IPSN/DPEI/SEAC, Fontenay aux Roses.
- [71] Lee, K. W. et Gieseke, J. A. (1980) Note on the approximation of interceptional collection efficiencies. *Journal of Aerosol Science*, **11**(4), 335-341.
- [72] Lemaitre, P. (2004) "Développement et application de la réfractométrie arc-en-ciel global pour l'étude des transferts massique et thermique dans un spray," Thèse de doctorat, INSA, Rouen.
- [73] Lemaitre, P., Nuboer, A. et Porcheron, E. (2007a) Analyse de l'essai d'aspersion n° 101. *DSU/SERAC/LECEV/07-02*.
- [74] Lemaitre, P., Nuboer, A., Porcheron, E. et Rochas, V. (2007b) Description et qualification de l'instrumentation et des circuits du programme aérosol TOSQAN. *DSU/SERAC/LECEV/07-42*.
- [75] Lemaitre, P., Porcheron, E., Marchand, D., Nuboer, A., Bouilloux, L. et Vendel, J. (2005) Comparaison de diagnostics optiques granulométriques : Imagerie en défaut de mise au point – anémométrie phase Doppler. *Congrès Français sur les Aérosols (CFA 2005)*, Paris.
- [76] Lemaitre, P., Porcheron, E., Nuboer, A. et Grehan, G. (2006) Interferometric laser imaging development for droplets Sizing (ILIDS) in hostile environment. *ICLASS 2006*, Kyoto, Japan.

- [77] Lewis, B. J., André, B., Ducros, G. et Maro, D. (1996) A model for nonvolatile fission product release during reactor accident conditions. *Nuclear Technology*, **116**(1), 34-53.
- [78] Liu, B. Y. H., Szymanski, W. W. et Ahn, K. H. (1985) On Aerosol Size Distribution Measurement by Laser and White Light Optical Particle Counters. *The Journal of Environmental Sciences*, **28**(3), 19-24.
- [79] Liu, Y. et Daum, P. H. (2000) The effect of refractive index on size distributions and light scattering coefficients derived from optical particle counters. *Journal of Aerosol Science*, **31**(8), 945-957.
- [80] Maeda, M., Akasaka, Y. et Kawaguchi, T. (2002) Improvements of the interferometric technique for simultaneous measurement of droplet size and velocity vector field and its application to a transient spray. *Experiment in Fluids*, **33**(1), 125-134.
- [81] Mäkynen, J. M., Jokiniemi, J. K., Ahonen, P. P., Kauppinen, E. I. et Zilliacus, R. (1997) AHMED experiments on hygroscopic and inert aerosol behaviour in LWR containment conditions: Experimental results. *Nuclear Engineering and Design*, **178**(1), 45-59.
- [82] Marchand, D. (2006) Etude de la captation des aérosols par des gouttes d'eau de l'aspersion : Bibliographie et Grille d'essais. *IRSN/DSU/SERAC/LECEV/06-12*, IRSN.
- [83] Marchand, D., Porcheron, E., Lemaitre, P. et Grehan, G. (2006a) Characterization of the washout of aerosols by spraying water for thermal hydraulic conditions representative of a severe accident in nuclear reactor containment. *ICLASS 2006*, Kyoto, Japan.
- [84] Marchand, D., Porcheron, E., Lemaitre, P., Nuboer, A., Plumecocq, W. et Grehan, G. Aerosols washout by a water spray in hostile environment: experimental and numerical approaches. *European Aerosol Conference 2007*, Salzburg.
- [85] Marchand, D., Porcheron, E., Lemaitre, P., Nuboer, A., Plumecocq, W. et Grehan, G. (2007b) Experimental and numerical study of the aerosol washout by a water spray in hostile environment. *ICMF 2007*, Leipzig, Germany.
- [86] Marchand, D., Porcheron, E., Lemaitre, P., Nuboer, A., Vendel, J., Bouilloux, L. et Grehan, G. (2005) Mise en œuvre de diagnostics couplés pour l'étude de la captation d'aérosols par un spray d'eau. *21ème Congrès Français sur les Aérosols*, Paris, France.
- [87] Marchand, D., Porcheron, E., Lemaitre, P., Plumecocq, W., Rochas, V. et Grehan, G. (2006b) Etude de la collecte d'aérosols par un spray d'eau en milieu hostile. *22ème Congrès Français sur les Aérosols*, PARIS.
- [88] Marshall, I. A., Mitchell, J. P. et Griffiths, W. D. (1991) The behaviour of regular-shaped non-spherical particles in a TSI aerodynamic particle sizer. *Journal of Aerosol Science*, **22**(1), 73-89.
- [89] Méès, L., Lebrun, D. et Gréhan, G. (2003) Réfractométrie d'arc-en-ciel et imagerie en défaut de mise au point *LESP 06-03 Contrat IRSN-CORIA. DA 23275/CA 31000203. 2003.*
- [90] Mendes, P. J., Raposo, A., Sousa, J. M. M. et Pinto, J. F. (2004) Sizing of powders in inhalers with an Aerosizer(R) according to a mixed experimental factorial design. *Journal of Aerosol Science*, **35**(4), 509-527.

- [91] Mitchell, J. P. et Nagel, M. W. (2000) Particle size analysis of aerosols from medicinal inhalers. *KONA-Powder and Particle*, **18**, 41-59.
- [92] Mölter, L. et Keßler, P. (2004) Partikelgrößen und partikelanzahlbestimmung in der außenluft mit einem neuen optischen aerosolspektrometer. *Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft*, **64**(10), 439-447.
- [93] Montassier, N. (1990) "Etude du dépôt des aérosols par thermophorèse dans un écoulement laminaire," Thèse CEA-R-5533, Université PARIS XII - Val de Marne, Paris.
- [94] Mun, C. (2007) "Etude du comportement du produit de fission Ruhténium dans l'enceinte de confinement d'un réacteur nucléaire, en cas d'accident grave," Thèse de doctorat, Université Paris XI, Paris.
- [95] Murata, K. K., Williams, D. C., Tills, J., Griffith, R. O., Gido, R. G., Tadios, E. L., Davis, F. J., Martinez, G. M. et Washington, K. E. (1997) Code Manual for CONTAIN 2.0 : A Computer Code for Nuclear Reactor Containment Analysis. *NUREG/CR-6533, SAND97-1735*, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- [96] Park, S. H., Kim, H. O., Han, Y. T., Kwon, S. B. et Lee, K. W. (2001) Wall loss aate of polydispersed aerosols. *Aerosol Science and Technology*, **35**(3), 710 - 717.
- [97] Park, S. H. et Lee, K. W. (2002) Analytical solution to change in size distribution of polydisperse particles in closed chamber due to diffusion and sedimentation. *Atmospheric Environment*, **36**(35), 5459-5467.
- [98] Parsly, L. F. (1971a) Removal of radioactive particles by sprays. *ORNL-4671*, OAK Ridge National Laboratory.
- [99] Parsly, L. F. (1971b) Spray program at the Nuclear Safety Pilot Plant. *Nuclear Technology*, **10**(4), 472-485.
- [100] Pemberton, C. S. (1960) Scavenging action of rain on non-wettable particulate matter suspended in the atmosphere. *Internationnal Journal of Air Pollution*, **3**, 168-178.
- [101] Peters, T. M. et Leith, D. (2003) Concentration measurement and counting efficiency of the aerodynamic particle sizer 3321. *Journal of Aerosol Science*, **34**(5), 627-634.
- [102] Plumecocq, W. (1997) "Etude de l'interaction d'un système d'aspersion liquide avec l'atmosphère environnante," Thèse de doctorat, Université de Provence, Aix-Marseille 1.
- [103] Plumecocq, W., Layly, V. D. et Bentaib, A. (2005) Modelling of the containment mitigation measures in the ASTEC code, focusing on spray and hydrogen recombiners. *The 11th International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics (NURETH-11)*, Avignon.
- [104] Porcheron, E. (2005) Etude de l'ensemencement en vue des mesures de vitesse par vélocimétrie laser sur TOSQAN. *SERAC/LPMAC/00-05*, IPSN.
- [105] Porcheron, E. (2006) Définition du programme experimental TOSQAN aérosols : Procédés, niveau d'instrumentaion, principe et procédures des essais. *IRSN/DSU/SERAC/LECEV/06-18*, IRSN, Saclay.

- [106] Porcheron, E., Brun, P., Cornet, P., Malet, J. et Vendel, J. (2003) Optical diagnostics applied for single and multi-phase flow characterization in the TOSQAN facility dedicated for thermal hydraulic containment studies *The 10th International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics (NURETH-10)*, Seoul, Korea.
- [107] Porcheron, E., Lemaitre, P., Darreau, S., Nuboer, A., Vendel, J. et Bouilloux, L. (2004) Développement et application de diagnostics optiques sur l'expérience de thermohydraulique TOSQAN pour l'étude d'écoulements diphasiques représentatifs d'une situation accidentelle dans un réacteur nucléaire. *9e Congrès Francophone de Vélocimétrie Laser*, Bruxelles.
- [108] Porcheron, E., Lemaitre, P., Marchand, D., Nuboer, A. et Vendel, J. (2007a) Heat, mass and aerosol transfers in spray conditions for containment application. *The 12th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-12)*, Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A. .
- [109] Porcheron, E., Lemaitre, P., Marchand, D., Nuboer, A. et Vendel, J. (2007b) Heat, mass and aerosol transfers in spray conditions for containment application. *15th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 15)*, Nagoya, Japan.
- [110] Porcheron, E., Lemaitre, P., Nuboer, A., Rochas, V. et Vendel, J. (2007c) Experimental investigation in the tosqa facility of heat and mass transfers in a spray for containment application. *Nuclear Engineering and Design* **237**(15-17), 1862-1871
- [111] Porcheron, E. et Thause, I. (2005) Étude de la spectrométrie par Diffusion Raman Spontanée utilisée pour la mesure des concentrations gazeuses sur l'expérience TOSQAN. *DSU/SERAC/LECEV/05-02*, IRSN, Salcay.
- [112] Postma, A. K. (1975) Models for predicting the removal of airborne contaminants by reactor containment spray. *BNWL-B-417*.
- [113] Postma, A. K. et Coleman, L. F. (1970) Effect of continuous spray operation on the removal of aerosols and gases in the containment systems experiment. *BNWL-1485*.
- [114] Postma, A. K., Sherry, R. R. et Tam, P. S. (1978) Technological bases for models of spray washout of airborne contaminants in containment vessels. *NUREG/CR-0009*, Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Reactor Regulation, Division of Site Safety and Environmental Analysis, Accident Analysis Branch.
- [115] Powers, D. A. et Burson, S. B. (1993a) A Simplified Model Of Aerosol Removal by Containment Sprays. *NUREG/CR-5966, SAND92-2689*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research, Division of Safety Issue Resolution.
- [116] Powers, D. A. et Burson, S. B. (1993b) A Simplified Model Of Aerosol Removal by Containment Sprays. *NUREG/CR-5966, SAND92-2689*.
- [117] Powers, D. A., Kmetyk, L. N. et Schmidt, R. C. (1994) A review of the technical issues of air ingress during severe reactor accidents. *NUREG/CR--6218*, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (United States). Div. of Systems Research; Sandia National Labs., Albuquerque, NM (United States).
- [118] Prodi, F., Santachiara, G. et Cornetti, C. (2002) Measurements of diffusio-phoretic velocities of aerosol particles in the transition region. *Journal of Aerosol Science*, **33**(1), 181-188.



- [119] Pruppacher, H. R. et Klett, J. D. (1978) *Microphysics of Clouds and Precipitation*, Kluwer Academic Publishers.
- [120] Quinten, M., Friehmelt, R. et Ebert, K. F. (2001) Sizing of aggregates of spheres by a white-light optical particle counter with 90° scattering angle. *Journal of Aerosol Science*, **32**(1), 63-72.
- [121] Ranz, W. E. et Wong, J. B. (1952) Impaction of dust and smoke particles on surface and body collectors. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **44**, 1371-1381.
- [122] Remiarz, R. J., Agarwal, J. K., Quant, F. R. et Sem, G. J. (1981) Real-Time Aerodynamic Particle Size Analyzer. *Journal of Aerosol Science*, **3**, 879-895.
- [123] Renoux, A. et Boulaud, D. (1998) *Les aérosols - Physique et Métrologie*, Lavoisier.
- [124] Renoux, A. et Boulaud, D. (2000) "Physique des aérosols - partie 1." *Techniques de l'Ingénieur*.
- [125] Rimberg, D. et Peng, Y. (1977) Aerosol collection by falling droplets. *Air Pollution Control and Design Handbook*, New York, p 747-777.
- [126] Rochas, V. (2006) Mise en place d'un dispositif de prélèvement d'aérosols sur l'installation TOSQAN. Bertin Services.
- [127] Sabathier, F., Zoulalian, A., Albiol, T. et Layly, V. (1994) Growth of hygroscopic aerosol in humid atmosphere. *Journal of Aerosol Science*, **25**(SUPPL 1), 273-274.
- [128] Saldo, V., Verloo, E. et Zoulalian, A. (1998) Study on aerosol deposition in the piteas vessel by settling, thermophoresis and diffusiophoresis phenomena. *Journal of Aerosol Science*, **29**(SUPPL 2).
- [129] Scheibel, H. G., Poss, G. et Weber, D. (1992) KAEVER : An experiment for an improved understanding of aerosol depletion processes in a reactor containment. *Journal of Aerosol Science*, **23**(Supplement 1), 209-212.
- [130] Schumann, T. (1990) On the use of a modified clean-room optical particle counter for atmospheric aerosols at high relative humidity. *Atmospheric Research*, **25**(6), 499-520.
- [131] Schwarz, M., Hache, G. et von der Hardt, P. (1999) PHEBUS FP: a severe accident research programme for current and advanced light water reactors. *Nuclear Engineering and Design*, **187**(1), 47-69.
- [132] Strauss, W. (1966) *Industrial Gas Cleaning ; the principles and practice of the control of gaseous and particulate emissions*, Pergamon Press, Oxford.
- [133] Talbot, L., Cheng, R. K., Schefer, R. W. et Willis, D. R. (1980) Thermophoresis of particles in a heated boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, **101**(part 4), 737-758.
- [134] Telesnicki, G. J. et Goldberg, W. M. (1995) Comparison of turbidity measurement by nephelometry and transmissometry and its relevance to water quality standards. *Bulletin of Marine Science*, **57**(2), 540-547.
- [135] Tuncel, S. G. et Ungor, S. (1996) Rain water chemistry in Ankara, Turkey. *Atmospheric Environment*, **30**(15), 2721-2727.

- [136] Umhauer, H., Berbner, S. et Hemmer, G. (2000) Optical In situ size and concentration measurement of particles dispersed in gases at temperatures up to 1000 °C. *Particle & Particle Systems Characterization*, **17**(3), 15.
- [137] van de Hulst, H. C. (1981) *Light scattering by small particles* Dover Publications, Inc., N.Y.
- [138] Vendel, J. et Droulas, J. (2001) Fiche de cloture d'action : Etude de l'aspersion. CEA-EDF-FRAMATOME.
- [139] Vendel, J., Fournier-Bidoz, V. et Roblot, D. (1999) Efficacité du système d'aspersion pour limiter la concentration des produits de fission dans l'enceinte d'un REP lors d'un accident grave - enseignements tirés des essais CARAIDAS. *DPEA/SERAC/99-33*, IPSN.
- [140] Verger, P. (2001) *Evaluation des conséquences sanitaires de l'accident de Tchernobyl en France: dispositif de surveillance épidémiologique, état des connaissances, évaluation des risques et perspectives*, Institut de veille sanitaire.
- [141] Viswanathan, S. (1999) Numerical study of particle collection by single water droplets. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **38**(11), 4433-4442.
- [142] Volckens, J. et Peters, T. M. (2005) Counting and particle transmission efficiency of the aerodynamic particle sizer. *Journal of Aerosol Science*, **36**(12), 1400-1408.
- [143] Waldmann, L. et Schmitt, K. H. (1966) *Thermophoresis and diffusiophoresis of aerosols*, C.N. Davies.
- [144] Washington, K. E., Murata, K. K., Gido, R. G., Gelbard, F., Russell, N. A., Billups, S. C., Carroll, D. E., Griffith, R. O. et Louie, D. L. Y. (1991) Reference Manual for the CONTAIN 1.1 Code for Containment Severe Accident Analysis. *NUREG/CR-5715 // SAND--91-0835*, Sandia National Laboratory, Albuquerque.
- [145] Wilson, J. C. et Liu, B. Y. H. (1980) Aerodynamic particle size measurement by laser-doppler velocimetry. *Journal of Aerosol Science*, **11**(2), 139-150.
- [146] Witschger, O. (1996) "Etude théorique et expérimentale des facteurs physiques d'échantillonnage des polluants particulaires. Application aux capteurs à fente annulaire.," Thèse de Doctorat, Université de Paris 12, Créteil, N°96PA120029.
- [147] Zavaleta, P. et Landesman, C. (1997) Expérience TOSQAN - dimensionnement et description de l'installation expérimentale. *Rapport d'étude IPSN/SERAC/LPMC/97-02*, IPSN, Saclay.

# ANNEXES

## ANNEXE 1. Clichés microscopiques

L'étude a porté sur 6 types d'aérosols différents (Fig. 3-15, Fig. 3-16 et Fig. 3-17) de 3 compositions chimiques différentes : les Monospher 1000 (particules de  $\text{SiO}_2$  utilisées pour la calibration du granulomètre WELAS), de l'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et du carbure de silicium ( $\text{SiC}$ ).

### Type Monospher 1000

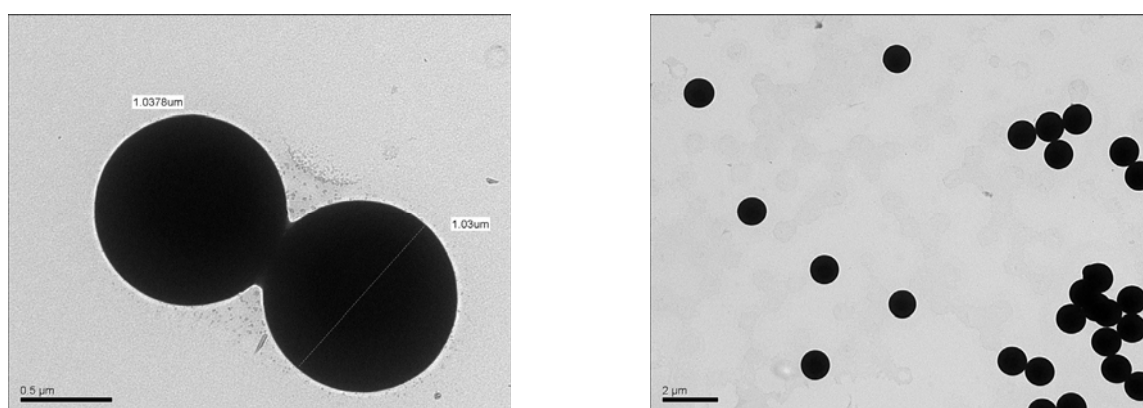


Fig. A 1 Morphologie au MET du Monospher 1000

L'analyse chimique a confirmé que ces poudres étaient composées de  $\text{SiO}_2$ .

### Type SiC

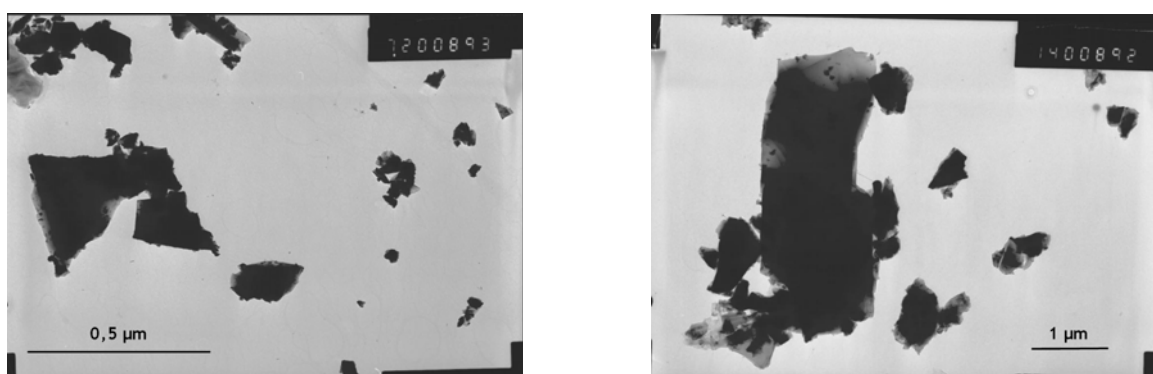


Fig. A 2 Morphologie au MET du SiC

L'analyse chimique a confirmé que ces poudres étaient composées de SiC.

### Type alumine

AKE46

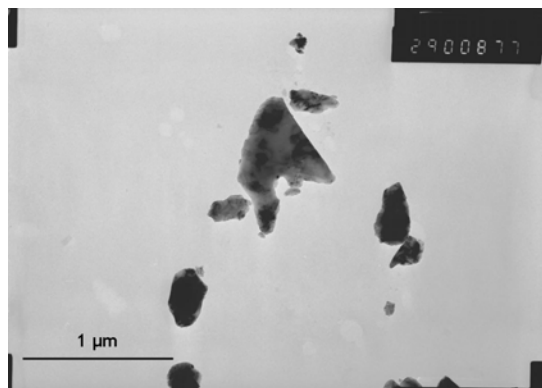
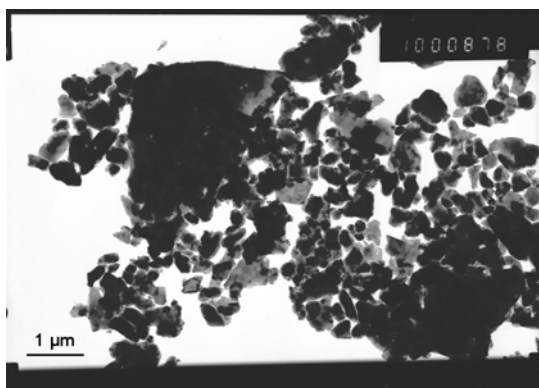


Fig. A 3 Morphologie au MET du AKE46

AKE42

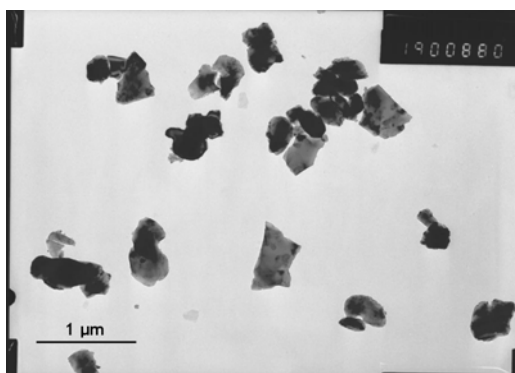


Fig. A 4 Morphologie au MET du AKE42

SM50

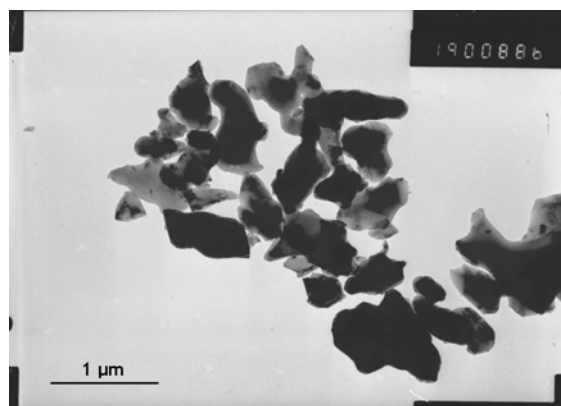
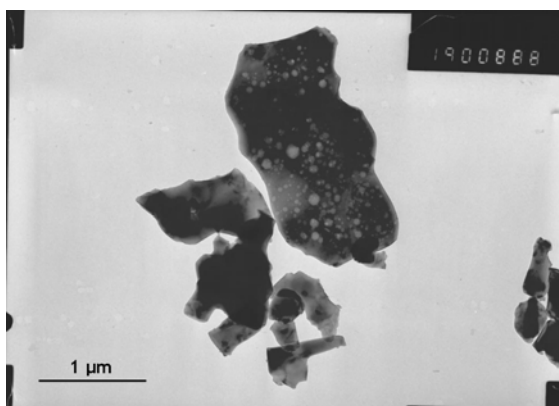
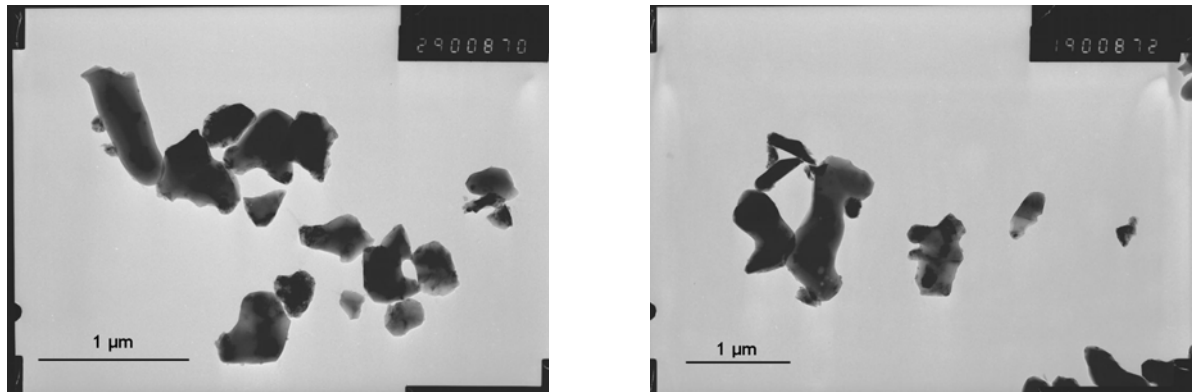


Fig. A 5 Morphologie au MET du SM50

L'analyse chimique a montré que ces poudres étaient composées d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

### Type SG10



**Fig. A 6 Morphologie au MET du SG10**

L'analyse chimique a révélé que cette poudre était composée de  $\text{Al}(\text{OH})_3$ .

Aux vues des morphologies et des compositions chimiques des 6 types poudres précédentes et le de leur polydispersion, la poudre de SG-10, d'hydroxyde d'aluminium, soluble dans l'eau, et ne sera pas utilisée pendant nos essais qui se font avec des aérosols insolubles. Quant à la poudre SM-50, des aspérités sont visibles sur les clichés MET, elles seront gênantes au niveau des mesures par un système optique.

## ANNEXE 2. Positions des diverses cannes et hublots

La Fig. A 7 montre le positionnement des cannes horizontales, cannes de prélèvements pour la spectrométrie de masse, et hublots dans l'enceinte TOSQAN. L'angle  $q_0$  correspond au nord. Les Tableaux A 1, Tableau A 2 et Tableau A 3 donnent les hauteurs, les rayons et les angles de ces positionnements, ainsi que la correspondance en  $Z/D_{inj}$ .

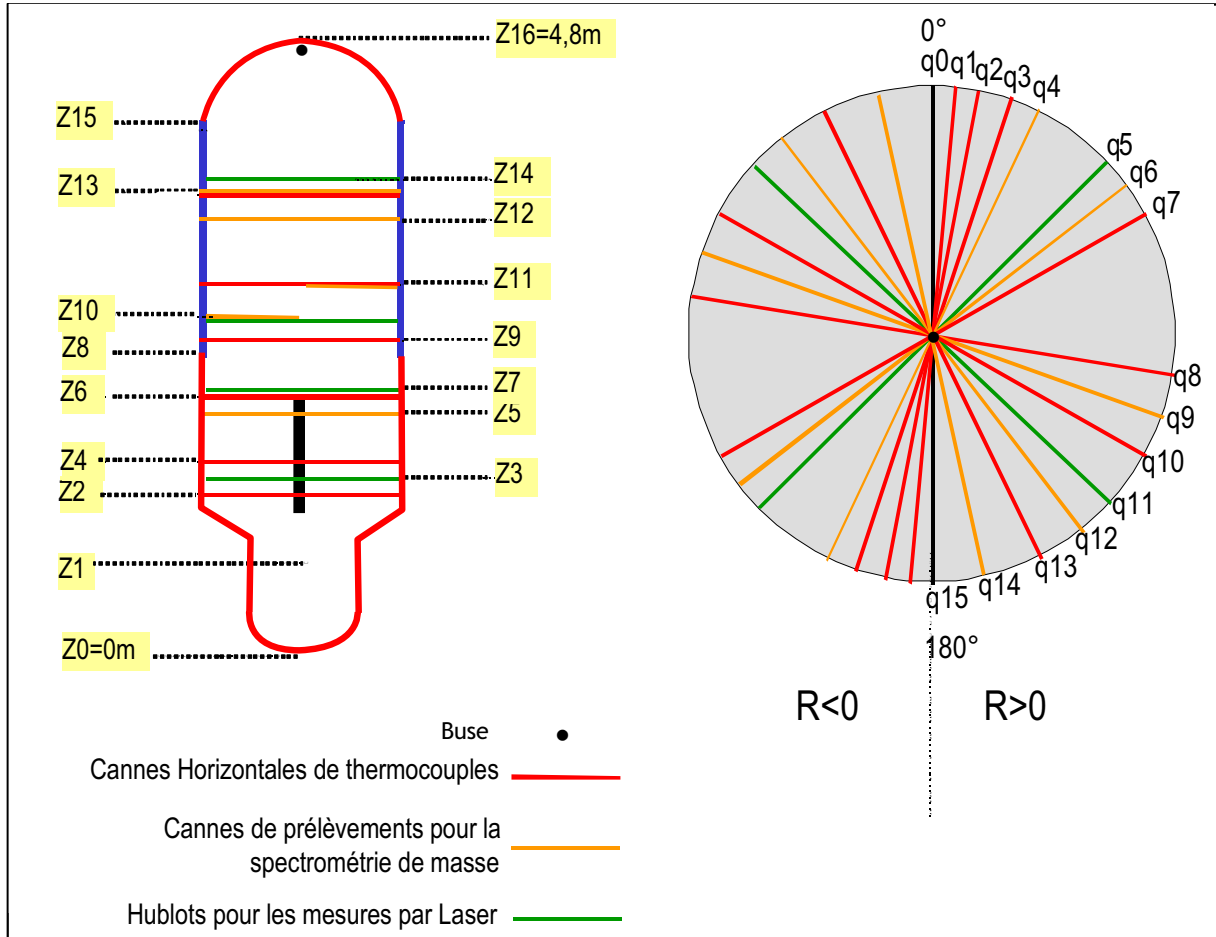


Fig. A 7 Position des diverses cannes et hublots

Chacun des thermocouples susceptibles d'être aspergés par les gouttes d'aspersion est protégé par un « petit chapeau » permettant de l'isoler de l'impact des gouttes (Fig. A 8).

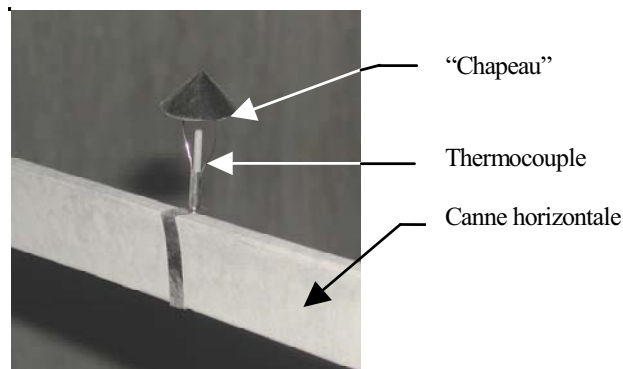


Fig. A 8 « Chapeau » de protection des thermocouples

**Tableau A 1 Positions verticales des points de mesure dans TOSQAN**

Nom de la position	Repère Z/Dinj	Type de la paroi	Hauteur (m)	Référence expérimentale	Remarque
Z16	70	CHAUDE	4,800		Haut du dôme
Z16bis			4,773		Buse d'injection d'hélium <b>Injection des aérosols</b>
Z15	60		4,392	TE670 – TE685	Haut de cannes TC verticales
Z14	50	FROIDE	4,000	H211 – H221 – H231	H231 hublot tangentiel <b>Mesures aérosols en suspension dans le gaz</b>
Z13	47		3,930	C23-24 - C7 – C8 TE673 - 676	C7 – C8 à 3,910 T en proche paroi à 3,945
Z12	40		3,650	C9 – C10	
Z11	27		3,135	C25-26 – C11 TE680 – 701	C11 à 3,100 T proche paroi à 3,120
Z10	17		2,800	C4 – H113 – H123 – H133	H133 hublot tangentiel
Z9	15		2,675	C27-28 TE703 - 706	
Z8	14		2,660	TE706 – TE721	Bas des cannes TC verticales hautes T proche paroi
Z7bis	6		2,350	TE722 – TE707	Haut des cannes TC verticales basses
Z7	0	2,100	H112 – H122	Niveau de l'injection <b>Injection aérosols possible</b>	
Z6	-1	2,045	C33-34		
Z5	-5	1,900	C13 – C14	<b>Mesures aérosols en suspension dans le gaz</b>	
Z4	-14	1,470	C35-36		
Z3	-18	1,345	H111 – H121		
Z2	-21	1,210	C39-40		
Z1bis	-28	0,944	TE726 – TE711	Bas des cannes TC verticales basses	
Z1	-30	0,870	C16 (point sur l'axe)	Bas du cylindre principal entre 0,527 et 0,917	
Z0ter		0,700	TH1 – TH9	Canne TC puisard	
Z0bis		0,400	TH10 - TH18	Canne TC puisard	
Z0	-50	0		Bas du puisard	

**Tableau A 2 Positions radiales des points de mesure dans TOSQAN**

Nom	Rayon (m)	Référence expérimentale	Remarque
<b>R0</b>	-0,750	TE735 – 744 (6)	Paroi (côté ouest) <b>Mesures aérosols en suspension dans le gaz</b>
<b>R1</b>	-0,745	C8 – C10 – C4 – C14 – TE689& (3)	
<b>R2</b>	-0,730	C8 – C10 – C4	
<b>R3</b>	-0,720	TE685 – 721 (10)	Cannes TC verticales zone froide
<b>R3bis</b>	-0,680	TE722 – 726 (5)	Cannes TC verticales zone chaude
<b>R4</b>	-0,600	TE6x0 (6) – C14	
<b>R5</b>	-0,550	C8 – C10 – C4	
<b>R6</b>	-0,475	C14	
<b>R7</b>	-0,400	TE6x1 (6)	
<b>R8</b>	-0,375	C8 – C10 – C4 – C14	<b>Mesures aérosols en suspension dans le gaz</b>
<b>R9</b>	-0,225	C8 – C10 – C4 – C14	
<b>R10</b>	-0,200	TE6x2 (6)	
<b>R10bis</b>	-0,170	TV1 – TV14	Canne TC verticale puisard
<b>R11</b>	-0,100	C8 – C10 – C4 – C14	Côté ouest
<b>R12</b>	0	TE6x3 (6)	Axe de symétrie Z – Buse <b>Mesures aérosols en suspension dans le gaz</b>
<b>R131</b>	0,1	Buse d'injection d'hélium	Premier orifice
<b>R132</b>	0,03		Deuxième orifice
<b>R133</b>	0,04		Troisième orifice
<b>R13</b>	0,100	C7 – C9 – C11 – C13	Côté est
<b>R14</b>	0,200	TE6x4 (6)	
<b>R15</b>	0,225	C13 – TE601 – TE602	TC puisard
<b>R16</b>	0,375	C7 – C9 – C11 – C13	
<b>R17</b>	0,400	TE6x5 (6)	
<b>R18</b>	0,475	C13	
<b>R19</b>	0,600	TE6x6 (6) – C13	
<b>R19bis</b>	0,680	TE707 – 711 (5)	Cannes TC verticales zone chaude
<b>R20</b>	0,700	C7 – C9 – C11	
<b>R21</b>	0,720	TE670 – 706 (10) – TE605	Cannes TC verticales – dôme
<b>R22</b>	0,730	C7 – C9 – C11	
<b>R23</b>	0,740	C7 – C9 – C11	
<b>R24</b>	0,745	C7 – C9 – C11 – C13 – TE674& (3)	
<b>R25</b>	0,750	TE734 – 745 (6)	Paroi (côté est)



**Tableau A 3 Positions angulaires des points de mesure dans TOSQAN**

Nom	Position angulaire (0 à 180 °)	Référence expérimentale	Remarque
q0	0		Nord, T proche paroi
q1	6	TE734 – 745 TE735 – 744	TC paroi froide
q2	10	TE673 – 676 TE680 – 701 TE703 – 706 TE67 – 706 TE685 – 721	Profils de T proche paroi (vertical et horizontal)
q3	20	C27 – 28	
q3bis			<b>Mesures aérosols en suspension dans le gaz</b>
q4	30	C9 – C10	
q5	45	H121 – H122 – H123 – H221	<b>Mesures aérosols en suspension dans le gaz</b>
q6	50	C13 – C14	
q7	60	C33-34	
q8	100	C35 – 36 – C39 – 40 Canne TC verticale Puisard	(90° = est)
q9	112	C7 – C8	
q10	120	C23-24	
q11	135	H111 – H112 – H113 – H211	
q12	150	C11 – C4	
q13	160	C25-26 – TE605	TC dôme
q14	170	C16 – TE601 – TE602	TC puisard
q15	180		Sud, proche paroi Orientation de la buse d'injection d'hélium

Dans le tableau ci-dessous, on peut constater qu'en Z11 Zone Sud, trois thermocouples ont une distance à la paroi identique. Ces thermocouples ont des altitudes très légèrement différentes autour de Z11.

**Tableau A 4 Distance exprimée en cm entre les thermocouples proche parois et la paroi**

Cannes verticales		Zone Nord	Zone Sud
Haute	Z13	2,9 – 2 – 1,1 – 0,6	0,5 – 0,9 – 1,5 – 2,9
		2,9	3,4
		2,7	2,6
	Z11	3,0	2,5
		0,3 – 0,8 – 0,6 – 2,5	1 – 1 – 1 – 3
		2,9	3,0
Z8	0,3 – 0,8 – 1,4 – 3,0	0,3 – 0,8 – 1,5 – 3,0	
Basse	Z7 bis à Z1 bis	6,6	6,8
		7,0	6,7
		7,4	7,2
		7,4	6,2

**Tableau A 5 Correspondance entre les systèmes de coordonnées Z et Z/D<sub>inj</sub> pour les thermocouples des cannes verticales**

<b>Z (m)</b>	<b>Z/D<sub>inj</sub></b>
4,457	58,925
4,357	56,425
4,183	52,075
4,010	47,750
3,804	42,600
3,598	37,450
3,391	32,275
3,185	27,125
2,955	21,375
2,725	15,625
2,415	7,875
2,063	-0,925
1,712	-9,700
1,361	-18,475
1,009	-27,275

## ANNEXE 3. Etudes de l'efficacité d'Echantillonnage des aérosols lors des essais Aérosols de TOSQAN

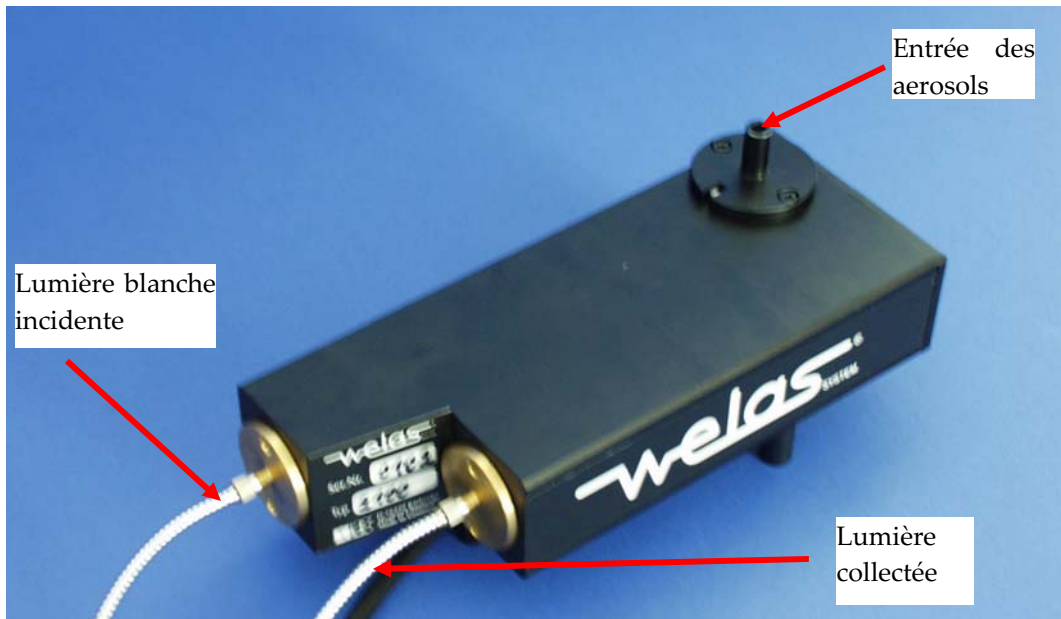
Afin de dimensionner la ligne de prélèvement il est nécessaire d'évaluer l'influence des différents paramètres sur le prélèvement des aérosols. Un aérosol est une particule possédant une masse, elle est donc soumise à la gravité et possède une énergie cinétique, ce qui peut entraîner des pertes lors de l'échantillonnage.

### 3.1. MATERIEL ET PRODUITS EXISTANTS

#### 3.1.1. DISPOSITIF DE MESURE OPTIQUE WELAS

##### WELAS TECHNICAL DATA

Dimension de la cellule optique (LxPxH) – Valeur standard de l'UC	90 µm x 90 µm x 90 µm 200 µm x 200 µm x 200 µm	
Concentration maximum pour 10 % d'erreur de coïncidence welas-2100 & welas-2200	10 <sup>5</sup> particules/cm <sup>3</sup> 10 <sup>4</sup> particules/cm <sup>3</sup>	
Communication entre l'unité centrale et le PC	RS 232	
Débit d'aspiration (standard)	5 l/min	
Voltage	230 V, +/-10%	115 V, +/-10%
Intensité	2 A / 250 V	4 A / 130 V
Consommation	200 W	
Fréquence	47-63 Hz	
Dimensions HxLxP	200 mm x 480 mm x 430 mm	
Unité centrale	50 mm x 100 mm x 250 mm	
Cellule optique		
Conditions d'utilisations	Dans environnement sec Températures autorisées de 10°C à 30 °C Humidité relative maximale : 80 %	
Nettoyage	Voir le manuel	
Poids	18 kg	
Unité centrale	2,8 kg	
cellule optique		



**Fig. A 9 Cellule optique du WELAS**

Le diamètre interne en amont du tube de mesure optique est de 6 mm, le débit nécessaire est de 5 l/min ce qui se caractérise par une vitesse de 2,95 m/s dans la conduite de prélèvement pour un même diamètre de sonde.



**Fig. A 10 Vue d'ensemble d'une canne de prélèvement des aérosols**



**Fig. A 11 Vue de face du boîtier de régulation**

### 3.1.2. QUALIFICATION DE L'EFFICACITE D'ECHANTILLONNAGE DES AEROSOLS

Le diamètre interne du système de prélèvement a été dimensionné afin que l'échantillon d'aérosols prélevé soit le plus représentatif possible et que la buse de prélèvement respecte un dimensionnement bien précis (Renoux et Boulaud, 1998) :

$$1 < \frac{d_{\text{externe}}}{d_{\text{interne}} (d_c)} < 1,1 \quad \text{Eq. (5.1)}$$

Les aérosols sont soumis à la gravité et possèdent une énergie cinétique, ce qui peut entraîner des pertes lors de leur échantillonnage. Le diamètre interne  $d_c$  en amont du tube de mesure du granulomètre optique étant de 6 mm, le débit volumique égal à 5 l/min, la vitesse dans la conduite de prélèvement est égale à 2,95 m/s. L'efficacité d'échantillonnage des particules sera donc étudiée pour ces conditions de prélèvement (l'efficacité de transmission des particules pour différents diamètres à néanmoins été étudiée, voir Fig. A 12).

### 3.1.3. PARTICULES ET NOMBRE DE STOKES

Le nombre de Stokes caractérise le mouvement curviligne d'un aérosol. C'est le rapport entre la distance d'arrêt de la particule et une dimension caractérisée par l'obstacle. Ce nombre de Stokes est un paramètre important pour déterminer les coefficients de captage des aérosols.

Ce nombre de Stokes est une donnée primordiale pour déterminer les coefficients de captage et de transmission des aérosols.

Les nombres de Stokes du Tableau A 6 ont été calculés d'après la formule présentée dans (Hinds, 1999; Baron et Willeke, 2001) :

$$Stk = \frac{\rho_0 d_{ae}^2 W}{18\mu d_c} \quad \text{Eq. (5.2)}$$

$d_{ae}$  : diamètre aérodynamique de la particule,

$\rho_0$  : masse volumique de référence (1000kg/m<sup>3</sup>),

$\mu$  : viscosité dynamique du fluide porteur,

$d_c$  : diamètre intérieur du conduit,

$W$  : vitesse de la particule dans le gaz.

**Tableau A 6 Nombre de Stokes associés aux particules pour différentes vitesses de gaz dans TOSQAN à 120 °C et 2 bar**

Type de particules	Type de diamètre	Taille (µm)	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Stokes, à W = 0,5 m/s	Stokes, à W = 1 m/s	Stokes, à W = 1,5 m/s
« SM-50 » lot 060144	D <sub>10</sub> *	0,2	3,80	4,3.10 <sup>-5</sup>	8,5.10 <sup>-5</sup>	1,3.10 <sup>-4</sup>
«AKE-46» lot 060202	D <sub>10</sub>	0,36	3,80	1,2.10 <sup>-4</sup>	2,4.10 <sup>-4</sup>	3,6. 10 <sup>-4</sup>
«AKE-42» lot 060210	D <sub>10</sub>	0,28	3,80	7,0.10 <sup>-4</sup>	1,5. 10 <sup>-4</sup>	2,3. 10 <sup>-4</sup>
«SG-10» lot 060186	D <sub>10</sub>	0,46	2,42	1,2.10 <sup>-4</sup>	2,4. 10 <sup>-4</sup>	3,6. 10 <sup>-4</sup>
SiC	D <sub>moy</sub>	1,2	3,20	1,0.10 <sup>-3</sup>	2,0.10 <sup>-3</sup>	2,9.10 <sup>-3</sup>

\*D<sub>10</sub> : Diamètre arithmétique moyen.

On constate que les nombres de Stokes affectés à nos particules et à nos conditions d'essais sont très faibles. Ce qui est très positif car comme nous le verrons par la suite, plus le nombre de stokes est faible plus le taux de captage de la particule est élevé.

### 3.2. EFFICACITE D'ECHANTILLONNAGE

#### 3.2.4. GENERALITE

Pour réaliser des mesures sur des aérosols il faut qu'un échantillon représentatif soit prélevé de son environnement et transférer jusqu'au détecteur. En général un dispositif de prélèvement comprend plusieurs éléments placés en série (Witschger, 1996) :

- Une entrée d'aspiration,
- Un conduit d'aspiration,
- Un étage sélecteur,
- Un étage collecteur.

A chaque élément on associe une efficacité de transfert qui est la probabilité d'une particule de traverser l'élément. On peut alors déterminer l'**efficacité d'échantillonnage** en fonctions élémentaires :

$$E_E = E_C \cdot E_T \cdot E_S \cdot E_F \quad \text{Eq. (5.3)}$$

- E<sub>C</sub> : efficacité de *captage* ;
- E<sub>T</sub> : efficacité de *transmission* ;
- E<sub>S</sub> : efficacité de *sélection* ;
- E<sub>F</sub> : efficacité de *collection*.

Dans notre application nous ne possédons pas de sélecteur ( $E_s = 1$ ) et nous supposons que l'efficacité de collection est totale ( $E_f = 1$ ) car nous utilisons une cellule de mesure optique. L'équation se réduit donc à :

$$E_E = E_C \cdot E_T \quad \text{Eq. (5.4)}$$

### 3.2.5. EFFICACITE DE TRANSMISSION

Nous étudions les pertes par sédimentation des particules dans le tube de prélèvement (le diamètre aérodynamique est bien supérieur à  $0,2 \mu\text{m}$ , le conduit est horizontal et sans coude). La Fig. A 12 présente l'efficacité de transmission de différentes particules présentées dans le Tableau A 7, en fonction du diamètre de tube de prélèvement. Ces courbes ont été déterminées à l'aide de la formule de Heyder et Gerbhart (1977) donnée dans (Baron et Willeke, 2001) en régime laminaire ( $Re = 1282$ ) :

$$E_T = 1 - \frac{2}{\pi} \left[ 2k\sqrt{1-k^{2/3}} - k^{1/3}\sqrt{1-k^{2/3}} + \arcsin(k^{1/3}) \right]$$

$$k = \frac{3}{4} \frac{L}{d_c} \frac{V_{ts}}{U} \cos \theta$$

$\theta$  : inclinaison du tube

$V_{ts}$  : vitesse de sédimentation de la particule

$L$  : longueur de la conduite

$U$  : vitesse de la particule dans la conduite

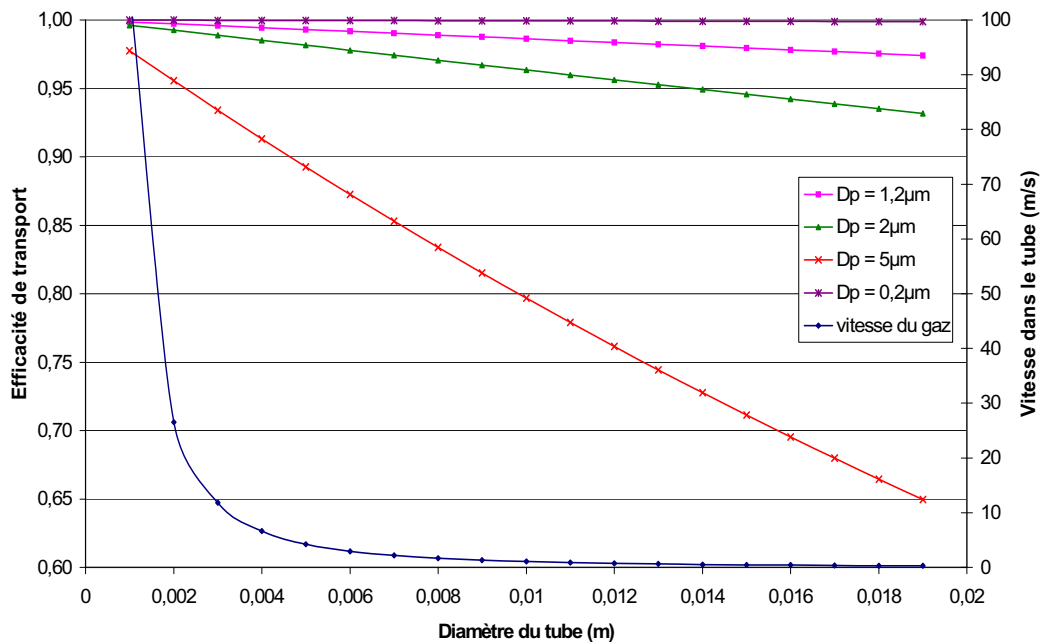


Fig. A 12 Efficacité de transport des particules pour différents diamètres de tubes –  $Q = 5 \text{ l/min}$ ,  $L = 1\text{m}$  [Rochas 2006]

On constate que pour un diamètre de tube supérieur à 1 cm et pour une taille de particule supérieure à 2 µm, l'efficacité de transport est significativement affectée. L'efficacité de transport a été calculée pour chaque particule en notre possession, Tableau A 7.

**Tableau A 7 Efficacités de transmission associées aux particules**

Type de particule	Type de diamètre	Taille (µm)	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	E <sub>T</sub> d <sub>c</sub> = 4 mm	E <sub>T</sub> d <sub>c</sub> = 6 mm	E <sub>T</sub> d <sub>c</sub> = 8 mm
« SM-50 » lot 060144	D <sub>10</sub>	0,20	3,80	0,9998	0,9996	0,9995
« AKE-46 » lot 060202	D <sub>10</sub>	0,36	3,80	0,9993	0,9990	0,9986
« AKE-42 » lot 060210	D <sub>10</sub>	0,28	3,80	0,9996	0,9994	0,9991
« SG-10 » lot 060186	D <sub>10</sub>	0,46	2,42	0,9993	0,9990	0,9986
SiC	D <sub>moy</sub>	1,20	3,20	0,9945	0,9918	0,9891

### 3.2.6. EFFICACITE DE CAPTAGE DES AEROSOLS

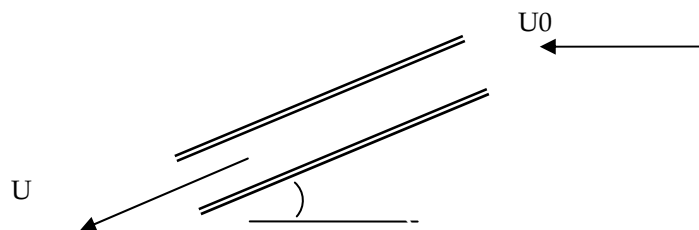
Les gammes de nombres de Stokes de notre étude sont très faibles et en dehors du domaine de validité des modèles de captage des aérosols. Les efficacités de captage ont donc été calculées pour des tailles de particules correspondant à la taille limite du seuil de validité des modèles considérés.

#### Modèle de Baron et Willeke (2001)

Le montre l'efficacité de captage d'une buse de prélèvement de 6 mm de diamètre pour des angles de prélèvement allant de 1° à 60°.

$$\text{Rapport d'isocinétisme : } R = \frac{U_0}{U}$$

$$E_c = 1 + \left[ \left( \frac{U_0}{U} \right) \cos \theta_c - 1 \right] \left[ 3Stk \sqrt{\frac{U}{U_0}} \right]$$



**Fig. A 13 Prélèvement anisoaxial**

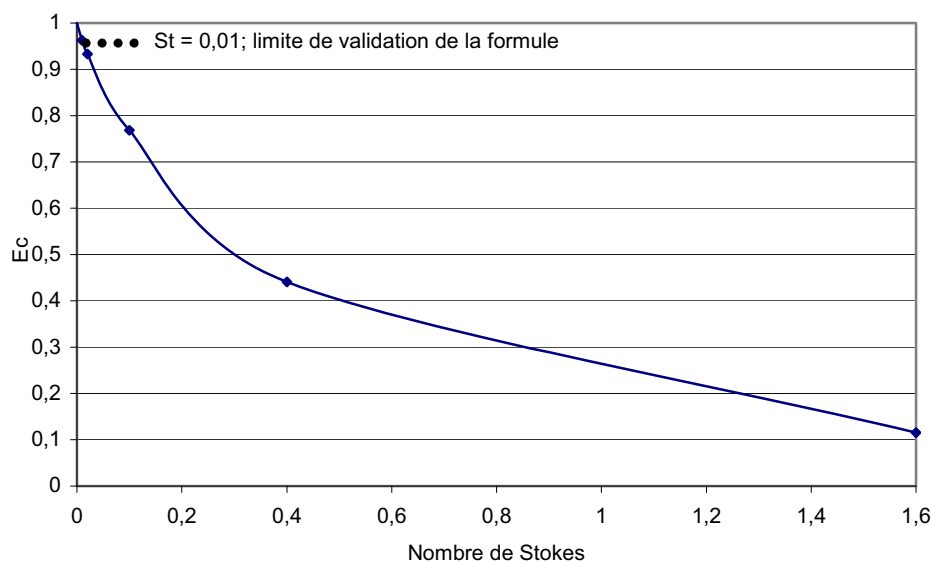


**Tableau A 8 Efficacité de captage en fonction du nombre de stokes et de l'angle de prélèvement**

Stokes	$\theta_c$ (°)	$E_c$ à R = 0,17	$E_c$ à R = 0,34	$E_c$ à R = 0,51
1,6	60	0,115	-	-
0,4	60	0,441	-	-
0,1	60	0,768	0,818	0,849
0,02	1	0,981	0,990	0,993
	30	0,965	0,980	0,986
	45	0,951	0,970	0,978
	60	0,933	0,955	0,965
0,01	1	0,990	0,995	0,997
	30	0,981	0,989	0,993
	45	0,974	0,984	0,989
	60	0,963	0,976	0,982

Domaine de validité du modèle :  $0^\circ < \theta_c < 60^\circ$ ,  $0,01 < St < 6$

La Fig. A 14 montre l'efficacité de captage d'une buse de diamètre égal à 6 mm pour un angle de prélèvement de  $60^\circ$ .



**Fig. A 14. Efficacité de captage pour un angle de  $60^\circ$  [Rochas 2006]**

**Modèle de Hangel et Willeke, et TAI et Vincent (Witschger, 1996; Baron et Willeke, 2001)**

D'autres modèles ont été étudiés afin de valider le comportement général de l'efficacité de captage lorsque le nombre de Stokes est inférieur à 0,01 (Tableau A 9 et Fig. A 15).

Hangel et Willeke (1990) ont développé un modèle d'efficacité de captage valable pour des angles d'orientation  $\theta_c$  compris entre  $45^\circ$  et  $90^\circ$  :

$$E_c = 1 + \alpha_c(\theta_c)(R \cos \theta_c - 1)$$

$$\alpha_c(\theta_c) = 3\text{Stk} \sqrt{U/U_0}$$

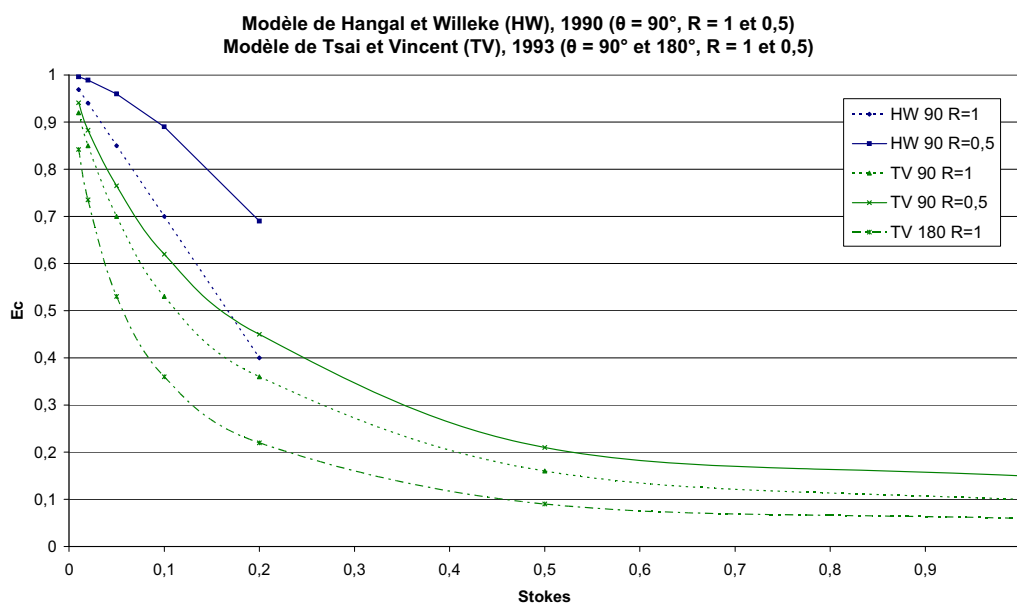
avec  $U$  : vitesse initiale

$U_0$  : vitesse d'aspiration

Le modèle de TAI et Vincent (1993) peut être appliqué à des angles  $\theta_c > 90^\circ$ . Néanmoins, pour ces angles supérieurs à  $90^\circ$ , le problème du captage est considérablement compliqué et les modèles seraient encore sujets à discussions.

**Tableau A 9 Efficacité de captage des modèles de Hangel et Willeke, Tsai et Vincent**

	Modèle de Hangel et Willeke, 1990		Modèle de Tsai et Vincent, 1993		
	$\theta_c = 90^\circ$		$\theta_c = 90^\circ$		
Stokes	R = 1	R = 0,5	Stokes	R = 1	R = 0,5
0,00	1,000	1,000	0	1,000	1,000
0,01	0,969	0,996	0,010	0,969	0,996
0,02	0,940	0,989	0,020	0,940	0,989
0,05	0,850	0,960	0,050	0,850	0,96
0,10	0,700	0,890	0,100	0,700	0,890
0,20	0,400	0,690	0,200	0,400	0,690
0,50	-	-	0,500	-	-
1,00	-	-	1,000	-	-
2,00	-	-	2,000	-	-



**Fig. A 15. Efficacité de captage des modèles de Hangel et Willeke, Tsai et Vincent en fonction du nombre de Stokes [Rochas 2006]**

### Extrapolation des résultats

Afin de donner une valeur estimative de l'efficacité de captage des particules utilisées dans nos conditions expérimentales, nous avons émis l'hypothèse qu'une particule ayant un nombre de Stokes tendant vers 0 a une probabilité de captage de 1 (Fig. A 16 et Tableau A 10).

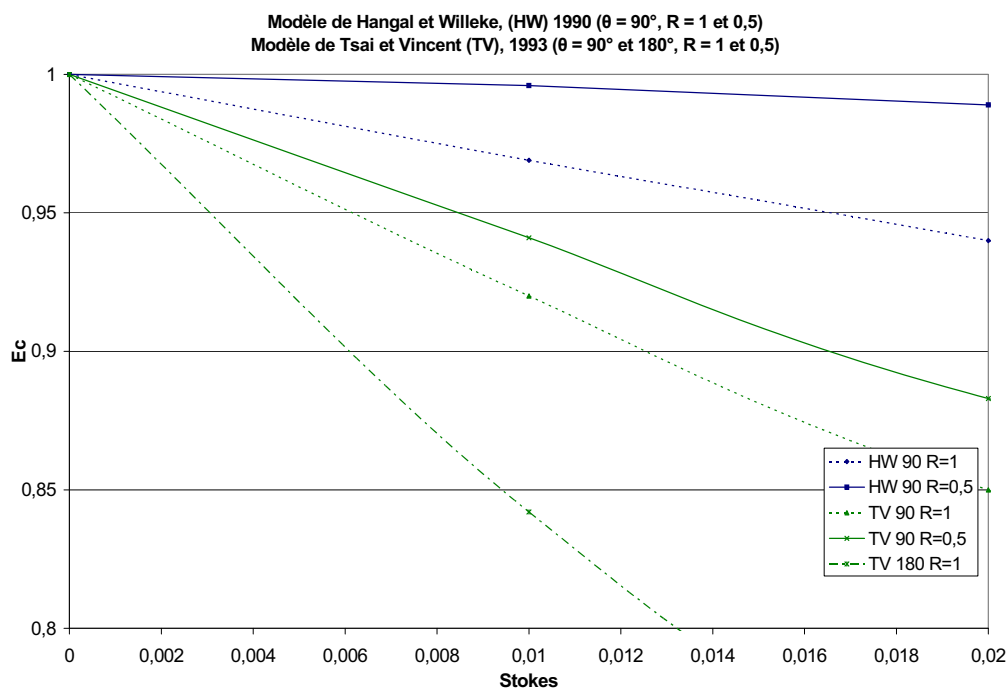


Fig. A 16. Extrapolation de l'efficacité de captage en fonction de Stokes [Rochas 2006]

Tableau A 10 Estimation de l'efficacité de captage des particules

Type de particule	Type de diamètre	Taille ( $\mu\text{m}$ )	Masse volumique ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Stk, à $W = 1,5$ m/s	Ec
				$R = 0,5$	Extrapolation modèle HW
				$90^\circ$	$90^\circ$
« SM-50 » lot 060144	$D_{10}$	0,20	3,80	$1,3 \cdot 10^{-4}$	1,00
« AKE-46 » lot 060202	$D_{10}$	0,36	3,80	$3,6 \cdot 10^{-4}$	1,00
« AKE-42 » lot 060210	$D_{10}$	0,28	3,80	$2,3 \cdot 10^{-4}$	1,00
« SG-10 » lot 060186	$D_{10}$	0,46	2,42	$3,6 \cdot 10^{-4}$	1,00
SiC	$D_{\text{moy}}$	1,20	3,20	$2,9 \cdot 10^{-3}$	0,998

### 3.2.7. SYNTHÈSE DE L'EFFICACITÉ D'ÉCHANTILLONNAGE

L'efficacité d'échantillonnage (Tableau A 11) a été estimée d'après la relation suivante :

$$E_{E, \text{ estimée}} = E_{T, \text{ calculée}} + E_{C, \text{ estimée}}$$

avec  $E_c$  issue de la corrélation de Tsai et Vincent, cas le plus défavorable.

**Tableau A 11 Efficacité d'échantillonnage en fonction du type de particule utilisée pour une ligne de prélèvement de 1 m de longueur et de 6 mm de diamètre (d<sub>c</sub>)**

Type de particule	Type de diamètre	Taille (µm)	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	E <sub>E</sub> ; d <sub>c</sub> = 6 mm
« SM-50 » lot 060144	D <sub>10</sub>	0,20	3,80	0,996
« AKE-46 » lot 060202	D <sub>10</sub>	0,36	3,80	0,993
« AKE-42 » lot 060210	D <sub>10</sub>	0,28	3,80	0,994
« SG-10 » lot 060186	D <sub>10</sub>	0,46	2,42	0,993
SiC	D <sub>moy</sub>	1,20	3,20	0,967

### **3.2.8. CONCLUSION SUR LA LIGNE D'ÉCHANTILLONNAGE**

Le diamètre a été fixé à 6 mm. Dans cette configuration le prélèvement est subsocinétique ( $0,16 < R < 0,5$ ) et ce diamètre est identique au diamètre du tube de mesure du granulomètre WELAS. L'efficacité d'échantillonnage est alors supérieure à 98 % pour les particules à base d'alumine et à 95 % pour celles à base de silice quelle que soit l'orientation du prélèvement. Les faibles masses et diamètres des particules leur confèrent de faibles nombres de Stokes ( $Stk < 3.10^{-3}$  pour la silice et  $Stk < 1.10^{-3}$  pour les alumines).

L'efficacité de captage a été calculée pour une longueur de prélèvement de 1 m, soit un prélèvement au centre de TOSQAN, ce qui correspond au cas le plus défavorable pour le coefficient de transmission des aérosols.

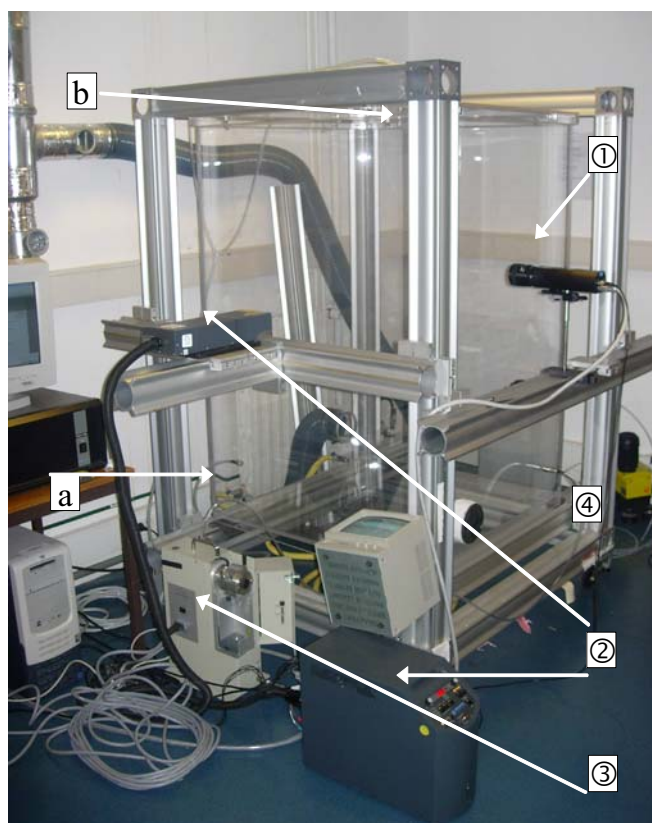
## ANNEXE 4. Etude préliminaire en vue de l'utilisation du granulomètre WELAS et son implantation sur TOSQAN

Afin de réaliser des expériences sur le rabattement d'aérosols les plus analytiques, le dispositif DECAPE (Dispositif pour l'Etude de la Captation des Aérosols Par une Pulvérisation d'Eau - Fig. A 17) a été conçu pour travailler en conditions atmosphériques :  $P_{atm}$  et  $T_{ambiant}$ .

Les expériences effectuées visent à étudier la faisabilité de la mise en œuvre de diagnostics pour caractériser les aérosols présents dans une enceinte et leur collecte par un spray d'eau notamment avec le granulomètre optique WELAS.

### Le dispositif

DECAPE est une enceinte expérimentale étanche réalisée en PMMA, de forme parallélépipédique avec une hauteur de 1,40 m et une base carrée de 0,8 m<sup>2</sup>, soit un volume interne de 1,1 m<sup>3</sup>. Elle est équipée de plusieurs piquages (2 sur le couvercle et 2 sur les cotés) pour l'introduction des aérosols (Fig. A 17, (a)). Le système de production des aérosols est assuré via un disperseur de poudre (RBG 1000, PALAS, identique dans TOSQAN) qui disperse les aérosols solides (Fig. A 17, ③). Pour le système d'aspersion, l'enceinte est équipée d'un piquage (Fig. A 17, (b)) au centre du couvercle pour le passage de la buse d'aspersion et de deux évacuations d'eau en partie basse. La buse d'aspersion (D1-35 de Spraying Système) est mobile suivant l'axe vertical. Elle génère un spray type cône plein.



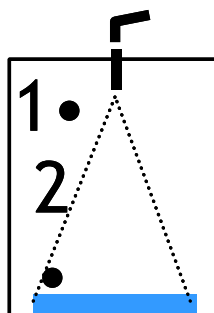
**Fig. A 17 Enceinte expérimentale DECAPE**  
① CCD ; ② LASER ; ③ Générateur d'aérosols, ④ WELAS

## Moyens de mesure associés

Associé à ce dispositif, les moyens de mesures suivants sont implantés sur le DECAPE :

- Un système PIV (Particule Image Velocimétrie – cf. §3.2.2.1) pour caractériser les écoulements et la vitesse des particules (① et ②).
- A l'aide du granulomètre WELAS (④), des mesures de granulométrie et de concentration massique d'aérosols sont réalisées (Marchand et al., 2005). Les principales applications de ce dispositif à cette étude concernent le comptage des particules dans l'enceinte et la mesure de l'évolution du diamètre des aérosols au cours des essais avec et sans aspersion.

La faisabilité de mesure des concentrations numériques et des diamètres moyens des aérosols avec le granulomètre WELAS sous aspersion est réalisée. Pour cette étude, les aérosols sont des particules de SiC préalablement étuvées à 105 °C. L'injection des aérosols dans DECAPE est réalisée par le piquage bas (Fig. A 17,(a)), à 11 cm du fond de l'enceinte. La buse d'aspersion est positionnée à 23 cm du haut de l'enceinte (Fig. A 17,(b)). Les mesures des diamètres des aérosols se font en haut de l'enceinte (au-dessus du spray) pour les essais indicés 1 et en bas de l'enceinte (bord de spray) pour les essais indicés 2 (Fig. A 18).



**Fig. A 18 Points de mesure dans DECAPE**

Deux types de campagnes de mesure des concentrations numériques et les diamètres des aérosols en suspension dans l'enceinte sont réalisés (Tableau A 12) :

- Une campagne sans aspersion (SEDI\_1 et SEDI\_2) dans le but d'obtenir une référence du comportement des aérosols dans l'enceinte sans aspersion.
- Une campagne avec aspersion (ASP\_1 et ASP\_2) avec la buse D1-35 (cf. §3.4), à cône plein ayant un diamètre moyen de 100  $\mu\text{m}$  dans cette configuration (Marchand et al., 2005). L'aspersion débute à 870 s par rapport au début de chaque essai. Le but est de déterminer l'influence de l'aspersion.

**Tableau A 12 Conditions des essais**

Essai	Pression (bar)	T <sub>gaz</sub> (K)	Aspersion Q <sub>asp</sub> = 10 g/s et T <sub>eau</sub> = 20 °C	Point de prélèvement
SEDI_1	1	293	Non	1
SEDI_2	1	293	Non	2
ASP_1	1	293	Oui	1
ASP_2	1	293	Oui	2

## Résultats

La Fig. A 19 présente l'évolution de la concentration numérique normalisée ( $N(t)/N(0)$ ) en fonction du temps pour les deux campagnes d'essais (SEDI et ASP).

L'influence du point de prélèvement est visible sur la Fig. A 19. En effet, avant l'aspersion (déclenchée à 870 s), le phénomène de sédimentation induit une diminution du nombre normalisé de particules en suspension au cours du temps. Le taux de sédimentation est plus important pour les mesures effectuées au point de prélèvement 1 (haut) par rapport au point de prélèvement 2 (bas). En effet, à ce point de prélèvement 2, les pertes par sédimentation des particules sont en partie compensées par l'apport lié à la sédimentation des particules qui s'opère en partie haute de l'enceinte appauvrissant ainsi la zone autour du prélèvement 1. Ceci est confirmé par la campagne d'essai SEDI pendant les 7000 s suivantes.

Le rôle de l'aspersion sur le rabattement des aérosols est mis en évidence dès le début de celle-ci (à 870 secondes) par un brusque changement de pente pour les courbe ASP et cela pendant les 1500 secondes suivantes. La cinétique de perte des aérosols est pilotée par l'aspersion et les écoulements associés. Notons que le temps nécessaire pour que 95 % des aérosols soient rabattus est au minimum de 3000 s pour un essai avec aspersion alors qu'il est de plus de 7000 s pour un essai sans aspersion. Au cours de l'aspersion, le rapport ( $N(t)/N(0)$ ) reste toujours supérieur en partie haute de l'enceinte par rapport à celui de la partie basse (2). En effet, en partie basse de l'enceinte (2), les particules sont rabattues par le spray alors qu'en partie haute (2), exempt de spray, elles sont transportées via les écoulements générés le spray.

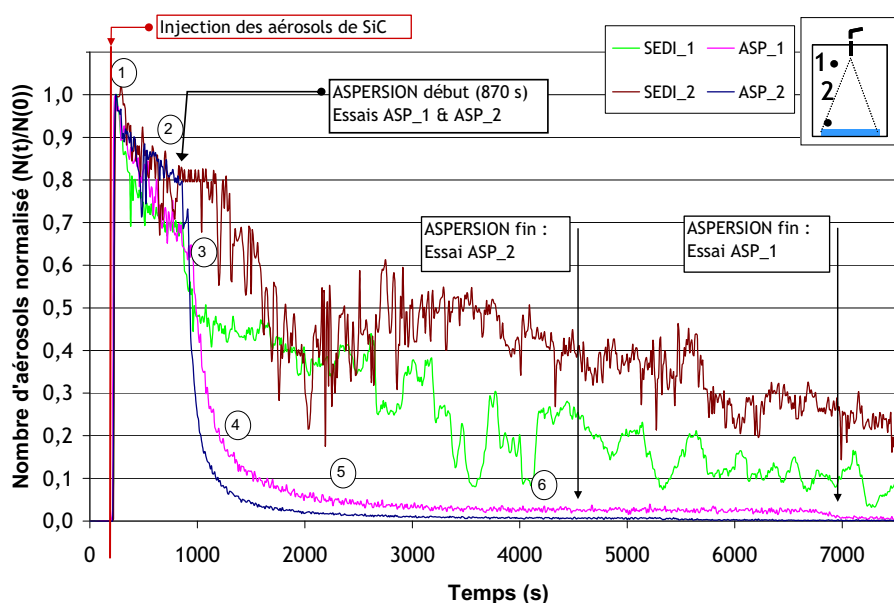
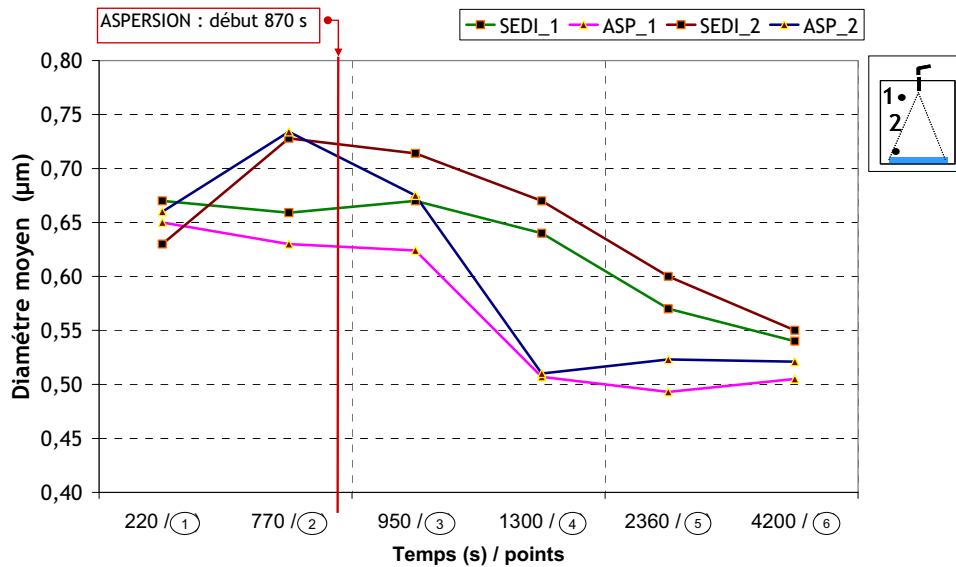


Fig. A 19 Evolution de la concentration numérique normalisée ( $N(t)/N(0)$ ) en fonction du temps

La Fig. A 20 présente l'évolution temporelle du diamètre moyen des aérosols de SiC au cours des deux campagnes d'essais SEDI et ASP, à différents temps caractéristiques notés de ① à ⑥ sur la Fig. A 19.



**Fig. A 20 Evolution temporelle du diamètre moyen des aérosols**

- ① Après l'injection d'aérosols, le diamètre moyen des aérosols en suspension est quasi identique (erreur < 5%) quelque soit l'essai réalisé. Ce qui montre la reproductibilité du diamètre moyen des aérosols injectés avec le PALAS.
- ② Avant l'aspersion, une augmentation du diamètre moyen des particules est observée pour les mesures effectuées au point de prélèvement 2, liée à l'apport de particules par sédimentation venant de la zone haute de l'enceinte comme nous l'avons vu précédemment. Ceci se traduit conjointement par une décroissance du diamètre moyen des aérosols en partie haute l'enceinte (point de prélèvement 1) : les aérosols les plus gros sédimentent en premier.
- ③ - ④ Au cours de l'aspersion, le diamètre moyen des aérosols diminue par rapport au diamètre initial mesuré en ①, et est inférieur aux diamètres moyens des essais SEDI\_1 et SEDI\_2. Ceci montre l'influence de l'aspersion sur la diminution du diamètre moyen des aérosols qui reste en suspension.
- ⑤ Comme il a été montré sur la Fig. A 19 qu'il n'y avait plus d'effet notable de l'aspersion en termes de  $(N(t)/N(0))$ , il n'y a plus d'effet de celle ci sur la granulométrie des particules en suspension. Le diamètre moyen des aérosols en suspension n'évolue plus pour aboutir à une constante  $d_{\text{aérosols\_ASP}} = \text{Cst}$  sur le temps de l'essai.
- ⑥ Il faut noter que  $d_{\text{aérosols\_ASP}} = d_{\text{aérosols\_SEDI}}$  donc l'aspersion n'a plus d'utilité à partir de ce point en terme de diamètre moyen.

En conclusion des ces premiers essais expérimentaux, il faut retenir, comme indiqué dans la littérature (cf. §1.3), que l'aspersion diminue le nombre d'aérosols en suspension dans l'enceinte ainsi que le diamètre moyen de ceux-ci. Il serait intéressant de modifier la granulométrie des gouttes à partir d'un temps après le point ⑤ afin de voir si il ne serait pas possible de diminuer le nombre de particules en suspension mais surtout de minimiser le diamètre moyen de celles qui restent en suspension. Signalons que les gouttes d'eau ne semblent pas perturber la mesure du diamètre des aérosols par le granulomètre WELAS à température ambiante.

Cette étude a montré la faisabilité de mesures de granulométrie des aérosols et de leur concentration en nombre au cours du temps, sous aspersion, en utilisant le granulomètre optique WELAS.



## ANNEXE 5. Principe de la mesure PDA

L'anémométrie phase Doppler (P.D.A.) est une technique non-intrusive permettant de mesurer simultanément la taille et la vitesse d'une particule sphérique individuelle traversant un volume de mesure. Cette technique est une extension de la vélocimétrie laser Doppler (Bachalo et Houser, 1984). Elle est basée sur l'analyse de la lumière diffusée par une particule. L'analyse de l'interférogramme généré par la particule passe par l'étude de l'interaction entre un rayon lumineux et une particule sphérique en termes de réflexion et de réfraction à l'intérieur de celle-ci (Fig. A 21).

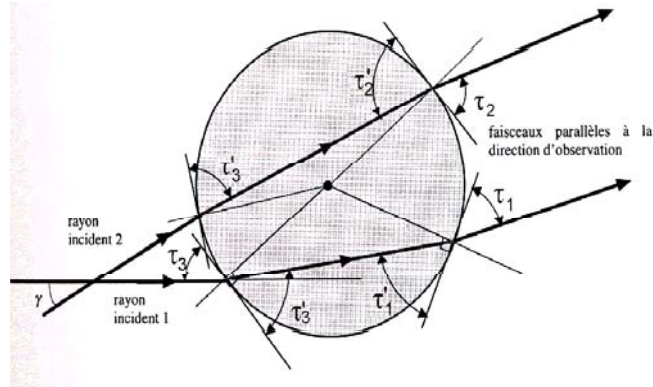


Fig. A 21 Trajets optiques des rayons dans la goutte

Basé sur les calculs de van de Hulst (1981), Bachalo (1984) proposa une solution originale à ce problème et établit ensuite les grands principes de la granulométrie phase Doppler.

Lorsqu'un faisceau laser de longueur d'onde  $\lambda$  intercepte une goutte sphérique d'indice relatif  $m$  et de diamètre  $d$ , un rayon réfléchi à la surface et un rayon réfracté se propageant à l'intérieur de la goutte sont simultanément produits (leurs intensités respectives sont calculées à l'aide des coefficients de Fresnel).

Afin de poursuivre l'exposé de la technique phase Doppler, il convient de rappeler la loi établie par Descartes dans le discours sur la méthode Eq. (5.5) et Eq. (5.6) :

$$\theta = 2(p\tau' - \tau) \quad \text{Eq. (5.5)}$$

$$\cos \tau = m \cos \tau' \quad \text{Eq. (5.6)}$$

Afin d'évaluer les caractéristiques géométriques des franges d'interférences observées à l'infini lorsque la particule est éclairée cette fois par deux faisceaux laser, il est nécessaire de déterminer la différence de chemin optique des rayons émergents. Ainsi, le décalage de phase  $\Phi_p$  du faisceau émergent d'ordre  $p$  peut être calculé par de simples considérations géométriques (Eq. (5.7)).

$$\Phi_p = \frac{2\pi d}{\lambda} (\sin \tau - pm \sin \tau') \quad \text{Eq. (5.7)}$$

Cette équation montre donc que l'analyse de l'interférogramme permet de fournir directement une information sur le diamètre de la particule. L'interférogramme est naturellement obtenu à l'infini lorsqu'un montage P.D.A. classique à deux faisceaux est utilisé (Fig. A 22). Quand la particule traverse le volume de mesure, elle est éclairée par deux rayons laser sous deux incidences différentes.

Ayant préalablement placé les photomultiplicateurs suivant une direction d'observation fixée, seuls les rayons parallèles à cette direction et qui proviennent de la goutte sont perçus. Ainsi, en développant l'Eq. (5.7), il est aisé de calculer la différence de phase  $\Phi_{12}$  qui existe entre deux rayons qui émergent de la goutte (Eq. (5.8)) et qui interfèrent à l'infini.

$$\Phi_{12} = \frac{2\pi d}{\lambda} \left[ (\sin \tau_1 - \sin \tau_2) - pm (\sin \tau'_1 - \sin \tau'_2) \right] \quad \text{Eq. (5.8)}$$

Où les indices utilisés se réfèrent aux faisceaux 1 et 2 (Fig. A 21).

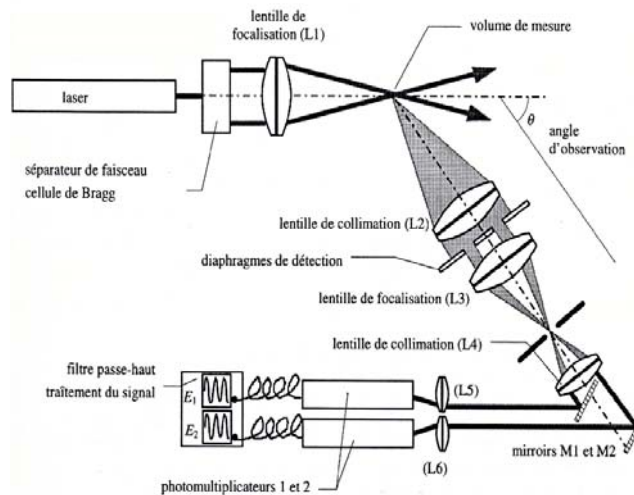


Fig. A 22 Schéma du montage phase Doppler

Puisque tous les angles  $\tau$  et  $\tau'$  sont figés à partir du moment où la direction d'observation est choisie, la différence de phase n'est fonction que du diamètre de la particule dans le volume de mesure.

Bachalo et Houser (1984) ont donc initialement mis au point un anémomètre phase Doppler. A partir d'un montage de LDV classique, ils modifièrent l'organe de réception en plaçant une paire de détecteurs photosensibles situés à des angles connus par rapport au faisceau laser et surtout séparés par une distance fixe mesurée avec précision (Fig. A 22). L'anémomètre phase Doppler mesure très précisément le temps qui sépare le changement de signe de sortie filtrée  $E_1$  et  $E_2$  des deux signaux (Eq. (5.9) et (Fig. A 23)).

$$\Phi_{12} = \frac{\tau_{12}}{\tau_D} 2\pi \quad \text{Eq. (5.9)}$$

Où  $\tau_d$  représente la période moyenne des signaux Doppler.

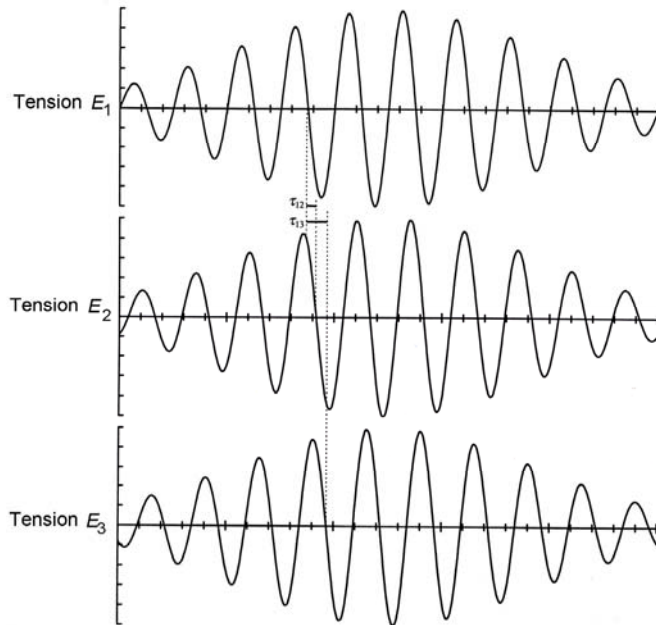


Fig. A 23 Signaux Doppler collectés par les différents photodétecteurs

Comme une phase est toujours définie à  $2\pi$  près, un troisième détecteur est utilisé afin de résoudre aussi l'ambiguïté sur la phase (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

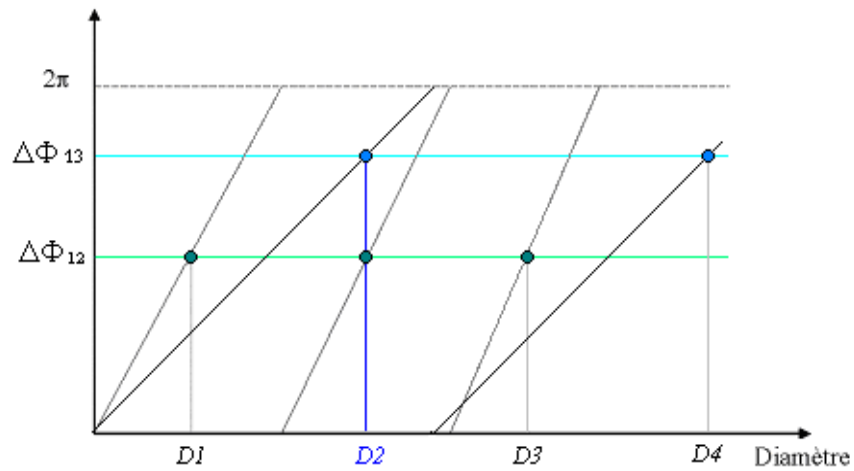


Fig. A 24 Différence de phase en fonction du diamètre des gouttes

Cette technique permet donc à partir de la mesure de deux différences de phases de remonter au diamètre absolu des gouttes.

## ANNEXE 6. Calcul de l'efficacité de collecte élémentaire

Afin de déterminer l'efficacité élémentaire de collecte pour chaque classe d'aérosol et d'obtenir le rabattement des aérosols, la méthode choisie utilise les distributions expérimentales issues du granulomètre optique WELAS. Comme ces distributions en taille des aérosols sont de type log-normales, une courbe théorique log-normale est substituée à celle expérimentale pour effectuer l'approximation dans ce calcul. De plus, la perte de masse localement est supposée être seulement due à la collecte des aérosols par les gouttes et le transfert avec le gaz environnant. Les gouttes sont supposées être monodispersées.

Considérons désormais pour cette étude un volume de gaz de  $V_{\text{essai}} = 10^{-6} \text{ m}^3$ .

Soit  $V_{WELAS} \Big|_i^{i+\Delta t}$  en  $[M^3]$  le volume absorbé par le granulomètre WELAS pendant l'acquisition de la mesure (généralement pris égale à 5 s).

Soit  $d_g$  le diamètre des gouttes monodispersées et  $N_{b_{\text{gouttes}}}$  leur nombre dans le volume  $V_{\text{essai}}$  de  $1 \text{ cm}^3$  et déduit des mesures effectuées à l'aide de la technique PDA.

**Les étapes du calcul des efficacités élémentaires de collecte sont les suivantes :**

1. Interpolation des distributions granulométriques des aérosols par des distributions log-normale théorique

Masse collectée dans le volume balayé par les gouttes :

2. Variation du nombre d'aérosol dans la classe  $i$  par unité de seconde moyenné sur une période  $\Delta t$  (s), collecté dans le volume absorbé par le WELAS, pour  $n$  gouttes :

$$\left. \frac{dn'_i(t)}{dt} \right|_{V_{WELAS}} = \frac{n(t) - n(t + \Delta t)}{\Delta t} \Big|_{V_{WELAS}} \quad \text{n/s}$$

3. La masse d'un aérosol  $i$  est calculée en le supposant sphérique :

$$m_{i_{\text{unitaire}}} = \frac{4}{3} \pi r_i^3 \rho_{\text{aérosol}}$$

4. Variation par unité de temps de la masse d'aérosols dans la classe  $i$  collectée dans le volume absorbé par le WELAS  $v$  moyenné sur 150 s :

$$\left. \frac{dm'_i(t)}{dt} \right|_{V_{WELAS}} = \frac{dn'_i(t)}{dt} \Big|_{V_{WELAS}} \times m_{i_{\text{unitaire}}} \quad \text{kg/s}$$

5. Variation par unité de temps de la masse d'aérosol dans la classe  $i$  collectée dans le volume absorbé par le WELAS  $V_{WELAS}$  moyenné sur 150 s, et rapporté au volume considéré  $V_{\text{essai}}$  :

$$\frac{dm_i(t)}{dt} = \frac{dm'_i(t)}{dt} \frac{V_{WELAS}}{V_{\text{essai}}} \quad \text{kg/s}$$

Masse d'aérosols dans le volume balayé par les gouttes :

6. Concentration d'aérosol dans le volume balayé par les gouttes :

$$[Aérosols]_{\text{balayé\_par\_les\_gouttes}}(t) = \frac{n(t)}{V_{WELAS}}$$

7. Masse total d'aérosols dans le volume balayé par les gouttes (supposé cylindrique) en 1 s :

$$m_{\text{a\_dans\_le\_volume\_balayé}} = [Aérosols]_{\text{balayé\_par\_les\_gouttes}}(t) \times \int_0^{t=1s} V_{\text{balayé\_par\_les\_gouttes}} \times m_{i\text{unitaire}}$$

8. Calcul de l'efficacité élémentaire de collecte des aérosols

$$E = \frac{\int_0^{t=1s} \frac{dm_i(t)}{dt}}{m_{\text{a\_dans\_le\_volume\_balayé}}}$$

## ANNEXE 7. Les produits de fission (PF)

La fission est la cassure d'un noyau lourd fissile (uranium 235, plutonium 239) par un neutron. Cette cassure provoque la libération d'énergie et la formation de fragments plus légers appelés **Produits de Fission** ou PF. Ceux-ci peuvent être stables ou radioactifs (Cordfunke et Konings, 1993).

Dans un réacteur nucléaire, les produits de fission se forment dans les pastilles de combustible placées à l'intérieur de gaines métalliques étanches. Ils sont donc en situation normale confinés à l'intérieur de ces gaines.

Dans le cas d'un accident grave, les gaines perdent leur étanchéité (Duco, 1984). Les produits de fission se répandent alors dans le circuit primaire (2<sup>ème</sup> barrière) (Powers et al., 1994), puis dans l'enceinte de confinement (3<sup>ème</sup> barrière) (Femandjian, 1984). Enfin, une partie d'entre eux peut se relâcher dans l'environnement par les fuites de l'enceinte de confinement (Femandjian et al., 1987).

Afin d'éviter un tel accident de rejet et limiter les conséquences de ceux qui se produiraient, il convient :

- de mieux connaître les mécanismes de fusion du cœur et la vitesse avec laquelle cette fusion se propage à tout le cœur,
- d'évaluer au mieux les quantités et les formes physico-chimiques des radioéléments susceptibles d'être relâchés dans l'atmosphère,
- de rechercher des solutions techniques permettant, si possible de réduire les rejets.

### Principaux produits de fission présents dans un REP de 900 MWe

La radioactivité des produits de fission est exprimée en exaBecquerel (EBq).

1 EBq =  $10^{18}$  Bq = 1 milliard de milliards de Bq

1 Bq = 1 désintégration par seconde

- gaz rares (xénon, krypton)	30	EBq
- iode	30	EBq
- tellure	24	EBq
- césium	0,1	EBq
- strontium	25	EBq
- zirconium-niobium	22	EBq
- ruthénium-rhodium	85	EBq
- terres rares	85	EBq

Il faut y ajouter les actinides et les transuraniens (plutonium, neptunium, américium) qui se forment à partir de la capture de neutrons par les atomes d'uranium. Leur radioactivité est de 80 EBq.

Pour chaque produit de fission, la quantité susceptible d'être libérée varie en fonction de la gravité de l'accident –*état de l'étanchéité des gaines, température atteinte*– et de sa volatilité. Cette dernière dépend de la forme chimique sous laquelle se combine le produit de fission dans le combustible et donc des conditions physico-chimiques ambiantes (milieu oxydant ou réducteur).

La nocivité d'un becquerel rejeté dans l'environnement varie selon :

- la période physique du radionucléide, temps au bout duquel son activité diminue de moitié. Par exemple, l'iode 131 voit son activité diminuer de moitié en 8 jours, le césium 137 en 30 ans ;
- le nature et l'énergie d'un rayonnement émis (alpha, bêta ou gamma) ;
- le comportement du radionucléide dans l'environnement, c'est-à-dire sa capacité plus ou moins grande à atteindre les populations environnantes depuis son point de relâchement dans l'atmosphère
- le comportement du radionucléide chez l'homme (métabolisme), qui conditionne sa distribution et sa rétention dans l'organisme ainsi que son élimination.

### **Caractéristiques des principaux produits de fission**

En situation accidentelle, à court et à moyen termes, les éléments les plus dangereux pour l'homme et l'environnement sont l'iode (Girault et al., 2006) et le césium (Dubourg et al., 2005) présents en grandes quantités dans un cœur de réacteur, ils sont très volatils et facilement assimilables par les organismes vivants.

- L'iode

Malgré sa courte période radioactive (sauf pour l'iode 129), l'iode présente un risque radiologique important à court terme. Il atteint l'homme par inhalation directe et par ingestion, et va se fixer dans la thyroïde.

Ceci peut conduire à restreindre temporairement la consommation de certains aliments (dont le lait frais) et à éviter l'exposition de certaines personnes plus sensibles, comme les enfants.

La chimie de l'iode est très complexe. Les isotopes de l'iode sont émis du combustible sous la forme de vapeur métallique puis, dans le circuit, ils réagissent vers 1000 °C avec l'argent (composant des barres de commande) pour former de l'iodure d'argent. A plus basse température, l'iodure se dissocie et l'iode peut réagir avec le césium, formant ainsi un iodure de césium. En cas de fusion partielle du cœur d'un réacteur, la plupart des composés émis sous forme d'aérosols se déposeraient sur les surfaces et parois des composants du circuit primaire et de l'enceinte. Ils réagiraient aussi avec les peintures (produisant de l'iode organique) et avec l'eau du puisard du réacteur (pouvant former dans certaines circonstances de l'iode gazeux).

- Le césium

En cas de rejet accidentel, le césium peut avoir un impact important à long terme en raison de sa longue période radioactive (30 ans pour le césium 137). S'il se dépose sur des sols très peu argileux ou riches en matière organique, il se transfère facilement dans les écosystèmes et la chaîne alimentaire. Ceci peut conduire à interdire la consommation de certains produits tels que le lait frais, les champignons ou les légumes verts.

Le césium 137 peut entraîner deux types d'irradiation des personnes :

- une irradiation externe lorsqu'il est présent dans l'environnement (atmosphère, sol...),
- une irradiation interne, s'il est inhalé (avec l'air) ou ingéré par l'intermédiaire d'aliments ou d'eau

Chez l'homme, le césium se distribue de façon homogène dans l'ensemble des tissus organiques, en particulier dans les muscles.

- Le ruthénium et le rhodium

Ces radionucléides sont en général peu volatils (Mun, 2007). Ils peuvent, eux aussi, être relâchés sous forme d'aérosols, mais en quantités beaucoup plus faibles que l'iode 131 et le césium 137.

- Les gaz rares

En situation accidentelle grave, les gaz rares (krypton, xénon...) –éléments chimiquement et biologiquement inertes– sont relâchés en totalité et se dispersent rapidement dans l'air. Leur impact sur l'homme et l'environnement est peu important, sauf si leur « panache » se déplace près du sol. Dans ce cas, le passage du nuage peut entraîner une irradiation externe momentanée des populations proches.

- Les terres rares et le baryum

Les terres rares et les différents isotopes du baryum sont peu volatils. Par ailleurs, comme ils ne sont pas très radiotoxiques, leur impact radiologique serait mineur.

- Les actinides

Les actinides ( $Z \geq 89$ ), parmi lesquels se trouvent les transuraniens (neptunium, plutonium, américium, curium) se forment à partir de l'isotope 238 de l'uranium par capture de neutrons, l'élément le plus radioactif étant de loin le neptunium (contribution de 85 %) dans les heures qui suivent l'arrêt d'urgence.