

ADEME



Ifremer

Laboratoire Génie alimentaire – centre de Nantes

Rue de l'Île d'Yeu BP21105

44311 Nantes cedex 03

Responsable des travaux : M. BARON Régis (tél. 02.40.37.42.21)

Date de publication : 30/03/2006



Responsable ADEME : Madame SANQUER Odile

Rapport final

Contrat n°02 75 032 (Réf. IFREMER 02/5210945/F)

Date du contrat : 22/11/2002 durée : 36 mois

Optimisation d'un nouveau procédé de fumage du poisson par précipitation électrostatique des particules de fumée

Optimisation of a new fish smoking process
by electrostatic precipitation of smoke particles

Etude coordonnée par :

- le Département Sciences et Techniques Alimentaires Marines de l'IFREMER de Nantes

Avec le partenariat

- de l'UMR CNRS GEPEA composée des :
 - Département Génie des Procédés Alimentaires de l'ENITIAA (Responsable ENITIAA : M. HAVET Michel)
 - et Département Environnement et Systèmes Energétiques de l'EMN (Responsable EMN : M. SOLLIEC Camille)
- du CETIM de Nantes (Responsable : M. PIERRAT Daniel)
- de l'UMR LEA de l'Université de Poitiers (Responsable LEA: M. TOUCHARD Gérard)

Genie des Procédés
Environnement
Agroalimentaire



Ecole des Mines de
Nantes



Optimisation d'un nouveau procédé de fumage du poisson par précipitation électrostatique des particules de fumée

Cette étude porte sur l'optimisation d'un nouveau procédé de fumage en continu par précipitation électrostatique des particules de fumée.

Le principe est de faire circuler la fumée, produite par pyrolyse de bois, entre deux électrodes. Sous des conditions électriques spécifiques, un flux ionique entre les électrodes est généré. Les particules, qui circulent portées par le flux gazeux, captent les ions et se chargent. Une force de collecte supplémentaire aux forces traditionnelles d'écoulement des particules, produit de la charge par le champ électrique, permet alors de favoriser le dépôt des particules sur la surface du poisson à fumer.

Ce procédé breveté (brevet IFREMER/CIRAD n°92/08 958), et qui permet de diviser par plus de 10 le temps de fumage, présente toutefois des inconvénients (gouttage rapide après moins de 2 heures de fonctionnement, aromatisation faible par rapport à la coloration...). Ce travail, coordonné par l'IFREMER et mené conjointement par l'IFREMER, l'UMR GEPEA, le CETIM et l'UMR LEA, est axé, tout d'abord sur la formalisation et la compréhension des phénomènes mis en jeu.

A partir de travaux de modélisation et de simulation, validé par une campagne expérimentale spécifique, des améliorations, par rapport au procédé initial, ont été proposées et étudiées afin de pallier aux inconvénients préalablement observés.

Des avancées considérables dans le domaine de la précipitation électrostatique de particules de fumée, tant sur le plan de la modélisation des phénomènes, de leurs simulations, que des axes d'optimisation du procédé sont donc présentées dans cette étude. Le potentiel industriel et technique du fumage par précipitation électrostatique des particules de fumée a ainsi été clairement augmenté.

Le gouttage ne constitue plus le principal handicap de ce principe, et ainsi le temps de fonctionnement avant nettoyage, de même que la productivité ont été significativement améliorés. Simultanément, les caractéristiques sensorielles des produits ainsi fumés se sont significativement rapprochés des produits fumés traditionnellement, considéré comme des produits de référence, tout en préservant la faible consommation énergétique du procédé et la diminution drastique du nombre de particules rejetées dans l'atmosphère.

Rapport confidentiel (Confidentialité ordinaire)

Mots clés : fumage, précipitation électrostatique, modélisation, simulation, amélioration

Résumé : Cette étude porte sur l'optimisation d'un nouveau procédé de fumage en continu par précipitation électrostatique des particules de fumée. Le principe est de faire circuler la fumée, produite par pyrolyse de bois, entre deux électrodes. Sous des conditions électriques spécifiques, un flux ionique entre les électrodes est généré. Les particules, qui circulent portées par le flux gazeux, captent les ions et se chargent. Une force de collecte supplémentaire aux forces traditionnelles d'écoulement des particules, produit de la charge par le champ électrique, permet alors de favoriser le dépôt des particules sur la surface du poisson à fumer. Ce procédé breveté (brevet IFREMER/CIRAD n°92/08 958) présente toutefois des inconvénients. Ce travail est axé, tout d'abord sur la formalisation et la compréhension des phénomènes mis en jeu, ce qui a fait surtout l'objet du travail des deux premières années. Des améliorations, par rapport au procédé initial, sont étudiées afin de pallier aux inconvénients préalablement observés. Ce rapport final provisoire est donc centré sur l'analyse et la discussion des résultats associés aux modifications ainsi apportés à des équipements antérieurs à cette étude, ce qui a fait l'objet principal du travail de la troisième année de ce projet.

Des avancées considérables dans le domaine de la précipitation électrostatique de particules de fumée, tant sur le plan de la modélisation des phénomènes, de leurs simulations, que des axes d'optimisation du procédé sont présentées dans cette étude. Le potentiel industriel et technique du fumage par précipitation électrostatique des particules de fumée a ainsi été clairement augmenté. Le temps de fonctionnement avant nettoyage, la productivité ont été significativement améliorés. Simultanément, les caractéristiques sensorielles des produits ainsi fumés se sont significativement rapprochés des produits fumés traditionnellement, considéré ici comme des produits de référence, tout en préservant la faible consommation énergétique du procédé et la diminution drastique du nombre de particules rejetées dans l'atmosphère

Table des matières

Nomenclature	p. 3
1/ Introduction et Rappels	p. 4
1-1/ Objectifs du programme	p. 7
1-2/ Rappel du programme des travaux	p. 7
1-3/ Rappel des enjeux du programme	p. 9
2/ Présentation des outils, méthodes et matériels de l'étude	p. 12
2-1/ Le logiciel CFX 4.4	p. 12
2-2/ La modélisation des écoulements	p. 16
2-3/ La modélisation des dépôts des particules et de l'adsorption des composés	p. 18
2-4/ L'analyse granulométrique	p. 19
2-5/ L'analyse des composés volatils par chromatographie en phase gazeuse	p. 19
2-6/ L'analyse de la qualité sensorielle et microbiologique des produits	p. 21
2-7/ L'analyse de l'écoulement des particules par Imagerie des Particules (PIV)	p. 22
3/ Caractérisation de la fumée	p. 24
3-1/ Caractérisation physique	p. 24
3-2/ Caractérisation chimique	p. 28
4/ Caractérisation du produit avec le procédé électrostatique initial et comparaison avec les autres procédés	p. 28
4-1/ La caractérisation biochimique	p. 28
4-2/ La caractérisation sensorielle et microbiologique	p. 29
5/ Le modèle proposé	p. 30
5-1/ L'approche ASM	p. 31
5-2/ L'écoulement du mélange	p. 32
5-3/ L'écoulement de la phase particulaire	p. 33
5-4/ Les équations d'évolution de la charge	p. 33
5-5/ L'équation de Poisson pour le calcul du champ électrostatique	p. 34
5-6/ Les conditions aux limites	p. 34
6/ Les campagnes de visualisation de l'écoulement des particules sur maquettes spécifiques	p. 35
6-1/ La première campagne	p. 35
6-2/ La seconde campagne	p. 37
7/ Le codage et la résolution du modèle sous CFX	p. 47
7-1/ Description de l'approche et des tests réalisés	p. 47
7-2/ Les principaux éléments du codage	p. 60
7-3/ La validation à partir des résultats des publications de Choi et Fletcher	p. 63
7-4/ Les résultats de simulation pour une géométrie équivalente à la seconde maquette	p. 70
8/ La comparaison avec la seconde campagne PIV	p. 71
9/ Propositions pour la réalisation d'un démonstrateur optimisé	p. 75
9-1/ Les idées innovantes	p. 75
9-2/ Les premiers essais et les premiers résultats sur maquettes de laboratoire	p. 77
10/ Bilan des actions des deux premières années et conclusions provisoires	p. 85
11/ Résultats numériques complémentaires	p. 88
12/ Description des modifications apportées aux pilotes IFREMER	p. 90
13/ Description des modifications apportées aux fumoirs de la société CHANCERELLE	p. 95
14/ Résultats sur le plan microbiologique	p. 95
15/ Résultats sur le plan sensorielle	p.106
16/ Résultats physiques et biochimiques	p.118
17/ Bilan des actions de la dernière année	p.119
18/ Conclusions	p.120
19/ Avis de la société CHANCERELLE	p.122

Nomenclature

b_{ion}	$[m^2.V^{-1}.s^{-1}]$	Mobilité ionique
D_{ion}	$[m^2.s^{-1}]$	Coefficient de diffusion ionique
Γ_p	$[m^2.s^{-1}]$	Coefficient de diffusion particulaire
σ_p		Nombre de Prandlt
d_p	$[m]$	Diamètre moyen de la p ^{ème} classe de particules
E	$[V.m^{-1}]$	Champ électrique
f_{Di}	$[N]$	Force de traînée
N_p	$[m^{-3}]$	Nombre de particules appartenant à la p ^{ème} classe par unité de volume
P	$[Pa]$	Pression
q_p	$[C]$	Charge électrique de la p ^{ème} classe de particules
q_p^{max}	$[C]$	Charge électrique maximale de la p ^{ème} classe de particules
U_m	$[m.s^{-1}]$	Vecteur vitesse du mélange (fluide porteur + particules)
U_c	$[m.s^{-1}]$	Vecteur vitesse de la phase porteuse
U_p	$[m.s^{-1}]$	Vecteur vitesse de la p ^{ème} classe de particules
\tilde{U}_p	$[m.s^{-1}]$	Vecteur vitesse de la p ^{ème} classe de particules par rapport au fluide porteur
\hat{U}_p	$[m.s^{-1}]$	Vecteur vitesse de la p ^{ème} classe de particules par rapport au mélange
Φ	$[V]$	Potentiel électrique
ϵ_0	$[F.m^{-1}]$	Permittivité de l'air dans le vide
ϵ_r		Permittivité relative de la fumée
μ_c	$[kg.m^{-1}.s^{-1}]$	Viscosité dynamique du fluide porteur
μ_p	$[kg.m^{-1}.s^{-1}]$	Viscosité dynamique correspondant à la p ^{ème} classe de particules
μ_{eff}	$[kg.m^{-1}.s^{-1}]$	Viscosité dynamique effective
μ_t	$[kg.m^{-1}.s^{-1}]$	Viscosité dynamique turbulente
ρ_c	$[kg.m^{-3}]$	Masse volumique du fluide porteur
ρ_p	$[kg.m^{-3}]$	Masse volumique de la particule
ρ_m	$[kg.m^{-3}]$	Masse volumique du mélange (fluide porteur + particules)
ρ_{ion}	$[C.m^{-3}]$	Densité volumique de charge d'espace
r_c		Fraction volumique du fluide porteur
r_p		Fraction volumique correspondant à la p ^{ème} classe de particules
τ_p	$[s]$	Temps de relaxation de la particule
τ_f	$[s]$	Temps de relaxation du fluide porteur
Re_p		Nombre de Reynolds particulaire

1/ Introduction et rappels

Le procédé de fumage des aliments constitue l'une des plus anciennes méthodes connues de conservation des produits carnés. Plus qu'un moyen de conservation, le fumage est surtout utilisé aujourd'hui à des fins organoleptiques (couleur, goût, odeur), tout du moins dans les pays industrialisés.

L'industrie du fumage des produits alimentaires en France peut être grossièrement estimée à 75 000 tonnes par an. Concernant l'industrie de fumaison des produits de la mer, le saumon (~ 21 000 t) et le hareng (~5 000 t) forment l'essentiel de la production française (~30 000 t) (Données FAO 2002). La France est le leader mondial pour la production de saumon fumé, avec une progression toujours croissante (+ 9 % en 2002, + 15% depuis 1999). L'industrie de la conserve de poisson (~ 120 000 t en France) s'intéresse également de plus en plus à la conserve de produit fumé comme le démontre l'application de la société Chancerelle décrite dans la sous-section suivante. Cet intérêt récent a été suscité par le développement de notre nouveau procédé de fumage électrostatique qui peut être compatible avec les exigences de production en conserverie. La production mondiale annuelle de produits alimentaires fumés se situe approximativement à 1 500 000 tonnes, et la part des produits de la pêche et de l'aquaculture fumés représentent environ 690 000 tonnes (Données FAO 2002). Ces chiffres illustrent parfaitement l'importance du fumage dans l'industrie alimentaire, et le facteur innovation reste donc un élément primordial pour le développement ou la pérennisation de ce secteur.

La recherche des gains de productivité, dans le respect de la qualité organoleptique et hygiénique des produits, est une préoccupation majeure de ce secteur. Aussi, depuis quelques années, le centre IFREMER de Nantes développe un nouveau procédé de fumage du poisson. Les recherches ont conduit au dépôt d'un brevet alliant deux processus, la Déshydratation Imprégnation par Immersion (ou par Douchage) qui sale et sèche simultanément le produit par un échange osmotique avec une saumure contenant du sel et du sucre à haut poids moléculaire, et le fumage électrostatique qui diminue considérablement la durée de fumage : le temps de fumage est environ 15 fois moindre que pour un fumage traditionnel (figure 1).

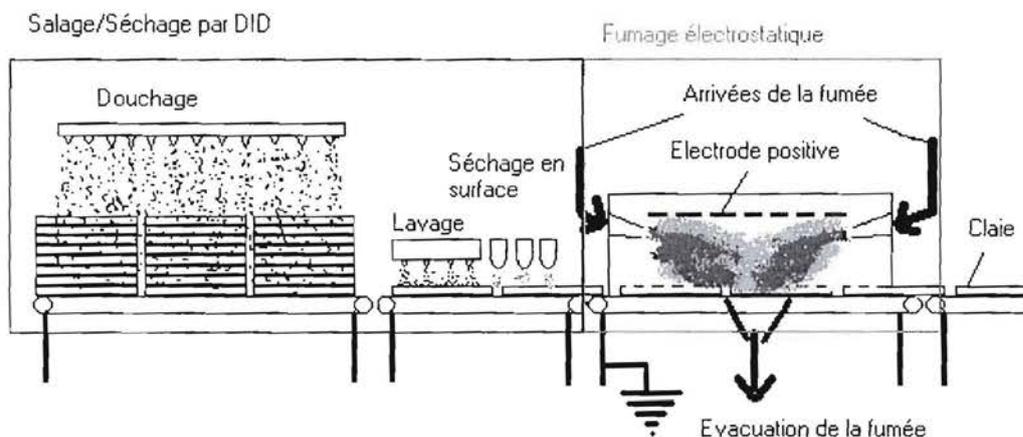


Figure 1 : Schéma du procédé de fumage continu brevet IFREMER - CIRAD

- Description du procédé initial de fumage électrostatique et son application par la société Chancerelle

Le fumage est réalisé à l'aide d'un fumoir électrostatique dans lequel le produit à traiter circule sur un convoyeur relié à la masse (figure 2). Une grille reliée au potentiel positif est disposée une dizaine de centimètres au-dessus du produit. La fumée, produite par un générateur de fumée par friction, circule entre les deux électrodes qui permettent d'ioniser l'air, se charge et subit, en plus des forces aérodynamiques, la force de Coulomb. Elle se dirige alors préférentiellement vers la masse et se dépose rapidement sur le produit. Ainsi, le temps de fumage n'est plus que de quelques minutes (contre plusieurs heures pour le procédé de fumage traditionnel). Cette réduction du temps de traitement permet d'accroître la productivité et de réduire les coûts de production.

Le fumoir électrostatique de la société Chancerelle s'intègre dans une ligne continue de fumage de sardines et de harengs en boîtes. On réalise ainsi une économie de surface au sol et de main-d'œuvre. Le suivi des produits est également plus facile et la réduction du nombre de manipulations limite, a priori, les risques de contaminations.

La fumée est injectée en continu aux deux extrémités du tunnel et est aspirée au centre par une bouche d'extraction. Le produit, relié à la masse, circule dans le tunnel à vitesse constante (~ 3 cm/s). Le produit circule pendant 3 minutes sous les électrodes. Cette vitesse de défilement permet un fumage léger des sardines en boîtes et assure une cadence d'environ 10 000 boîtes par heure. Le dimensionnement de l'installation est déterminé en fonction de la cadence des systèmes de jutage et de sertissage. Le procédé de fumage est donc particulièrement compact puisqu'il correspond à un encombrement de 3 m sur 1 m environ. Une différence de potentiel de 40 kV est imposée entre les deux électrodes.

- Intérêts du procédé

C'est la comparaison entre la méthode traditionnelle de fumage répandue dans l'industrie et le procédé de fumage électrostatique qui met en évidence les intérêts de ce procédé innovant.

En comparaison aux autres techniques de fumage, ce procédé est d'une part très **économe en énergie**. En effet, le produit étant fumé en moins d'un quart d'heure (pour les applications traditionnelles de fumage de saumons ou de harengs) voire même en trois minutes pour les applications en conserverie, il n'a pas le temps de s'échauffer, il passe généralement d'une température proche d'une dizaine de degré Celsius (température d'entrée dans le tunnel) à une température légèrement inférieure à 16-17°C. Dans les procédés classiques de fumage dit « à froid » c'est-à-dire à une température proche de la température ambiante (cas du saumon et du hareng en général), il est nécessaire de refroidir continuellement l'enceinte de fumage pour éviter que la fumée introduite à 60°C ne réchauffe les produits.

De plus, l'effet électrostatique améliore grandement la collecte des particules de fumée sur le produit. Ainsi, ce procédé est **propre** puisque les rejets de fumée dans l'atmosphère sont très faibles. Il en résulte que, comparé aux autres techniques de fumage, le procédé électrostatique permet un **gain de temps** considérable, le rendant ainsi compatible en dimension avec une **production en continu**. Cette caractéristique **minimise les manipulations d'opérateurs** et rend probablement ainsi le processus beaucoup plus **hygiénique**.

Le développement de cette nouvelle technique de fumage constitue un axe de recherche prometteur. Les recherches menées à l'IFREMER ont abouti à la réalisation d'un pilote de fumage électrostatique semi-industriel. L'optimisation de son fonctionnement est le résultat de

nombreuses études expérimentales concernant l'influence de divers paramètres (bois utilisé pour produire la fumée, forme des électrodes, débit et angle d'injection de la fumée...) sur l'homogénéité du fumage par exemple, mais aussi sur la qualité du produit fini. Aujourd'hui, trois installations industrielles ont été réalisées suivant ce procédé, dont la société Chancerelle qui fabrique des filets de sardines et de harengs fumés en conserve. Cette dernière application est la seule qui fonctionne en production actuellement.

- Etude bibliographique (cf. rapport d'avancement)
 - Etat de la propriété industrielle au plan national et international
 - Brevet Ifremer/Cirad n° 92/08 958 – 1992 (*), COLLIGNAN A, KNOCKAERT C, RAOULT-WACK A-L, VALLET J-L Procédé et dispositif de salage, séchage et de fumage à froid de produits alimentaires carnés. (*) *Extension internationale n° 93/4300096 - 1^{er}.07.1993*
 - Brevet Ifremer n° 97/11.615 – (15.09.1997), GUILLE DES BUTTES J., KNOCKAERT C, VALLET J.-L. Bloc de matériaux pour la génération de fumée par friction dans les installations de produits alimentaires carnés et son procédé de fabrication
 - Brevet Ifremer n° 97/081777 – (26.06.1997), KNOCKAERT C, BARDIN J-C, DESPORTES G, VALLET J.-L. Perfectionnement aux dispositifs de fumage électrostatique pour produits alimentaires carnés.
- Risques techniques et économiques du programme

Le transfert de l'unité pilote à l'unité de production industrielle a mis en évidence quelques difficultés techniques. Ces difficultés mettent en péril la commercialisation de ce nouveau procédé. Sur les trois installations industrielles vendues, seule l'application de la société Chancerelle fonctionne encore actuellement en production. Ce constat confirme l'importance de ces difficultés techniques sur le développement futur de ce procédé. Pour cette raison, la société Arbor a choisi d'arrêter la commercialisation de ce type d'équipement.

L'objectif premier de ce programme est donc de lever ce blocage technique en menant une démarche particulièrement structurée pour optimiser ce procédé. Les difficultés rencontrées sont les suivantes :

- après quelques heures d'utilisation, on observe un encrassement de l'électrode de décharge et des parois du tunnel pouvant entraîner des gouttes sur les produits en cours de traitement. Ceci nécessite un arrêt de la production pour nettoyer les électrodes et les parois. Il s'agit actuellement du principal frein à une exploitation intensive de ce procédé,
- le procédé apparaît moins aromatisant, pour une coloration proche, que les procédés de fumage traditionnel,
- en comparaison au procédé traditionnel, le traitement apparaît moins homogène (certains produits sont moins fumés que d'autres),
- la fiabilité industrielle de l'installation est à améliorer car l'équipement proposé actuellement n'est pas encore suffisamment abouti industriellement (géométrie, nature des matériaux ...).

Notons que la société Chancerelle exploite toujours ce procédé, ce qui démontre bien que, malgré les difficultés préalablement citées, le risque économique pour les industriels utilisateurs du procédé et pour certains types d'applications spécifiques reste mesuré.

1-1 / Objectifs du programme d'étude

Ce programme vise à mieux comprendre, modéliser et simuler les phénomènes mis en jeu afin d'aboutir à une optimisation du procédé de fumage électrostatique pour un fonctionnement industriel.

Nous souhaitons, lors des deux premières années du programme, obtenir un outil de simulation du procédé qui conduira à la conception d'une installation de fumage électrostatique en continu. La validation, à petite expérimentale puis dans un contexte industriel, des éléments nouveaux (ou d'une partie pour les essais chez Chancerelle) liés à la conception de cette installation constituera l'objectif final de ce programme.

1-2 / Rappel du programme initial des travaux

Le travail consistera en différentes étapes que nous avons décidé de scinder en neuf actions.

La démarche proposée consiste à étudier la résolution numérique de différents modèles afin de pouvoir les simuler, de les caler et de les valider sur des données expérimentales issues d'un équipement conçu spécifiquement dans cet objectif. Puis à partir de l'outil de simulation obtenu, nous chercherons à optimiser la géométrie et les paramètres de fonctionnement d'un nouveau prototype qui servira de base pour une validation à petite échelle industrielle. Ces neuf actions sont détaillées ci-dessous :

- Action 1 – Choix du modèle, adaptation logicielle /

Le couplage entre les équations de Maxwell et de Navier et Stokes se traduit, sous certaines hypothèses simplificatrices, par un terme source supplémentaire dans ces dernières (One-way coupling). La difficulté réside dans le calcul de ce terme qui prend en compte les effets électrostatiques. Le premier objectif est de déterminer un modèle qui prenne en compte ces phénomènes physiques couplés. Il s'agira ensuite d'implanter dans un code de calcul numérique dédié à la résolution des équations de Navier-Stokes une procédure de résolution rapide des équations de Maxwell et de tester cette procédure sur une géométrie simple de type canal plan. Ce travail sera réalisé par l'UMR GEPEA (Département Génie des Procédés Alimentaires ENITIAA) en collaboration avec le CETIM, le tout coordonné par l'IFREMER.

- Action 2 – Caractérisation de la fumée, expérimentations/

En parallèle à ce travail numérique, il conviendra de déterminer les caractéristiques physiques de la fumée (répartition granulométrique de la phase particulaire) afin d'aider au choix du modèle. Cette caractérisation sera effectuée à l'ENITIAA (UMR GEPEA) en mesurant la répartition granulométrique des particules de fumées pour permettre de travailler sur un granulomètre en voie sèche.

Il s'agira également de concevoir un banc expérimental permettant de mesurer les vitesses et les concentrations de particules de fumée par la technique de Vélocimétrie par Image de Particules (PIV). Une maquette transparente devra être construite pour s'adapter à nos objectifs. Cette maquette consistera en une géométrie simple afin de bien appréhender les phénomènes physiques mis en jeu. Ces expérimentations seront effectuées au sein du Département Systèmes Energétiques et Environnement de l'Ecole des Mines de Nantes (UMR GEPEA) à partir d'une fumée obtenue par un générateur à friction.

En parallèle, l'IFREMER effectuera des expérimentations sur l'ancien pilote de fumage électrostatique, sur des procédés traditionnels, et sur la maquette transparente pour mieux caractériser la fumée produite et déposée et son impact sur les produits obtenus, et obtenir des grandeurs objectives de comparaison entre procédés.

- Action 3 – Discussion du modèle /

L'étape suivante consistera à établir le lien entre la cartographie 2D des champs de vitesse des particules obtenues expérimentalement et les résultats de simulation numérique. L'objectif est de valider le modèle à partir des données expérimentales obtenues sur la géométrie simplifiée dans des conditions nominales de fonctionnement (différence de potentielle et vitesse d'injection de fumée fixées). Ce travail s'effectuera avec l'expertise de l'UMR LEA et les différents partenaires.

- Action 4 – Validation, enrichissement /

Cette action clôturera les démarches numériques et aboutira à l'obtention d'un modèle validé sur une géométrie simplifiée. Une attention particulière sera apportée au traitement des conditions aux limites électriques. Le premier cas test sera la comparaison avec les résultats de la littérature en précipitation électrostatique. Nous chercherons à évaluer l'ancien tunnel de fumage pilote de l'IFREMER.

- Action 5 – Optimisation /

L'ensemble des informations obtenues lors des actions précédentes sera exploité pour mener à bien une phase d'optimisation numérique du procédé de fumage en testant différentes géométries et différentes conditions de fonctionnement compatibles avec un objectif de production industrielle.

- Action 6 –Prototype /

Un prototype, permettant d'évaluer l'impact industriel des modifications proposés par rapport au pilote initial, sera élaboré et mis en œuvre.

- Action 7 – Campagne expérimentale sur prototype /

Ce prototype servira de base à une campagne de caractérisation globale. La qualité des produits sera analysée à l'IFREMER, tant sur le biochimique, sensorielle que microbiologique, et comparée à celle obtenue par le procédé classique. De même, une campagne chez un industriel permettra d'affiner les résultats dans un contexte industriel.

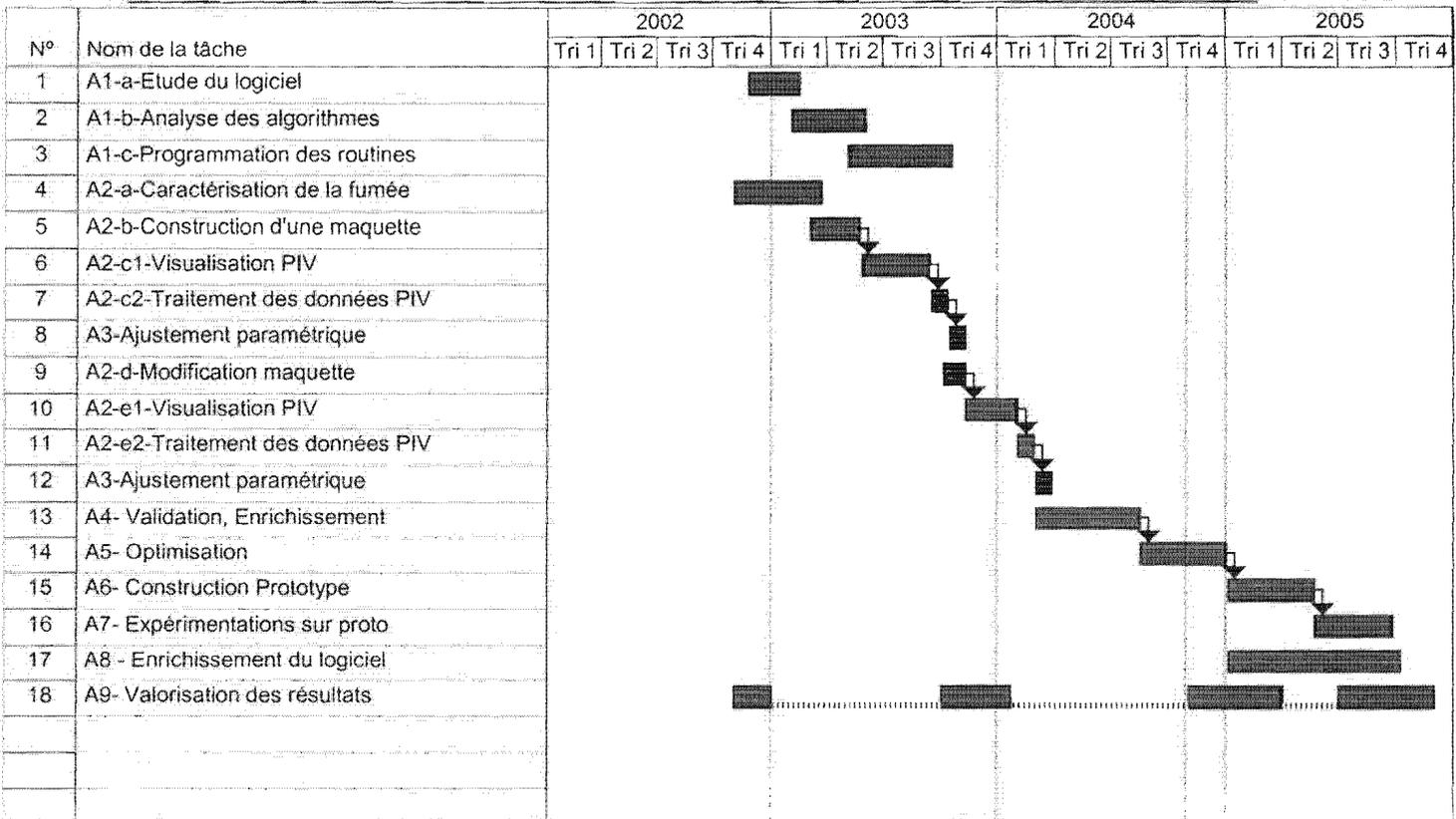
- Action 8 – Finition de l'outil logiciel /

L'outil logiciel adapté à notre étude sera enrichi et affiné afin de fournir une bibliothèque spécifique au fumage électrostatique. Ce travail pourra probablement être ensuite étendu au cas général de la précipitation électrostatique (électrofiltres, traitements d'aérosols).

- Action 9 – Valorisation des résultats /

Deux axes de valorisation seront menés. Le premier concerne la valorisation industrielle de ce travail. L'objectif étant alors de déboucher sur la définition d'un prototype adapté aux exigences industrielles. Nous souhaitons également que ce travail bénéficie à un plus grand nombre de secteurs industriels concernés par la précipitation électrostatique (dépollution atmosphérique, dépôts de peinture par exemple). Le deuxième axe concerne la valorisation scientifique des résultats que nous souhaitons la plus large possible.

CALENDRIER PREVISIONNEL D'EXECUTION DES PHASES DU PROGRAMME



Nous pouvons ainsi schématiser le rôle des différents partenaires dans ce programme de recherche:

- **IFREMER** : Coordination scientifique, technique et administrative, réalisation expérimentale, analyses de laboratoire
- **GEPEA** :
 - **ENITIAA** : Coordination scientifique, modélisation, simulation,
 - **EMN** : visualisation des écoulements,
- **CETIM** : Modélisation, codage et résolution numérique,
- **LEA** : Expertise des phénomènes électrostatiques.

1-3/ Rappel des enjeux du programme

- Caractère innovant du programme :

L'approche que nous proposons pour optimiser ce nouveau procédé de fabrication est innovante. En effet, aucune formalisation des phénomènes mis en jeu dans le cadre du fumage électrostatique n'est disponible à ce jour. Les moyens instrumentaux pour étudier ces phénomènes (tels que la PIV par exemple) seront développés pour la première fois sur ce type d'application. De plus, les codes de calcul ne disposent pas à ce jour de bibliothèques adaptées à notre problème bien que les besoins des différents utilisateurs de ces logiciels tendent vers l'utilisation de ce type de bibliothèque. Ce type d'approche pour optimiser un procédé s'inscrit parfaitement dans les nouvelles tendances des sciences du Génie des Procédés.

- Conséquences attendues (au plan scientifique, technique ou industriel).

Sur le plan technique et industriel, les résultats attendus devraient conduire à définir le cahier des charges précis permettant la fabrication d'installations futures performantes et propres, et de lever les freins techniques actuels. Des informations utiles seront également obtenues pour optimiser au mieux l'installation industrielle existante. Les conséquences scientifiques

attendues portent sur le renforcement des compétences en analyse et formalisation de phénomènes couplés complexes, en simulation numérique et en optimisation de procédés dans le domaine du fumage et pouvant s'étendre au domaine du Génie des Procédés.

- **Positionnement par rapport aux procédés existants :**

Nous prenons comme base de comparaison à notre procédé, les fumoirs industriels enceintes climatisées à fumée pulsée et à générateurs indépendants qui correspondent à la grande majorité des fumoirs industriels.

- Rendement,

Le temps de fabrication est divisé par au moins 15 par rapport au procédé traditionnel, ce qui permet soit de diminuer considérablement le volume des installations pour une même productivité journalière, soit d'augmenter la production d'une journée si l'on conserve des installations d'encombrement identique.

En terme d'efficacité du dépôt de fumée, on peut raisonner à partir d'un bilan simplifié en déterminant le rapport entre la quantité de fumée déposée (entrée – sortie) sur la quantité entrante. Dans ce cas, ce rapport est d'environ 20% pour le fumage traditionnel et d'environ 95 % pour le fumage électrostatique. Les rejets atmosphériques sont ainsi considérablement réduits.

- Enjeux énergétiques,

La consommation énergétique d'un procédé de fumage se résume à la consommation électrique et la consommation du bois lors de sa pyrolyse pour la génération de la fumée. Il existe plusieurs techniques pour la génération de la fumée, mais il convient de noter que ces générateurs de fumée sont indépendants du fumoir. La part énergétique de ces générateurs dans le bilan global du fumage est faible (entre 10 et 30 % suivant le type de fumée pour le fumage traditionnel).

En fumage traditionnel, une turbine assure la circulation de fumée dans l'enceinte et génère un fort brassage pour garantir une vitesse minimale de fumée autour des produits. Il faut ajouter à ces turbines une installation permettant de maintenir une ambiance contrôlée en température et hygrométrie dans l'enceinte. Cette installation est la plupart du temps constituée d'une résistance chauffante et d'un groupe frigorifique.

La consommation électrique du fumoir est par contre beaucoup plus faible dans le cas du fumage électrostatique puisqu'elle se limite à la gestion des flux entrants de fumée (ventilateurs centrifuges) et de produits (tapis de convoyage), et à la génération Haute Tension.

Dans le cadre du fumage électrostatique, le produit circulant seulement une dizaine de minutes dans le tunnel, aucun contrôle d'ambiance n'est nécessaire (pas de réchauffement des produits). Ceci permet d'éviter l'utilisation d'un système de refroidissement à la fois consommateur d'énergie et entraînant des effets néfastes sur l'environnement. Le matériel consommant de l'énergie électrique se limite donc aux turbines de poussage et de soutirage de la fumée et au tapis de convoyage des produits à fumer. La consommation électrique liée à la génération des hautes tensions est négligeable puisque la puissance moyenne consommée est de l'ordre de 20 Watts (en effet, le courant engendré est de l'ordre de quelques dixièmes de milliampère).

Le tableau 1 résume les aspects énergétiques et confirme que le fumage électrostatique est 3 fois plus économe que le procédé traditionnel. Ces valeurs correspondent à la plus petite installation industrielle existante. A titre indicatif, les installations des industriels français leaders correspondent à des débits de production 36 fois plus importants.

Technique de fumage	Débit de produits	Consommation électrique liée au conditionnement (température, hygrométrie)	Puissance totale (cas du fumage à froid)
Traditionnelle	Batch : 375 kg en 3 h	17,5 kWh	20 kWh (= 53 Wh/kg)
Electrostatique	Continu : 125 kg/h Soit pour 3 h: 375 kg	0	7 kWh pour 3h (= 18 Wh/kg)

Tableau 1 : comparaison énergétique selon la technique de fumage

- Enjeux environnementaux,

Comme nous l'avons évoqué ci-dessus, les rejets atmosphériques sont particulièrement minimisés par la technologie du fumage électrostatique (rejets 40 fois moins nombreux qu'en fumage traditionnel). La phase particulaire de la fumée se dépose essentiellement sur le produit à traiter et seulement un très faible pourcentage est rejeté dans l'atmosphère. Ceci constitue une avancée environnementale considérable en comparaison du procédé de fumage traditionnel puisque la phase particulaire de la fumée est réputée la plus néfaste pour la santé (notamment les particules fines de 0,1 à 2,5 µm de diamètre aérodynamique moyen, typiques de la fumée de bois).

En ce qui concerne les contributions directes ou indirectes à l'effet de serre, elles sont nulles car le fumage électrostatique ne nécessite pas d'installation frigorifique.

Les rejets néfastes induits par le nouveau procédé de fumage proviennent essentiellement des produits de nettoyage de l'installation. La fréquence de nettoyage des unités industrielles actuellement équipées en fumage électrostatique est beaucoup plus importante qu'en fumage traditionnel. Il est donc essentiel de réduire cette fréquence en proposant des installations moins sensibles aux problèmes d'encrassement.

- **Marchés potentiels** nationaux et internationaux du produit/procédé faisant l'objet du programme du projet :

Le marché des produits fumés est en constante évolution et de nouveaux produits apparaissent de jour en jour. En France, le tonnage des produits alimentaires fumés peut être estimé à 75 000 t par an dont 30 000 t de poissons fumés. La progression pour les produits de la mer fumés devrait se poursuivre lors de ces prochaines années car de nombreux produits de la mer fumés se démocratisent. Le procédé de fumage électrostatique devrait trouver sa place dans ce marché avec notamment pour cible privilégiée les produits de la mer fumés de milieu de gamme ou les premiers prix (c'est-à-dire ceux correspondant aux tonnages les plus importants), avec une attention particulière pour le fumage (en conserve ou non) des petits pélagiques (sardines, maquereaux, harengs...).

Rappelons toutefois qu'il est indispensable pour cela de lever les difficultés rencontrées. En effet, la quasi-totalité des industriels français du fumage des produits de la mer a eu l'occasion, ces dernières années, de tester notre équipement et ont démontré un vif intérêt pour le potentiel de cet équipement mais ils ont clairement indiqué qu'il était indispensable de gommer les difficultés actuelles pour qu'ils puissent envisager d'incorporer cette technologie dans leur production.

- Autres enjeux : sécurité, qualité, compétitivité...

Pour ce type d'installation, la sécurité du personnel est identique à celle des autres installations de fumage existantes, lorsque les précautions électriques ont été prises à la conception. L'enjeu « sécurité alimentaire » est également un enjeu important dans l'industrie alimentaire. Ce nouveau procédé minimise les manipulations du produit et donc les risques de contaminations bactériennes exogènes. L'impact sur la santé pour une consommation répétée d'un produit fumé par technique électrostatique est actuellement difficile à déterminer, mais aucun indice biochimique ne laisse suspecter le moindre problème. L'impact sur la « qualité organoleptique » a été testé par des jurys de consommateurs. Les résultats obtenus par ces jurys nous sont apparus comme plutôt satisfaisants car situant les produits fumés par précipitation électrostatique dans la gamme des produits du commerce. Une attention particulière autour de cet aspect organoleptique restera l'un des axes de recherche de cette étude.

2 / Présentation des outils, méthodes et matériels de l'étude

2-1 / Le logiciel CFX 4.4

Le logiciel utilisé dans cette étude est CFX 4.4. Il s'agit d'un des codes de calcul en dynamique des fluides (appelés CFD : Computational Fluid Dynamics) les plus utilisés avec Fluent, StarCD ou Phoenix. Ce logiciel utilise la méthode des volumes finis, développée par S.V. Patankar, pour résoudre les équations de Navier-Stokes. Il peut également résoudre des équations de transfert de chaleur, des cinétiques de réaction ou des problèmes de radiation. Le principe de la méthode des volumes finis est de discrétiser le domaine en volumes de contrôle, puis d'effectuer des bilans sur chaque volume. D'autres codes de calcul utilisent la méthode des différences finies ou des éléments finis. La version de CFX utilisée n'est pas la plus récente, mais elle s'est avérée la plus adaptée à notre problème. En effet, le maillage de CFX4 est un maillage structuré, avec lequel on peut réaliser un maillage plus ou moins fin dans notre domaine. Si CFX4 est déjà « ancien », il est réputé pour sa fiabilité. Enfin, le code de CFX4 est « ouvert », nous verrons par la suite que nous pouvons implémenter le code source de routines utilisateur en fonction du problème étudié.

Le logiciel est constitué de plusieurs applications : CFX Build (pour dessiner la géométrie du domaine, puis construire le maillage), CFX Solve (le solveur qui résout les équations) et CFX Post (pour visualiser les résultats).

CFX Build

Le fonctionnement de CFX Build est semblable à celui des logiciels de CAO/DAO. Il permet de réaliser notre domaine en trois dimensions en créant des points, des courbes, des surfaces ou des volumes.

Les frontières du domaine sur lesquelles nous souhaitons imposer des conditions aux limites sont appelées Patches. Une syntaxe particulière est requise : les noms des entrées de flux doivent commencer par INLET, les sorties par OUTLET, les surface de symétrie par SYMMET et les parois solides par WALL. Il est aussi possible de créer des parois poreuses par exemple. Il existe également des patches 3D, qui nous seront utiles pour les conditions aux électrodes du domaine.

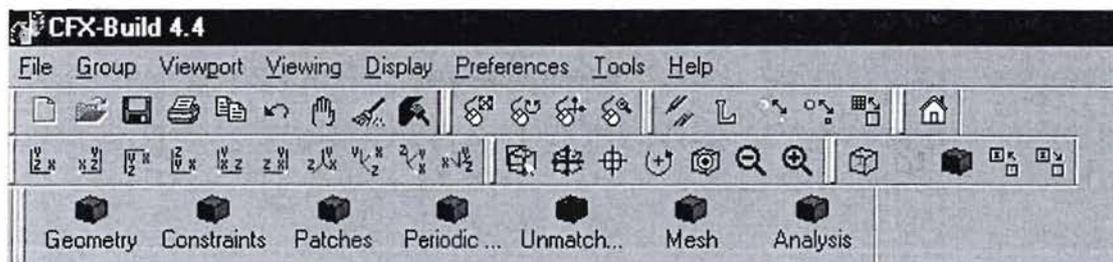


Figure 3 – Interface CFX Build 4.4

Le maillage s'effectue ensuite par le menu Mesh. Plusieurs méthodes de discrétisation sont possibles. Nous avons utilisé la commande Mesh Seed qui place des points plus ou moins espacés sur les courbes, puis la commande Mesh qui crée les volumes de contrôle. Ce processus est très important car il a une incidence directe sur la cohérence des résultats. Il faut bien connaître les phénomènes physiques mis en jeu, et également ne pas créer des volumes de contrôle trop déformés, ce qui pourrait engendrer une divergence du schéma numérique.

Pour finir, CFX Build va générer un fichier texte.geo que le solveur peut lire. Ce fichier contient la liste de tous les points, les noms et positions des frontières sur lesquelles on impose des conditions aux limites.

CFX Solve

Le lancement du solveur qui va effectuer la résolution se fait par l'intermédiaire d'une simple fenêtre de commande sous DOS. Auparavant, il faut indiquer au solveur dans un fichier de commande .fc les équations à résoudre, le nom des variables, les conditions aux limites, etc.

Une syntaxe particulière est requise dans ce fichier, les principales commandes étant :

- La commande ">>CFX4" réunit toutes les options de base permettant de résoudre le problème posé. Il s'agit en quelque sorte d'un en-tête de programme, puisqu'il réunit la déclaration des variables autres que les variables hydrodynamiques, la déclaration des routines utilisateurs externes et les options de base à savoir quelles équations vont être résolues.

- La commande ">>MODEL DATA" réunit les options concernant les caractéristiques physiques du fluide (viscosité, densité, coefficient de diffusion...). Elle permet aussi de définir le type de schéma numérique, si celui-ci est de type centré ou avancé, ou s'il faut tenir compte ou non dans une équation des termes convectifs. Il permet aussi dans le cas de phénomènes transitoires de configurer les équations temporelles.

- La commande ">>SOLVER DATA" permet de configurer le solveur. C'est sous cette rubrique que l'on fixe le nombre maximum ou minimum d'itérations. Le test de convergence et les facteurs de relaxation s'appliquant aux différentes variables y sont également fixés.

- La commande ">>MODEL BOUNDARY CONDITIONS" permet quant à elle de fixer la valeur des différentes variables aux frontières. Elle permet aussi de fixer des conditions de symétrie aux parois.

CFX4 présente la particularité de pouvoir fournir au solveur des routines utilisateur en Fortran, qui permettent d'ajouter des équations non incluses dans le code de calcul, de modifier les équations présentes (dans notre cas, prendre en compte les phénomènes électrostatiques), ou d'appliquer un traitement particulier aux conditions aux limites. Cette possibilité élargit le domaine de résolution de CFX, même si le code est déjà très riche (le modèle ASM y est présent).

Le solveur compile donc les routines utilisateur et édite les liens. Il crée un fichier résultats qui stocke les valeurs des variables aux nœuds du domaine.

CFX Post

Les résultats ont été visualisés avec la version 5.7 de CFX Post, plus évoluée que la version 4.4. Cette application permet de voir les valeurs de chaque variable: les résultats sont affichés sous forme de lignes de niveau qui délimitent des zones en couleur. Il est également possible de visualiser des champs de vecteurs, de lignes de courant, mais aussi d'entrer des solutions analytiques d'équations et de les comparer aux résultats visualisés.

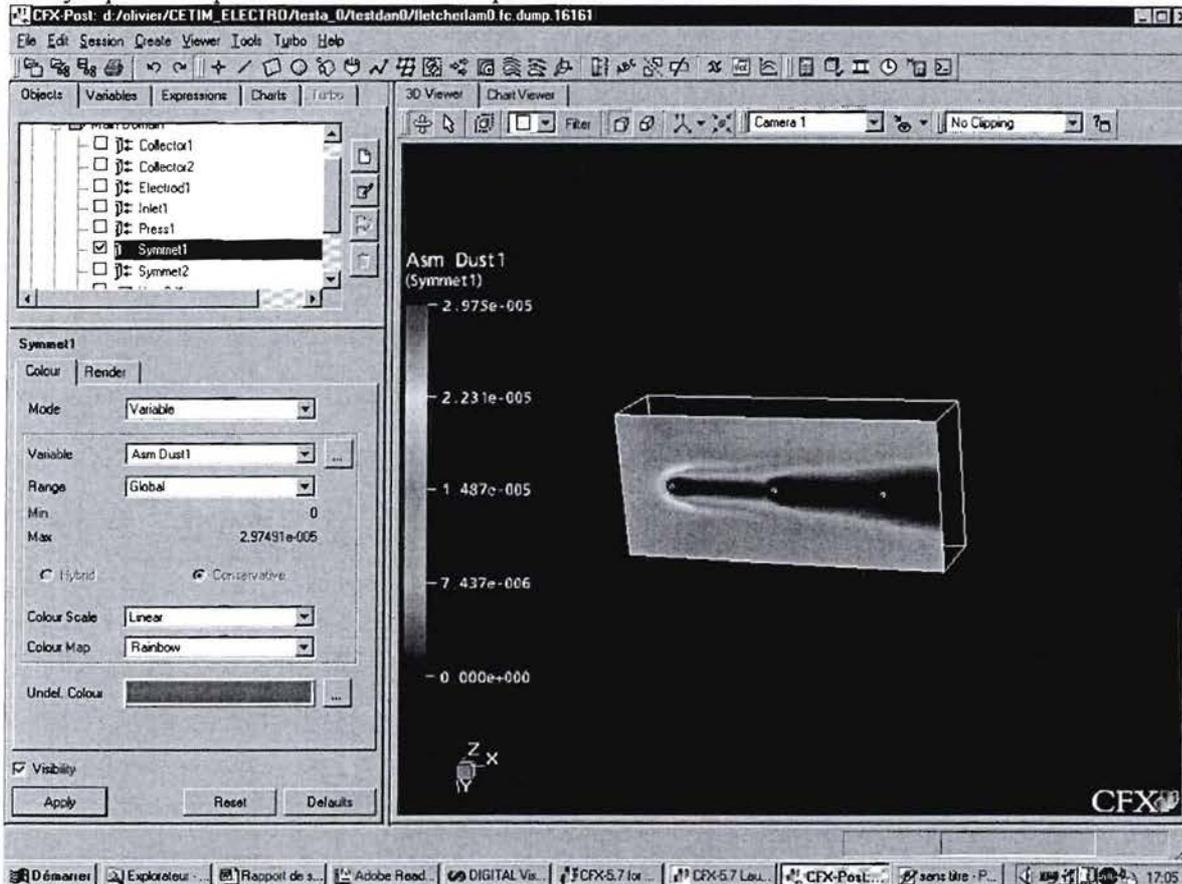


Figure 4 – Interface CFX Post 5.7

Résolution des équations

Après avoir discrétisé les équations, qui sont dans notre cas couplées et non linéaires, le solveur va résoudre le problème en utilisant une méthode itérative. A la fin de chaque itération, les champs calculés seront les champs solution si les critères de convergence fixés dans le fichier de commande sont vérifiés. Sinon, le processus démarre une nouvelle itération.

Il existe plusieurs solveurs linéaires disponibles dans CFX : AMG (Algebraic Multi-Grid, GENERAL AMG, LINE SOLVER, ICCG, STONE... Tous sont basés sur des procédés itératifs. La résolution du champ de pression se fait en utilisant un algorithme de couplage Vitesse-Pression nommé SIMPLE, développé par Patankar.

La méthode des volumes finis

C'est la méthode utilisée par CFX pour résoudre des équations aux dérivées partielles. La solution est déterminée seulement en un ensemble fini de points.

Le domaine étudié est divisé en un nombre fini de sous-domaines, les volumes de contrôles, puis il faut intégrer sur chaque volume l'équation à résoudre. Les dérivées au niveau des faces des volumes de contrôle sont approchées grâce à une méthode de différences finies.

On obtient alors un système linéaire qu'il est possible de résoudre par plusieurs méthodes, notamment grâce à la forme particulière de la matrice, qui est tri-diagonale en une dimension, penta-diagonale en 2 dimensions ou hepta-diagonale en 3 dimensions.

Une telle transformation d'une équation aux dérivées partielles en un système linéaire est appelée *discrétisation*.

Dans cette partie, nous allons expliciter la méthode des volumes finis pour la résolution d'une équation de transport scalaire sur une grille cartésienne. Les notations utilisées lors de la discrétisation sont décrites dans la suite. Nous devons la plupart de ces notations, très utilisées en volumes finis, à Patankar. Cette partie a été rédigée à partir de la documentation de CFX et de la thèse de S.E. Norris. Cette thèse comporte également un chapitre présentant tous les détails de la discrétisation d'une équation de transport scalaire sur une grille non cartésienne.

Nous divisons donc notre domaine en cellules indexées avec la notation « boussole », c'est-à-dire qu'une cellule notée P sera entourée, en deux dimensions, des cellules E (East) et W (West) selon l'axe x et des cellules N (North) et S (South). En trois dimensions, par les cellules T (Top) et B (Bottom). Des lettres minuscules symbolisent les frontières d'une cellule. Ces notations sont très utilisées dans les articles traitant des volumes finis (figure 5).

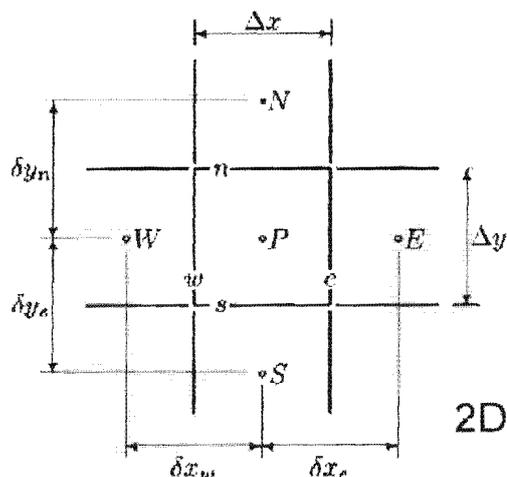


Figure 5 – Notations utilisées pour la discrétisation en cellules

Une équation de transport scalaire en régime stationnaire est donc de la forme :

$$\nabla \bullet (\rho \vec{u} \phi) - \nabla \bullet (\Gamma \nabla \phi) = S$$

avec Γ le coefficient de diffusion de ϕ , S le terme source, ρ la masse volumique du fluide et \vec{u} la vitesse du fluide qui transporte le scalaire ϕ .

En se plaçant en deux dimensions, on intègre cette équation sur une cellule P :

$$\int_{S_w}^{n_e} \int_{S_w}^{n_e} \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) dx dy + \int_{S_w}^{n_e} \int_{S_w}^{n_e} \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \phi) dx dy - \int_{S_w}^{n_e} \int_{S_w}^{n_e} \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dx dy - \int_{S_w}^{n_e} \int_{S_w}^{n_e} \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dx dy = \int_{S_w}^{n_e} S dx dy$$

Les approximations intégrales effectuées alors suivent des schémas de différences finies, le schéma adopté ici est dit « hybride », car selon la valeur d'un coefficient appelé le nombre de

Péclet ($Pe = \frac{U \Delta x}{\Gamma}$), ϕ est approximé aux frontières de la cellule soit par interpolations

linéaires ($\phi_e = \frac{\phi_E + \phi_P}{2}$), soit en donnant à ϕ_e la valeur ϕ_E ou ϕ_P (dans notre cas, la convection étant prédominante, le schéma hybride est préféré au schéma central par exemple) :

$$\int_w^e \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) dx \approx (\rho u)_e \frac{\phi_E + \phi_P}{2} - (\rho u)_w \frac{\phi_P + \phi_W}{2}$$

D'autre part, les flux diffusifs sont eux aussi évalués par un schéma de différence finie :

$$\int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dx = \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w \approx \Gamma_e \frac{\phi_E - \phi_P}{\delta x_e} - \Gamma_w \frac{\phi_P - \phi_W}{\delta x_w}$$

En intégrant le terme source, nous pouvons mettre le second membre sous la forme :

$$\int_{S_w}^{S_e} \int S dx dy = S_u + S_p \phi_p$$

Donc en écrivant les discrétisations des termes convectifs et diffusifs, il vient :

$$\begin{aligned} & (\rho u)_e \Delta y \frac{\phi_E + \phi_P}{2} - (\rho u)_w \Delta y \frac{\phi_W + \phi_P}{2} + (\rho v)_n \Delta x \frac{\phi_N + \phi_P}{2} - (\rho v)_s \Delta x \frac{\phi_P + \phi_S}{2} \\ & - \Gamma_e \Delta y \frac{\phi_E - \phi_P}{\delta x_e} + \Gamma_w \Delta y \frac{\phi_P - \phi_W}{\delta x_w} - \Gamma_n \Delta x \frac{\phi_N - \phi_P}{\delta x_n} + \Gamma_s \Delta x \frac{\phi_P - \phi_S}{\delta x_s} = S_u + S_p \phi_p \end{aligned}$$

Puis en factorisant, nous aboutissons à une expression du type :

$$a_p \phi_p + a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S = S_u + S_p \phi_p$$

En effectuant cette intégration sur toutes les cellules, un système linéaire de la forme suivante est obtenu :

$$[AM]\phi = c$$

où AM est une matrice penta-diagonale (ceci est dû au fait que nous sommes en deux dimensions).

Il est alors possible de résoudre ce système par méthodes itératives. En fonction des conditions du problème, d'autres schémas de différences finies peuvent être adoptés pour discrétiser les termes de convection (schéma Upwind, CDS, Power-Law, etc.). C'est sous cette forme que CFX code l'équation de continuité, avec la matrice AM et les termes sources SU et SP que nous allons modifier dans la routine USRSRC.

2-2 / La modélisation des écoulements

La fumée est un mélange diphasique constituée d'une phase gazeuse, dite phase porteuse, et d'une phase particulaire. Les deux phases ont leurs propres dynamiques mais interagissent l'une sur l'autre.

Dans le cas d'un écoulement non couplé à des forces électriques, les possibilités de modélisation des écoulements se situent sur la phase porteuse ou sur la phase particulaire associée à la phase porteuse selon les schémas décrits ci-dessous. Si la modélisation mathématique des écoulements de fluide à une phase homogène ne provoque aucune critique de fond, par contre la modélisation des écoulements multiphasiques reste un champ ouvert de recherche où chaque hypothèse sous-jacente à un modèle doit être analysée avec soin en fonction des applications envisagées.

La modélisation de la phase porteuse seule est décrite par les équations de Navier-Stokes selon une description eulérienne. Pour décrire les phénomènes instationnaires et/ou la turbulence, différentes approches existent (modèle sans turbulence, avec turbulence k-epsilon, approche instationnaire URANS, approche VLES ...). Deux catégories de solveurs existent pour résoudre les équations de la phase porteuse, soit des solveurs à résolution couplée (type Phoenix ou CFX 5.5) très rapide mais souvent peu accessibles car les algorithmes sont très protégés, soit des solveurs à résolution découplée (Adina, Cosmos, Fluent, Cfx 4.4, StarCD, Floworks).

Pour le couplage de la phase porteuse avec une phase particulaire, trois approches sont possibles.

La première approche correspond à une description Lagrangienne de la trajectoire des particules (= description Euler – Lagrange, Euler pour la phase porteuse et Lagrange pour la phase particulaire). Cette approche n'est réellement consistante que pour des particules de diamètre supérieur à 5 μm et pour une densité numéraire de particules très faible (on néglige alors les interactions entre particules par exemple). Cette approche reste toutefois l'une des plus traditionnelle, et elle est la plus utilisée actuellement pour décrire les dépoussiéreurs électrostatiques. Elle correspond à la somme des forces agissant sur les particules qui est alors égale au poids de la particule par son accélération. Cette approche est très adaptée aux grosses particules, ne nécessite pas d'hypothèse sur la mobilité particulaire, et permet surtout plus de facilité pour introduire de la physique, comme par exemple la modélisation des interactions avec les parois (choc élastique ou inélastique avec coefficient de restitution inférieur à 1) ou la prise en compte du terme de Basset, du gradient de pression, de la masse ajoutée...

Cette approche s'avère très limitée lorsque le nombre de particules à traiter devient important. La prise en compte de phénomènes couplés détériore généralement rapidement les performances du solveur. De plus, on constate souvent une assez forte sensibilité au maillage sur la solution. La modélisation de la turbulence agissant sur les particules est délicate. Les hypothèses liées à l'approche Lagrangienne ne sont plus respectées pour des fines particules.

Une seconde approche est possible pour des particules de faible diamètre et pour des densités particulaires importantes. Il s'agit d'une description Euler – Euler. Dans ce cas, la phase continue (phase porteuse) comme la phase dispersée (phase particulaire) sont toutes deux décrites par des modèles eulériens. Comme pour le modèle Lagrangien, le couplage des deux phases est modélisé par le terme de traînée. Différents phénomènes peuvent être pris en compte comme par exemple la masse virtuelle, les effets de lift, les effets de parois, les effets des particules sur la phase continue... En général, la turbulence est plus facilement prise en compte dans ce type d'approche que dans la précédente. Mais cette approche s'avère très gourmande en ressources CPU si les termes de couplage sont importants, si les grilles de discrétisation de calcul doivent être raffinées pour finir des résultats corrects, si l'écoulement est instationnaire et s'il est nécessaire de dissocier des classes de particules.

Enfin, une troisième approche, récente et très séduisante, existe pour le cas de particules de diamètre inférieur à 5 μm et pour une phase particulaire relativement diluée dans la phase porteuse. Il s'agit de l'approche ASM (Algebraic Slip Model). Si le temps de relaxation des particules est très petit et si la phase dispersée n'influence quasiment pas l'écoulement de la phase continue, alors il est possible de considérer l'écoulement, non plus de la phase porteuse, mais d'un mélange diphasique (l'association des deux phases). Dans ce cas, on ne considère plus qu'une seule équation de quantité de mouvement pour ce mélange (équation qui restera proche de l'équation de la phase porteuse puisque le milieu est très dilué), et l'on associe une ou plusieurs équations de transport pour les particules où l'on inclut dans le terme convectif la vitesse du mélange ainsi qu'une vitesse de glissement des particules par rapport à ce mélange. Cette vitesse de glissement est obtenue en supposant l'équilibre des forces appliquées sur les particules instantané.

2-3 / La modélisation de la collecte des composés sur le produit

Dans l'étude du dépôt des particules, l'adhésion sur une surface solide et leur agrégation mutuelle sont des facteurs d'importance majeure. L'étude des forces mises en jeu a été initiée dans les années 30. En 1956, Lifshitz a apporté une importante contribution à la théorie macroscopique des forces d'interaction à grande échelle entre des surfaces solides. Ces forces ne sont en général pas d'origine électrique. Au niveau microscopique, elles agissent entre les

molécules des surfaces en contact et sont de même type que les tensions superficielles. Les actions inter-molécules résident essentiellement en une attraction, appelée force de Van der Waals, et une répulsion, appréciable uniquement lorsque les molécules sont très proches. Deux molécules sont considérées comme en contact lorsque la force de répulsion n'est plus négligeable, soit à une distance d'un diamètre moléculaire.

Dans le cadre de la précipitation électrostatique, une force électrique d'attraction vient s'ajouter aux forces de Van der Waals. La force de Van der Waals peut être exprimée en fonction du coefficient de Hamaker A_{132} , caractéristique des interactions entre la particule, le gaz environnant et la paroi, de la taille de la particule et de la distance d'interaction. La force électrique d'attraction peut être exprimée en fonction du carré de la charge électrique de la particule, de la distance d'interaction, de la taille de la particule et de la capacitance du système particule-paroi ainsi formé. En fonctionnement classique, cette force régit l'adhésion pour des particules de taille supérieure à 0,1 μm . Enfin, le champ électrique appliqué exerce toujours sur la particule chargée une force de collecte suivant la loi de Coulomb. Cette contribution est toutefois, à proximité immédiate de la surface du produit à fumer, nettement inférieure à la force électrique d'adhésion.

La théorie d'adhésion et de rebond est difficilement applicable dans la réalité. En effet, il est supposé que les particules soient parfaitement sphériques et que l'adhésion se produise sur une surface parfaitement lisse. En réalité, après l'initiation du dépôt, les interactions mettent en jeu les particules incidentes et les particules préalablement déposées. Les relations mettant en jeu une paroi lisse ne sont donc plus valables. Cependant, la force d'adhésion électrique étant très importante devant les autres phénomènes, on pourra supposer l'adhésion totale de toutes les particules heurtant la paroi. D'autres hypothèses pour décrire le dépôt peuvent également être envisagées comme par exemple considérer un terme de dépôt sur la surface proportionnel à la concentration en particules ou/et à la charge de ses particules à proximité immédiate de la surface à traiter.

Les particules chargées, guidées par le champ électrique de précipitation, se dirigent vers les produits disposés sur les plaques collectrices et heurtent ceux-ci (ou adhèrent à la surface du produit). L'équilibre entre l'énergie cinétique avant le choc, les pertes d'énergie lors du choc et les énergies d'adhésion va déterminer la capture ou le rebond de la particule. Si la particule reste collée à la surface du produit (ou sur les plaques collectrices), elle risque de se décharger électriquement, suivant la nature isolante ou conductrice de la matière la constituant. Si elle se décharge, la particule n'est plus retenue que par la force de Van der Waals et elle peut, sous l'effet des structures turbulentes pariétales, être ré-entraînée. Les conditions de température et d'humidité modifient la constante diélectrique et la résistivité des particules qui influencent la vitesse de décharge des particules collectées. Certaines molécules de la phase gazeuse peuvent également être adsorbées par la surface du produit. L'équilibre thermodynamique qui régit la répartition des composés dans les phases gazeuses et particulaires est complexe et dépend des conditions de température, de pression, de concentration dans les différentes phases, de l'humidité... Ce dernier point est donc également très délicat à formaliser, mais nous ferons l'hypothèse dans ce travail que les conditions de température, pression et d'hygrométrie restent relativement constantes et nous ne chercherons donc pas à formaliser les phénomènes associés. Nous nous contenterons d'observer la nature des dépôts réalisés pour cerner l'influence des conditions électriques sur ce critère. La formalisation de ces phénomènes pourra faire l'objet de travaux postérieurs à cette étude.

2-4 / L'analyse granulométrique

Lorsqu'une particule est éclairée par un faisceau lumineux, elle réémet de la lumière dans toutes les directions de l'espace : c'est le phénomène de diffusion dont les trois composantes sont la réfraction, la réflexion et la diffraction. La lumière peut être également partiellement absorbée par la particule. Pour étudier la distribution des particules de fumée, on se propose d'utiliser un granulomètre laser. Cette méthode est basée sur la diffraction qui se produit chaque fois qu'un objet (ici la particule) fait obstacle à la propagation de la lumière incidente. La grande quantité d'échantillons analysés lui assure une excellente reproductibilité. De plus, il s'agit d'une technique respectueuse de l'échantillon et de son milieu environnant puisque la mesure peut être faite dans l'eau ou tout autre liquide (voie humide) ou dans l'air (voie sèche). La quantité de lumière déviée et l'importance de l'angle de déviation permettent de mesurer avec précision la taille des particules. Ainsi, les particules de grosse taille dévient des quantités importantes de lumière sur des angles faibles par rapport à l'axe de propagation et les petites particules au contraire dévient des quantités infimes de lumière mais sur des angles beaucoup plus larges.

La gamme de diamètres mesurables s'étend de 0,05 à 900 microns. Les intensités perçues aux différents angles par des photodiodes en silicium sont numérisées puis analysées. Le résultat du calcul est représenté sous forme d'histogramme et caractérisé le plus souvent par un diamètre médian, un diamètre moyen et un coefficient de variation. L'analyse est faite simultanément sur l'ensemble des particules circulant devant le faisceau laser.

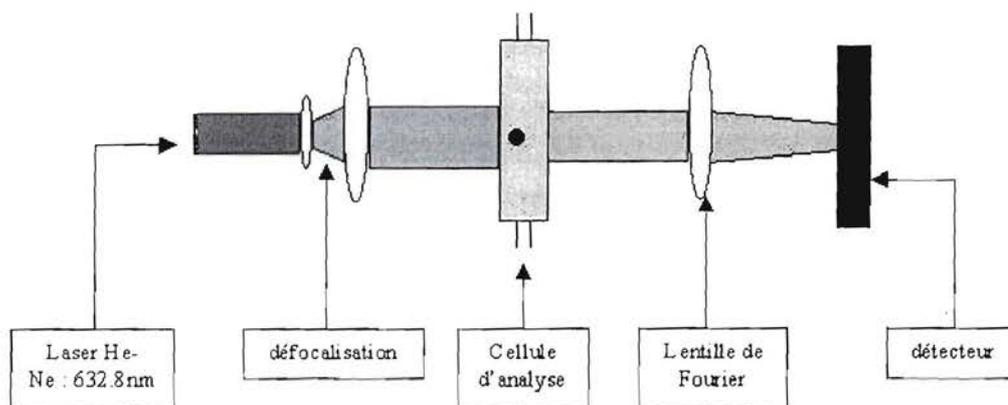


Figure 6 – schéma de principe du granulomètre

L'appareil utilisé est de la marque Malvern Instruments modèle Mastersizer S. Il permet en voie sèche (suspension de particules dans l'air) d'obtenir la distribution granulométrique de particules de taille comprise entre 0,5 et 900 microns.

2-5 / L'analyse des composés volatils

Actuellement, plus de 500 composés volatils de la fumée ont été identifiés dans la littérature. Le tableau suivant présente les différentes familles de composés et leurs effets supposés sur les produits fumés.

	Famille des phénols	Famille des alcools	Famille des acides organiques	Composés carbonylés	Hydrocarbures Polycycliques Aromatiques
Antioxydant	Très important	-	-	-	-
Flaveur Odeur	Important	-	-	Important (composés à chaînes courtes)	-
Couleur	Faible	-	-	Essentiel	-
Désinfection Préservation	Bactéricide Bactériostatique	Faible	Par légère augmentation d'acidité	-	-
Observations	-	Porteur des autres composés volatils	-	-	Cancérogènes

Tableau 2: Rôle des composés chimiques (Knockaert, 1990).

Le dépôt de la fumée sur le poisson est influencé par de nombreux paramètres dont les principaux sont :

- l'humidité du produit (trop sec : peu de dépôt, trop humide : dépôt élevé mais risque d'acidité).
- l'humidité du fumoir
- la durée d'exposition.

Nous avons choisi de mener une étude spécifique sur les composés de la fumée car la plupart des études de la littérature ont été réalisées avec des protocoles de fumage très différents des nôtres, et parce qu'aucune étude de ce type n'a été réalisée pour le fumage électrostatique.

Cette étude sur les composés de la fumée et sur les composés de la fumée déposés sur le poisson, a été réalisée avec deux types de génération de fumée (auto-combustion de sciure de hêtre, et friction de bûche de hêtre), en fumage traditionnel et en fumage électrostatique et sur espèces de poisson gras (hareng, saumon) et maigre (lieu).

Pour caractériser la composition globale de la fumée entrante dans les fumoirs, nous avons réalisé un dispositif expérimental de piégeage de la fumée par barbotage. Ce système est constitué par deux condenseurs en verre, montés en série, contenant chacun 400 ml d'acide acétique CH_3COOH à 1%. Pour chacun des flacons un dispositif d'agitation magnétique permet un plus grand contact de la fumée avec la solution. Des embouts en plastiques percés de petits trous sont placés à l'extrémité de chaque canne de verre qui plonge dans l'acide acétique afin de faciliter la formation de petites bulles pour améliorer la surface d'échange fumée / solution. Une pompe à solvant est placée à la sortie du dispositif pour aspirer la fumée avec un débit réglable. Les conditions physiques de piégeage de la fumée sont les suivantes :

- o temps de piégeage : 2 heures
- o débit d'aspiration : $0,6 \text{ m}^3/\text{h}$
- o vitesse d'agitation magnétique : 500 tr/min

Les échantillons de fumée subissent une distillation extraction simultanée. L'appareil utilisé est celui décrit par Lickens-Nickerson, il permet simultanément l'entraînement des composés volatils de la fumée et leur extraction par un solvant non miscible à l'eau, le dichlorométhane. La fraction volumique contenant les composés volatils de la fumée est récupérée et versée dans un appareil de Kuderna-Danish surmonté d'une colonne de Snyder. L'ensemble est plongé dans un bain-marie à 48°C (température d'ébullition du dichlorométhane). Pendant une vingtaine de minutes, le dichlorométhane va s'évaporer et les composés de la fumée vont se

concentrer. Le concentrat est ensuite injecté dans un chromatographe en phase gazeuse de masse (AGILENT 6890 Séries). Le chromatographe est équipé d'un injecteur Split/Splitless et couplé à un détecteur de masse. Les composés sont séparés sur une colonne apolaire DB1 (longueur 60m, diamètre 0,25 mm et épaisseur du film 0,25 µm) à l'aide d'un gradient de température.

Afin de pouvoir comparer les échantillons entre eux, on utilise la technique des indices de rétentions linéaires (IRL). Pour nos références, des alcanes sont utilisés avec un nombre de carbones compris entre 4 et 25 afin de couvrir la plus grande partie des composés analysés dans la fumée et dans la chair de poisson fumé.

La littérature sur les composés volatils de la fumée considère les composés phénoliques comme étant les composés agissant le plus sur la perception de l'odeur et de la flaveur fumée.

Nous avons choisi de centrer également notre travail sur les composés phénoliques déposés. Afin d'optimiser la sensibilité pour différencier les différents composés phénoliques, le protocole analytique préalablement décrit est légèrement modifié.

Dans ce cas, après obtention de l'extrait et avant l'injection de celui-ci dans le chromatographe, on effectue une dérivation des composés phénoliques. Cela consiste à réaliser une triméthylsilylation des phénols par addition de BSTFA + TMCS (N,O-bis(triméthylsilyl)tri fluoroatetamide + triméthylchlorosilane). La silylation est la méthode de dérivation la plus utilisée pour les analyses en chromatographie en phase gazeuse. Suite à l'addition du réactif, il se produit une réaction nucléophile : un hydrogène actif du phénol est remplacé par le groupe triméthylsilyl. Le composé ainsi dérivé est plus volatil, moins polaire et plus thermostable. Cette étape permet une meilleure séparation des composés phénoliques.

Les principaux phénols trouvés dans le poisson fumé ou dans la fumée sont :

- le guaïacol (ou 2-méthoxyphénol)
- le 4-méthylguaïacol
- le 4-éthylguaïacol
- le 4-propylguaïacol
- l'eugénol (ou 2-méthoxy-4-(2-propényl)phénol)
- l'isoeugénol (ou 2-méthoxy-4-(1-propényl)phénol)
- l'o-crésol (ou 2-méthylphénol)
- le p-crésol (ou 4-méthylphénol)
- le syringol (ou 2,6-diméthoxyphénol)
- le phénol (ou benzophénol)

Enfin, nous avons également réalisé des dosages colorimétriques des phénols totaux suivant le protocole décrit dans la norme NF V 45-065 (AFNOR, 1995).

2-6 / L'analyse de la qualité sensorielle et microbiologique des produits

Un jury d'analyse sensorielle, interne à l'IFREMER spécialisé dans la caractérisation des produits de la mer et constitué de 30 à 40 personnes, permet de fournir une information très précise sur la perception sensorielle des poissons fumés. Ce panel participe depuis plusieurs années à l'analyse des produits de la mer (poissons, mollusques, produits frais ou transformés). Il est sollicité, une à deux fois par semaine pour évaluer des produits ou pour des séances d'entraînement.

Des tests de profil sensoriel permettent de caractériser et de discriminer les produits au niveau de l'aspect de la chair, de l'odeur, de la flaveur et de la texture. Les juges évaluent chaque critère sensoriel sur une échelle non structurée bornée par les termes "faible intensité" et "forte intensité", correspondant à une notation de 0 à 10. Les produits sont présentés selon un ordre défini par un carré Latin, de manière à éviter un effet "ordre de présentation". La sélection des critères sensoriels est faite selon la norme NF ISO 11035 = (Recherche et sélection de descripteurs pour l'élaboration d'un profil sensoriel).

Les séances d'évaluation se déroulent dans une pièce climatisée comprenant 10 cabines individuelles, où chaque personne peut travailler avec une bonne concentration. Chaque box est éclairé par une lumière standard (T= 6500°K). Cette salle de dégustation répond aux spécifications de la norme AFNOR V-09-105 concernant les recommandations relatives à l'implantation des locaux destinés à l'analyse sensorielle. L'acquisition des données et le traitement statistique sont automatisés par l'utilisation d'un logiciel (Fizz, Biosystèmes, Dijon).

L'analyse microbiologique des produits est également réalisée à l'IFREMER. Elle permet, selon les méthodes normalisées ou selon des méthodes développées et optimisées en interne, d'évaluer la flore totale psychrotrophe et la flore lactique totale, de dénombrer les lactobacilles, les entérobactéries, les brochothrix, les levures ou les listerias. Le risque sanitaire est important pour certaines souches de *listeria monocytogenès* (taux de mortalité de 30%). La présence de listeria est heureusement rare et essentiellement liée à une contamination initiale de la matière première, à de mauvaises conditions de nettoyage et d'hygiène dans l'entreprise (et non au principe du procédé de fumage électrostatique en lui-même). Par contre, en cas de présence le procédé de fumage peut avoir un impact permettant de limiter la vitesse de croissance des listerias. Les autres flores étudiées sont des flores spécifiques du poisson particulièrement intéressantes à suivre pour connaître l'impact du procédé sur le développement des flores bactériennes généralement responsables de l'altération.

2-7 / L'analyse de l'écoulement des particules par Imagerie des particules (PIV)

La Vélocimétrie par Image de Particules (PIV) est une méthode optique non intrusive performante pour mesurer instantanément dans un plan le champ des vitesses des particules transportées par un fluide porteur en mouvement. Cette technique est basée sur la mesure du temps de vol des particules. Le schéma de principe est présenté sur la figure 7.

Notons que pour la plupart des applications de la PIV, l'étude correspond à l'analyse des champs de vitesse d'un fluide monophasique. Les particules sont artificiellement introduites dans le fluide pour servir de traceur repérable, et les caractéristiques de ces particules sont choisies afin de suivre le plus fidèlement possible le mouvement du fluide tout en réfléchissant la lumière. Pour notre application, les particules de fumée ne suivent pas exactement la phase porteuse. Nous pouvons accéder, par cette mesure, au mouvement de la phase particulaire.

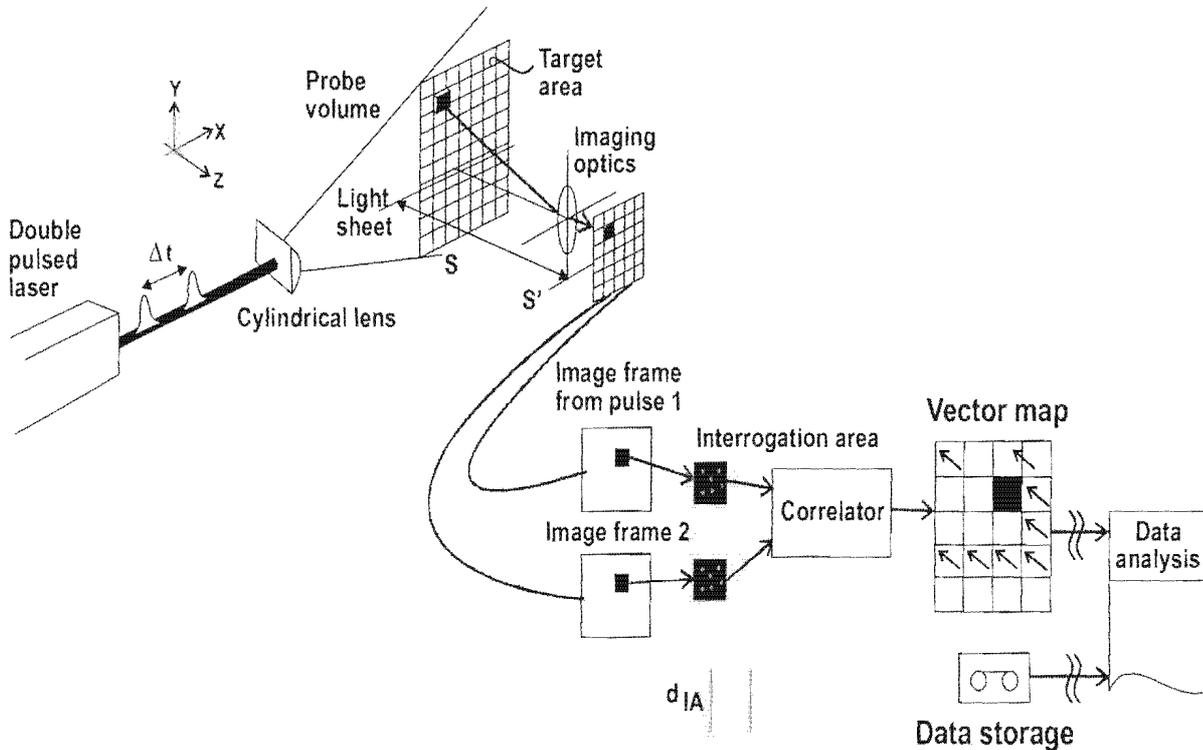


Figure 7 – schéma de principe de la PIV

Ces particules doivent être illuminées dans un plan au moins deux fois dans un court intervalle de temps. Les faisceaux lumineux réfléchis par les particules sont enregistrés sur une séquence d'images. Celles-ci subissent alors un traitement informatique sophistiqué (corrélation spatiale) qui permet de mesurer le déplacement des particules pendant l'intervalle de temps, et d'en déduire les composantes des vecteurs vitesse dans le plan d'illumination.

Les particules utilisées dans nos expériences sont directement des particules de fumée du générateur à friction car elles sont suffisamment grosses pour réfléchir la lumière, et la distribution spatiale des particules dans l'écoulement est très homogène (cf. section 3 -1).

La concentration en particules a toutefois dû être ajustée (par dilution) pour ne pas perturber excessivement le plan laser. Cette caractéristique est très intéressante puisqu'elle permet d'éviter de trouver des particules exploitables en PIV qui respecteraient fidèlement les propriétés physiques de la fumée. Nous avons également cherché, mais sans succès, des particules qui seraient quasiment insensibles aux phénomènes de charge électrique et qui autoriseraient alors le suivi de la phase porteuse indépendamment de la phase particulaire.

Le plan lumineux très fin de l'ordre du millimètre est créé par un faisceau laser et un système optique. Le laser est puissant, de façon à ce que le maximum de particules soit éclairé. La durée du pulse doit être assez petite de façon à « geler » le mouvement des particules pendant la durée du pulse, ceci pour éviter les flous. Le délai entre deux pulses doit être assez long pour pouvoir déterminer le déplacement des particules sur les images, et assez court pour que les particules restent bien dans le plan laser pendant ce temps. Le laser pulsé utilisé est le laser Nd : YAG. On obtient ainsi un double oscillateur de longueur d'onde 532 nm (vert) où l'énergie de chaque pulse est de l'ordre de 100 mJ. La fréquence d'acquisition a été fixée à 15 Hz.

Les points lumineux correspondant aux particules sont enregistrés par une caméra numérique haute définition orientée à 90° par rapport au plan laser. Ce type de caméra peut enregistrer très rapidement une séquence d'images grâce à un capteur CCD spécial possédant environ 100 pixels par mm. La taille maximale d'une image est de 1008 x 1016 pixels. Le capteur CCD acquiert l'image correspondant au premier pulse, la transfère immédiatement dans une

mémoire vive. Le capteur est vidé, puis enregistre l'image correspondant au second pulse. Les deux images sont ensuite transférées au processeur.

Les données sont enregistrées directement dans la mémoire d'un ordinateur. Le plan laser est divisé en petites aires appelées « zones d'interrogation » (typiquement 32 x 32 pixels). Plus les zones sont petites, plus la résolution spatiale sera bonne. Le déplacement local d'un point lumineux dans une de ces fenêtres est déterminé en analysant les images du premier et du deuxième pulse par des méthodes statistiques de corrélation croisée. Le processus est répété pour toutes les zones d'interrogation, permettant ainsi de calculer le champ des vitesses dans le plan laser.

Afin de ne pas perturber le champ de la caméra par rapport au plan laser, nous avons construit deux maquettes : en verre (pour la première), en plexiglas (pour la seconde) sur des géométries simples.

3/ Caractérisation de la fumée

3-1/ Caractérisation physique

Pour la caractérisation physique de la fumée, deux types de générateurs de fumée ont été employés :

- *Le générateur de fumée par friction de l'IFREMER.*

Il s'agit d'un appareil fabriqué par la société MUVERO FOOD TECHNIC modèle FR1002 qui présente les caractéristiques suivantes :

- Forme du rotor : 22 dents, cylindre creux
- Mode de pression de la bûche sur le rotor : direct (des griffes serrent la bûche et la maintiennent sur le rotor)
- Type d'énergie utilisée pour le mode de pression de la bûche : mode pneumatique.

La bûche utilisée doit présenter une section constante de 80 x 65 mm. Nous avons travaillé pour cette étude avec des bûches de hêtre.

La température de pyrolyse est de l'ordre de 350 à 400°C.

- *Le générateur de fumée par auto combustion de l'ENITIAA.*

Il s'agit d'un générateur à copeaux de marque Thirode.

Le temps de préchauffage est constant et fixé à 20 minutes, et le temps entre deux alimentations de copeaux est de 15 minutes. La ventilation est assurée par la cellule de fumage à laquelle est associé le générateur et reste constante au cours du temps. Ainsi, on ne peut faire varier que deux paramètres : l'humidité et la granulométrie des copeaux utilisés.

Le bois utilisé est dans ce cas toujours du hêtre et les copeaux doivent être humidifiés avant la mise en route du générateur de telle façon que l'humidité soit suffisamment faible pour permettre la production de fumée mais assez élevée pour éviter les départs de feu.

La granulométrie des copeaux doit être adaptée au générateur afin qu'ils puissent descendre dans la trémie évitant ainsi les départs de feu. Généralement, on utilise des copeaux sous forme de bâtonnets de granulométrie relativement constante (9 à 18 mm) obtenus par déshydratation à haute température (500°C) commercialisés par SPDS (Société Parisienne Des Sciures). Avec ce type de copeaux, on travaille à une humidité de 10% à 20%. Des copeaux plus fins (2 à 5 mm) sont utilisés à des humidités de 40 et 60% afin d'étudier l'effet de la granulométrie et de l'humidité.

La température de pyrolyse est de l'ordre de 450 à 500°C

3-1-1 Résultats de l'analyse granulométrique

Les résultats obtenus sont présentés sous la forme d'une courbe de distribution granulométrique en échelle lognormale (figure 8).

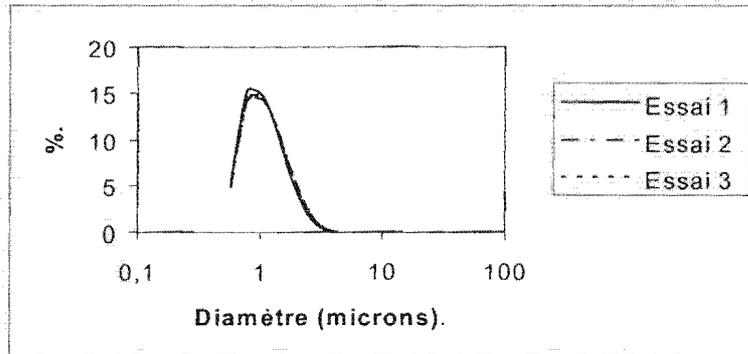


Figure 8 - Distribution granulométrique Générateur à friction , 10 minutes dans le caisson.

Les courbes obtenues suivent parfaitement des lois de répartition lognormale. Elles correspondent toutefois bien à des phases dites « mono-disperses » en raison de la valeur faible de l'écart-type.

Des répartitions granulométriques quasi-identiques ont été obtenues pour les deux modes de génération de fumée.

Par contre, cette répartition granulométrique évolue sensiblement avec le temps pour une fumée qui stagne dans un volume déterminé comme l'illustre la figure 9 suivante :

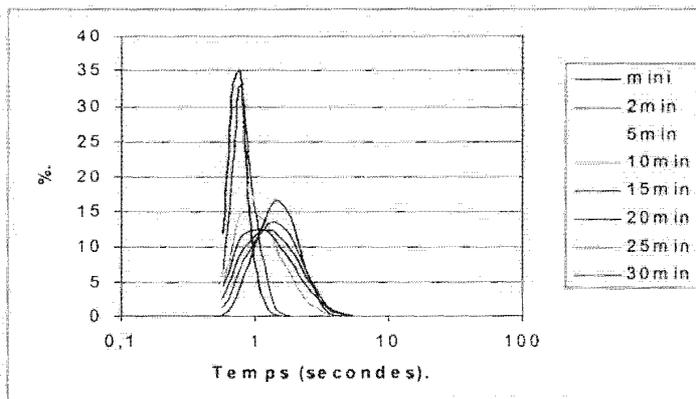


Figure 9 - Evolution de la répartition granulométrique au cours du temps

3-1-2/ Estimation de la concentration en particules

Pour connaître la concentration en particules dans notre fumée, nous ne pouvons pas exploiter directement un outil de mesure (les compteurs de particules par exemple saturent pour des concentrations aussi fortes et la dilution de la fumée est une opération délicate à mener de façon précise). Nous avons donc choisi de l'estimer de façon indirecte à partir de l'évolution des courbes granulométriques et d'un modèle mono-disperse de coagulation des particules.

Le modèle de coagulation des particules retenu est le modèle de Hinds.

On se place dans le cas de la coagulation par diffusion brownienne d'un aérosol monodispersé.

Hypothèses :

- particules sphériques de diamètre $d_p > 0,1\mu\text{m}$,
- adhésion à chaque collision (efficacité de collision brownienne égale à l'unité).

L'approche choisie consiste à s'intéresser à une particule et à considérer la diffusion des autres particules à sa surface. Le flux de particules à la surface de la particule considérée est donné par la première loi de Fick :

$$J = -D \frac{dN}{dx}$$

où D est le coefficient de diffusion des particules, N est la concentration numérique et dN/dx est le gradient de concentration en surface de la particule considérée. La surface de collision notée A_s est une surface imaginaire autour de la particule considérée où se situent les centres des autres particules lorsqu'elles entrent en contact avec la particule considérée. Dans notre cas, il s'agit d'une sphère de diamètre $2d_p$. D'où on en déduit le taux de collision dn/dt de la particule considérée avec les autres particules :

$$\frac{dn}{dt} = A_s J = -\pi(2d_p)^2 D \frac{dN}{dx}$$

Or Fuchs (1964) a trouvé comme expression du gradient de concentration en surface de la particule considérée :

$$\frac{dN}{dx} = -\frac{2N}{d_p} \text{ pour } d_p > \lambda$$

où λ est le libre parcours moyen apparent des particules. On déduit donc des deux équations précédentes que :

$$\frac{dn}{dt} = 8\pi d_p D N$$

Or il y a N particules identiques à la particule considérée par unité de volume, donc le taux de collision par unité de volume est :

$$\frac{dn_c}{dt} = N \frac{1}{2} (8\pi d_p D N) = 4\pi d_p D N^2$$

où on introduit le facteur 1/2 pour ne compter qu'une fois chaque collision.

Le taux de collision correspond à l'opposé du taux de variation de la concentration numérique, c'est pourquoi on peut écrire :

$$\frac{dN}{dt} = -K_0 N^2$$

où K_0 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) est le coefficient de coagulation,

$$K_0 = 4\pi d_p D$$

Deux cas se présentent alors suivant la valeur du nombre de Knudsen :

1/ Dans le domaine de la loi de Stokes, en remplaçant D par sa valeur on obtient :

$$K_0 = \frac{4K_B T}{3\eta}$$

Pour les particules de diamètre supérieur à 1 micron, K_0 est indépendant des dimensions des particules.

2/ Dans le domaine d'application de la formule de Millikan-Cunningham, K_0 est corrigé par le facteur de correction de Cunningham :

$$K_0 = \frac{4K_B T}{3\eta} \Phi(Kn)$$

Dans ce domaine, K_0 augmente lorsque le diamètre de l'aérosol diminue

En intégrant $\frac{dN}{dt}$ au cours du temps, si $N = N_0$ au temps $t = 0$, K_0 étant supposé constant, la concentration N au temps t est donnée par :

$$\frac{1}{N(t)} - \frac{1}{N_0} = K_0 t$$

soit

$$N(t) = \frac{N_0}{1 + N_0 K_0 t}$$

Bien entendu, du fait de la coagulation, au fur et à mesure que la concentration N diminue au cours du temps, le diamètre des particules augmente. Si on suppose qu'il n'y a pas de pertes, on peut considérer que la masse d'un aérosol confiné reste constante, de même que la masse m par unité de volume. Ainsi, pour des particules liquides :

$$m = N_0 \frac{1}{6} \pi \rho_p d_{p0}^3 = N(t) \frac{1}{6} \pi \rho_p (d_p(t))^3$$

soit :

$$\frac{d_p(t)}{d_{p0}} = \left[\frac{N_0}{N(t)} \right]^{1/3}$$

où d_{p0} est le diamètre initial et $d_p(t)$ le diamètre à l'instant t .

En remplaçant $N(t)$ par sa valeur, on trouve que pour un aérosol monodispersé, le diamètre d_p augmente avec le temps suivant la relation :

$$d_p(t) = d_{p0} (1 + N_0 K_0 t)^{1/3}$$

Selon Hinds (1998), cette relation peut aussi s'appliquer à des particules solides à l'exception des agglomérats poreux et fréquemment aux aérosols polydispersés.

Compte tenu des mesures précédentes, le modèle de coagulation par diffusion brownienne peut s'appliquer ; on connaît la forme de la relation reliant d_p au temps t et on souhaite déterminer les paramètres d_{p0} et $k = N_0 K_0$.

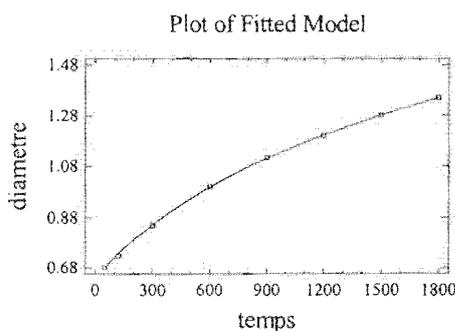


Figure 10 : Ajustement des valeurs expérimentales (▽) au modèle.

La figure 10 montre la qualité d'ajustement du modèle à nos données expérimentales, ce qui laisse à penser que le modèle employé est très plausible. L'identification des coefficients donne d_0 à $0,63 \mu\text{m}$ et $k = N_0 K_0 = 0,0049$.

Dans les conditions standards (20°C et 1 atm), une sphère de diamètre 0,63 microns présente un coefficient de coagulation de $3,59 \cdot 10^{-16} \text{ m}^3/\text{s}$ selon la littérature. On peut donc en déduire une valeur de N_0 de l'ordre : $1,4 \cdot 10^{13} \text{ particules/m}^3$.

Notons donc que la fraction volumique occupée par les particules est très faible (de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-6}), autrement dit que la phase particulaire est fortement diluée dans la phase porteuse.

3-2/ Caractérisation chimique

Comme évoqué dans la littérature, la fumée, quelque soit son mode de génération de la fumée, est composée, par ordre d'importance, des composés volatils suivants:

- des phénols et dérivés (entre 25 et 30 %)
- des furanes et dérivés (entre 20 et 25 %)
- des cétones (entre 15 et 25 %)
- des alcools, acides et esters (entre 5 et 15%)
- des aldéhydes (entre 5 et 10 %)
- des alcanes et alcènes (entre 5 et 10 %)
- des alkyls et dérivés (entre 1 et 5 %)
- des HPA (entre 0,5 et 2 %)
- des dérivés du benzène dans le cas du générateur à auto-combustion

Nous n'avons pas cherché dans cette analyse à comparer la quantité totale de composés volatils générés en fonction des modes de production de fumée car il n'était pas possible de moduler cette grandeur sur l'un des générateurs afin de fournir une quantité comparable pour les deux modes de production. Notre analyse porte donc uniquement sur les rapports entre composés produits.

Les principales différences entre les deux types de génération de fumée sont :

- l'auto-combustion est plus riche en furannes et en certains composés phénoliques, comme le syringol et p-crésol, que la friction, qui quant à elle, s'avère plus riche en alcools, acides et esters, et en guaiacol et 4-méthylguaiacol.
- des dérivées du benzène apparaissent en faible proportion dans le cas de la génération par auto-combustion alors qu'ils ne sont pas détectés dans la fumée par friction.
- enfin, les HPA (Hydrocarbures Polycycliques Aromatiques), réputés nocifs, sont en quantité très faible pour les deux modes de production. Mais leur quantité plus importante pour la fumée obtenue par auto-combustion est à relier avec la température de pyrolyse.

4/ Caractérisation du produit avec le procédé électrostatique initial et comparaison avec les autres procédés

4-1/ La caractérisation chimique et biochimique

En premier lieu il convient de préciser que nous n'avons détecté aucun élément réputé nocif spécifique au procédé de fumage électrostatique. La présence d'ozone liée à l'effet couronne pour la génération d'ions a été constatée dans le flux traversant le tunnel électrostatique, comme évoqué dans la littérature sur les précipitateurs électrostatiques. Il semble que la concentration d'ozone à proximité immédiate du produit soit extrêmement faible (la

concentration maximale se trouvant à proximité immédiate des électrodes de décharge). L'ozone pourrait entraîner une oxydation plus rapide des lipides du poisson (notamment pour les poissons gras). Toutefois, le suivi des critères d'oxydation des lipides (mesures des diènes conjugués, dosage des hydroperoxydes, dosage des substances réactives à l'acide thiobarbiturique) sur des poissons gras fumés par fumage électrostatique n'a montré aucune différence significative sur ces critères durant une période de 45 jours après fumage.

Dans le cadre du fumage traditionnel, le rapport entre composés de la fumée et composés déposés sur le produit à fumer n'est pas fondamentalement modifié. Les composés phénoliques sont toutefois captés par le poisson de façon légèrement préférentielle. La teneur en lipides du poisson semble également légèrement influencer ces affinités.

Dans le cadre du fumage électrostatique, le rapport entre composés de la fumée et composés déposés sur le produit à fumer est modifié. En effet, la quantité d'acides, d'alcools et d'esters déposés est très importante. Ces composés deviennent alors les composés principaux retrouvés sur le poisson. Les autres composés, comme les composés phénoliques, se déposent en plus faible proportion.

Les HAP déposés sur les produits sont, dans tous les cas, en quantité bien inférieure au norme sanitaire. Cette quantité est essentiellement dépendante du mode de génération de fumée.

La comparaison des 10 principaux composés phénoliques déposés sur des filets de hareng entre un fumage traditionnel en enceinte climatisée, un fumage par atomisation de fumée liquide et un fumage électrostatique réalisé à l'aide de l'ancien tunnel de fumage est disponible dans l'article de Sérot & al.(2004).

La quantité de composés carbonylés déposée est similaire pour tous les modes de fumage. Ceci confirme l'importance de ces composés sur la coloration du produit puisque le temps de traitement a été adapté pour obtenir une coloration du produit fumé proche.

La teneur en phénols totaux dosées par colorimétrie est moins importante dans le cas du fumage électrostatique que dans le cas du fumage traditionnel. Pour une couleur proche, nous obtenons, sur des filets de harengs et pour un générateur de fumée à friction, une teneur de 0,4 mg/100 g de chair en moyenne pour le pilote de fumage électrostatique et 0,8 mg/100 g de chair en moyenne pour le fumage en enceinte traditionnelle.

4-2/ La caractérisation microbiologique et sensorielle

Sur le plan microbiologique, nous nous concentrerons lors de la troisième année du contrat sur la caractérisation fine des flores décrites en section 2-6 et sur leur développement temporel. Pour ce type d'étude, il est indispensable de travailler sur de nombreux lots. Ces lots devront impérativement être aléatoirement répartis sur les deux types de fumage (traditionnel et électrostatique) réalisés simultanément. Le seul critère qui a été étudié actuellement concerne la flore totale et son évolution durant une trentaine de jours de stockage réfrigéré: aucune différence statistiquement significative entre les deux procédés n'a pu être observée.

Sur le plan de la caractérisation sensorielle, nous pouvons résumer les résultats liés au procédé de fumage électrostatique (configuration au début de cette étude, les premiers résultats modifiant significativement ces remarques sont fournies en section 9-2) par les points suivants :

- la couleur de surface est proche de la couleur obtenue avec le procédé traditionnel
- le produit présente un aspect plus gras
- le produit est moins ferme et moins croquant
- l'odeur du produit est moins fumée tout en présentant un rapport fumée froide / fumée feu de bois plus grand

- les odeurs liées aux poissons ou à son altération sont plus facilement perceptibles.
- Des descriptifs plus détaillés sont disponibles dans les articles de Cardinal & al (1997 et 2001).

5/ Le modèle proposé

Le schéma des interactions mises en jeu entre les différentes phases pour décrire l'écoulement de la fumée est représenté sur la figure 11. Cette description doit être complétée par une description des dépôts ou adsorptions des composés de la fumée sur les produits à traiter, sur les électrodes et les parois.

La dynamique de la phase porteuse influence la phase particulaire et réciproquement. Toutefois, en milieu dilué cette dernière interaction peut être négligée. Dans notre cas, nous devons rajouter des interactions supplémentaires en liaison avec les effets électriques (effet couronne). En effet, des phénomènes d'advection dus à la charge ionique agissent sur la phase porteuse (force souvent baptisée « vent ionique »), de même des forces volumiques affectent légèrement le flux électrique.

Bien évidemment, puisqu'il s'agit du principal phénomène recherché, l'effet couronne permet la charge et la précipitation des particules. En même temps, la distribution de la charge particulaire dans l'espace est fortement influencée par la dynamique des particules. Cette distribution de charge entraîne la distorsion du champ électrique. L'échange de charge entre charge ionique qui cède des charges pour accroître la charge particulaire est également dépendant de l'écoulement du mélange.

En conclusion les phénomènes d'écoulement sont très fortement couplés.

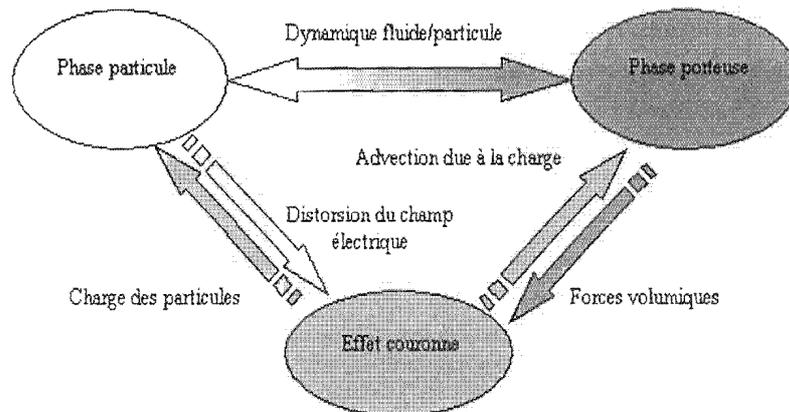


Figure 11 – Schéma des interactions mises en jeu entre les différentes phases pour l'écoulement de la fumée (la partie dépôt – adsorption des composés n'est pas représentée)

Différents modèles décrivant la précipitation électrostatique existent dans la littérature. Le modèle le plus couramment employé est le modèle de Deutsch-Anderson.

Cette relation a été établie à l'aide d'un modèle monodimensionnel du processus. Elle repose sur les deux hypothèses majeures suivantes :

1. la turbulence du gaz à l'intérieur est suffisante pour qu'une redistribution continue des particules de fumée dans chaque section droite ait lieu. Autrement dit, la répartition en taille des particules est invariante dans toute section droite verticale:
 $n(v, x, y, z) = n(v, x)$.
2. toutes les tranches verticales de largeur dx se comportent exactement de la même manière.

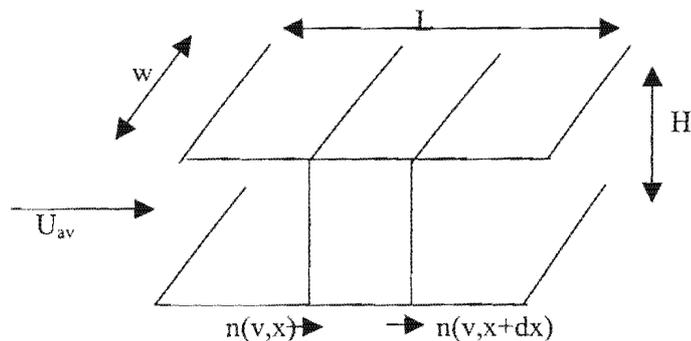


Figure 12 - Modèle monodimensionnel de l'électrofiltre.

Notons : U_{av} la vitesse moyenne de l'écoulement du gaz

w_e la vitesse de migration des particules de fumée vers le produit sous l'action du champ électrique. En effectuant un bilan de masse sur une tranche de largeur dx , on obtient une loi de décroissance exponentielle du nombre de particules circulant dans le tunnel au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'entrée de la fumée:

$$n(v, x) = n(v, 0)e^{\frac{-w_e x}{HU_{av}}}$$

où $n(v, 0)$ représente la distribution en taille des particules de fumée en entrée du tunnel.

Une particule dans un champ électrique subit une force électrique de Coulomb et une force de résistance du fluide à ce déplacement. En égalant ces deux actions, l'expression de la vitesse de migration est alors établie :

$$w_e = \frac{qE}{3\pi\mu_s d_p}$$

Classiquement, la charge électrique q est prise égale à la charge limite théorique en première approximation.

Ce modèle s'avère nettement insuffisant dans la plupart des cas. D'autres modèles ont été proposés depuis. Ils reposent sur l'analyse d'équations aux dérivées partielles couplées à des conditions aux limites. Aucune solution analytique de ces équations n'existe en général et il convient d'effectuer une analyse numérique pour les résoudre et les simuler.

5-1/ L'approche ASM

Les premiers résultats expérimentaux ont montré que l'ensemble phase porteuse-phase particulaire forme un aérosol mono dispersé dont le diamètre médian des particules est voisin du micron et la concentration de l'ordre de 10^{13} particules par m^3 (cf. section 3-1).

Cette concentration importante a entraîné le rejet de la méthode lagrangienne qui consiste à calculer la trajectoire de chaque particule, afin de modéliser l'écoulement de la phase dispersée.

De même, la méthode eulérienne, qui consiste à calculer l'écoulement de deux phases distinctes (équations de conservation pour chacune des phases), est délicate compte tenu des algorithmes disponibles et des informations disponibles.

Le modèle ASM (Algebraic Slip Model) a donc été retenu pour notre formalisation des phénomènes. En effet, la taille et la concentration des particules respectent parfaitement les hypothèses associées à ce type de représentation. La concentration est certes trop grande pour une approche lagrangienne, avec des temps de calculs raisonnables, mais reste suffisamment faible pour être considérée comme fortement diluée dans la phase gazeuse. En effet, en

assimilant les particules à des sphères parfaites, il est aisé de calculer la fraction volumique occupée par les particules (= concentration numéraire de la phase particulaire x volume moyen d'une particule) et d'en déduire que le rapport volume de la phase particulaire sur le volume de la phase gazeuse est de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-6} .

La phase continue et la phase dispersée seront modélisées par une équation de quantité de mouvement (Navier-Stokes) et une équation de transport de leur fraction volumique. Nous considérons aussi qu'il n'y a pas de transfert de masse entre phases.

Ainsi, nous obtenons pour la phase porteuse les équations suivantes :

$$\frac{\partial \rho_c r_c U_i^c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho_c r_c U_i^c U_j^c - r_c \mu_c \left(\frac{\partial U_j^c}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i^c}{\partial x_j} \right) \right) = -r_c \frac{\partial P}{\partial x_i} + f_{Di} + \sum_{p=1}^N \rho_p r_p \frac{U_i^p - U_i^c}{\tau_p}$$

$$\frac{\partial \rho_c r_c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_c r_c U_i^c) = 0$$

Nous avons alors pour les différentes phases dispersées exactement les mêmes équations :

$$\frac{\partial \rho_p r_p U_i^p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho_p r_p U_i^p U_j^p - r_p \mu_p \left(\frac{\partial U_j^p}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i^p}{\partial x_j} \right) \right) = -r_p \frac{\partial P}{\partial x_i} + f_{Di} + \rho_p r_p \frac{U_i^c - U_i^p}{\tau_c}$$

$$\frac{\partial \rho_p r_p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_p r_p U_i^p) = 0$$

avec la relation suivante :

$$r_c + \sum r_p = 1$$

Nous simplifions alors ce modèle en respectant certaines hypothèses,

- Reynolds particulaire : $Re_p \ll 1$ ($Re_p = \frac{\rho_p U_i^p d_p}{\mu}$)
- Temps de relaxation de la particule inférieur aux échelles de turbulence : $\tau_p \ll \tau_f$
- Relations vérifiées pour des particules de diamètre : $d_p^k \leq 5 \mu m$
- Écoulement suffisamment dilué :

$$r_c \gg \sum_k r_p^k = \sum_k^{N_p^k} \frac{[N_p^k] \pi (d_p^k)^3}{6} \ll 1, \text{ avec } [N_p^k] \text{ le nombre de particules pour une}$$

classe k donnée

$$\rho_c r_c \gg \rho_p \sum_k r_p^k$$

5-2/ L'écoulement du mélange

Pour décrire notre écoulement, toutes ces hypothèses semblent respectées. Un modèle ASMM (Algebraic Slip Mixture Model = modèle spécifique implémenté sous CFX qui fait partie des modèles ASM) peut alors être utilisé.

Dans ces conditions, on considère qu'il est inutile de résoudre les équations de mouvement pour la phase particulaire. Il est alors effectué un calcul d'écoulement monophasique pour obtenir la vitesse moyenne du mélange.

Nous obtenons alors pour le mélange (phase porteuse + particules) les équations suivantes :

Equation de mouvement dans un repère cartésien :

$$\frac{\partial \rho_m U_i^m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho_m U_i^m U_j^m - \mu_m \left(\frac{\partial U_j^m}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i^m}{\partial x_j} \right) \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho_{ion} E_i$$

Equation de continuité :

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_m U_i^m) = 0$$

Le dernier terme de l'équation de mouvement du mélange est une force représentant l'influence du champ électrique sur la phase porteuse : cette force est appelée vent ionique. Cette équation est également couplée, via le terme μ_m somme de la viscosité classique et de la viscosité turbulente, à deux équations différentielles symbolisant l'énergie turbulente (modèle k-ε) et qui agissent sur la viscosité turbulente.

L'exposant ou l'indice m représente la notion de mélange (c'est-à-dire l'ensemble phase porteuse et phase particulaire).

5-3/ L'écoulement de la phase particulaire

Les équations de la phase disperse (= particulaire) se réduisent alors à une simple équation de transport dans le cas mono-disperse (ou en k équations si l'on souhaite décrire la phase disperse en k classes de taille de particules).

$$\frac{\partial \rho_p r_p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_p r_p (U_j^p + \hat{U}_j^p)) = 0$$

avec $\hat{U}_p = \tilde{U}_p - \sum_k n_k \frac{\rho_p^k}{\rho_m} \tilde{U}_k$

et $\tilde{U}_p = \frac{q_p^k E_i}{3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_p^k}$

5-4/ Les équations d'évolution de la charge

Nous avons vu que les ions créés vont charger les particules de fumée. Ainsi deux équations vont régir l'évolution de la charge, l'une pour l'évolution de la charge ionique, l'autre pour l'évolution de la charge particulaire. Le couplage entre les deux équations est assuré par un terme source décrivant pour la cellule considérée l'évolution de charge particulaire :

5-4-1/ La charge ionique

$$\frac{\partial \rho_{ion}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((U_j + b_{ion} E_j) \rho_{ion} - D_{ion} \left(\frac{\partial \rho_{ion}}{\partial x_j} \right) \right) = - \sum_k^{N_c} [N_p^k] \frac{dq_p^k}{dt}$$

5-4-2/ La charge des particules

$$\frac{\partial [N_p^k] q_p^k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((U_j + u_{s_k}) [N_p^k] q_p^k - D_p \left(\frac{\partial [N_p^k] q_p^k}{\partial x_j} \right) \right) = [N_p^k] \frac{dq_p^k}{dt}$$

L'équation de Cross régit, pour chaque classe de taille de particules, l'évolution de la charge particulaire au cours du temps :

$$\frac{dq_p^k}{dt} = \frac{1}{\tau_\varepsilon q_p^{k,max}} (q_p^{k,max} - q_p^k)^2 \text{ avec } \tau_\varepsilon = \frac{4 \varepsilon_0}{\rho_{ion} b_{ion}} \text{ et } q_p^{k,max} = \frac{3 \pi \varepsilon_0 \varepsilon_r \|\vec{E}\| d_p^2}{\varepsilon_r + 2}$$

Des termes supplémentaires peuvent également être additionnés à la partie gauche de l'équation de Cross pour tenir compte de la charge par diffusion ou d'autres termes. Toutefois,

ces termes restent d'une importance très faible et une première approximation très raisonnable est obtenue à partir de l'équation précédemment présentée.

5-5/ L'équation de Poisson pour le calcul du champ électrostatique

Le champ électrique subit une distorsion, du fait de la présence de charges électriques dans le milieu (ions et particules).

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}\phi$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_j^2} = \frac{\rho_{ion} + \sum_k N_p^k q_p^k}{\epsilon_0}$$

5-6/ Les conditions aux limites

Nous définirons les conditions sur les sections entrantes et sortantes de la fumée, sur l'électrode de collecte, sur l'électrode de décharge, et sur les parois. Ces conditions doivent être définies pour toutes les EDP (Equations aux Dérivées Partielles) préalablement présentées (c'est-à-dire pour les vitesses du mélange, la concentration en particules, la charge ionique, la charge particulaire, le potentiel).

L'électrode de collecte est reliée à la terre, le potentiel est donc nul pour cette zone. L'électrode de décharge est reliée aux potentiels ϕ_0 fournis par le générateur de tension (générateur Haute Tension 0 – 60 kV).

Par contre, la densité de charge ionique à l'électrode de décharge ρ_0 n'est pas libre et dépend de la géométrie des électrodes de décharge (et notamment du diamètre des éléments cylindriques et de leur rugosité), de la température, de la pression, des distances entre électrodes ... Pour des électrodes de type fils, la valeur de ρ_0 n'est pas réellement connue, mais la valeur du champ électrique E_0 à proximité immédiate de l'électrode de décharge est régie par la formule de Peek suivante :

$$E_{RS} = E_R \delta_R f_1 \left(1 + \frac{k_R}{\sqrt{r_f \delta_R}} \right)$$

avec $E_R = 31.1055$ V/m, $k_R = 0,0308$ m^{1/2}, $\delta_R = \frac{293}{273+T} \frac{P}{101325}$, r_f rayon du fil, δ_R densité relative de l'air, P pression, T température en degré K et f_1 un coefficient de rugosité (entre 0,8 et 1).

Il est alors possible d'ajuster la valeur de ρ_0 pour obtenir la bonne valeur de E_0 .

Une autre solution, proposée dans la thèse de Tochon, consiste à calculer le courant collecté I à l'électrode de collecte (par intégration des valeurs de ρ sur la section de l'électrode) et de le comparer à des lois empiriques ou à des mesures et d'ajuster la valeur de ρ_0 pour obtenir la bonne valeur de I .

Nous avons retenu dans cette étude la première méthode. Nous la validerons en comparant les valeurs du courant I recalculées dans ce cas aux valeurs mesurées expérimentalement. Nous conservons ainsi un aspect plus prédictif qu'avec la seconde méthode.

Les autres conditions aux limites sont de trois types possibles.

- conditions de Dirichlet : la valeur du champ scalaire est imposée : $\phi = \phi_0$
- conditions de Neumann : la dérivée par rapport à la normale au bord est imposée : $\frac{\partial \phi}{\partial n} = \phi'_0$
- conditions au loin (cf. 7-2)

6/ Les campagnes de visualisation de l'écoulement des particules sur maquettes spécifiques

6-1/ La première campagne

Cette première campagne a surtout permis de se familiariser avec la fabrication de maquette transparente, à l'adaptation des quantités de fumée à injecter, et aux réglages de prises d'images. Le schéma de l'installation est présenté sur la figure 13.

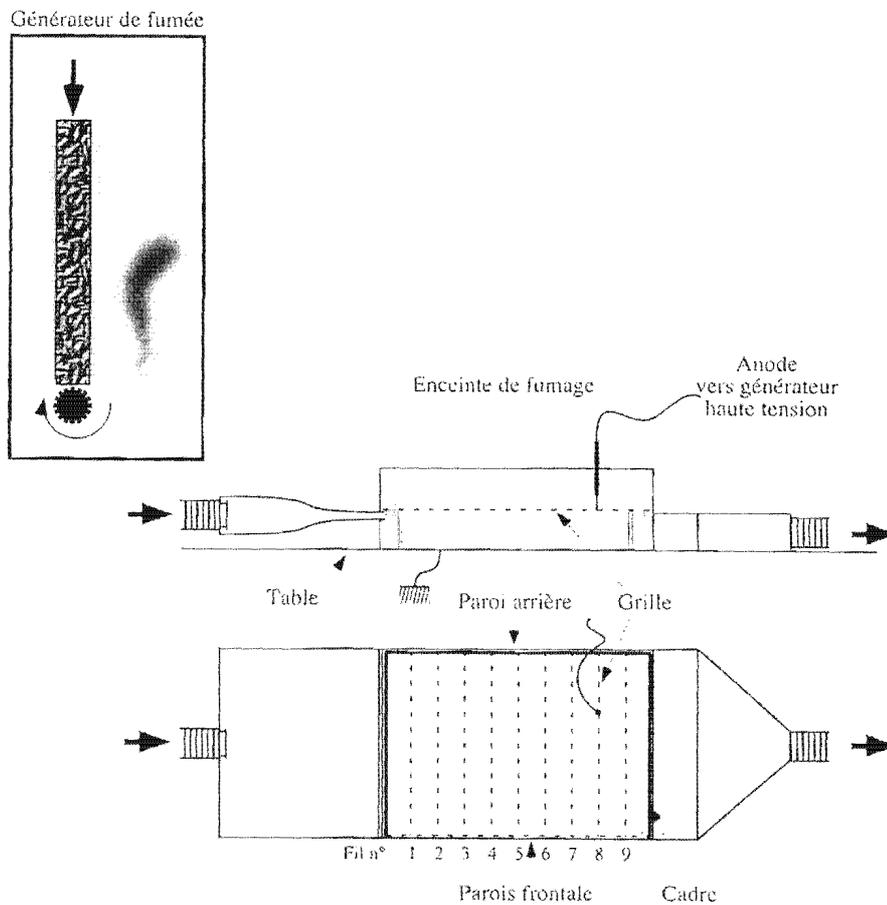


Figure 13 – Schéma de l'installation pour la 1^{ère} campagne PIV

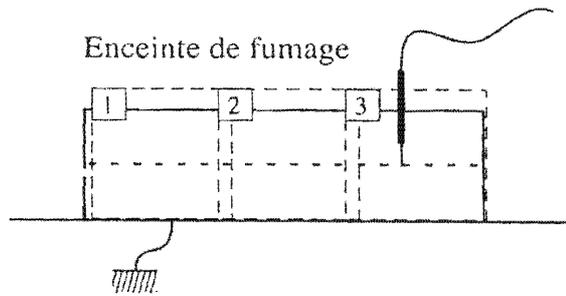


Figure 14 – Présentation de la juxtaposition des 3 champs de visualisation PIV

Afin de conserver une précision suffisante, il est apparu indispensable par rapport aux dimensions de notre maquette de diviser l'écoulement en 3 fenêtres de visualisation (fenêtre de 30 cm sur 30 cm). Malheureusement la stabilité et la reproductibilité de l'écoulement étant limitées, il est toujours difficile de savoir si lors du décalage de la visualisation PIV les conditions d'écoulement sont réellement identiques. Le traitement de reconstitution des vecteurs vitesses sur les zones de redondance de visualisation s'avère parfois très délicat. De plus, bien que la maquette semble simple géométriquement, nous avons pu constater que les écoulements s'avèrent rapidement très complexes et probablement difficiles à exploiter dans un premier temps pour une phase de validation des travaux de modélisation et résolution numérique. Cette campagne s'est avérée très utile pour confirmer l'intérêt de la PIV pour la visualisation. Elle a également montré la difficulté de réglage des images sans l'aide d'un système d'ajustement micrométrique automatisé des distances focales. Enfin, les résultats obtenus nous ont fortement guidés vers la conception d'une nouvelle maquette plus simple et plus stable. Nous présentons à titre illustratif deux des sept conditions expérimentales traitées (cf. figures 15 et 16). Ces résultats pourront servir l'année prochaine à affiner la validation de notre outil numérique.

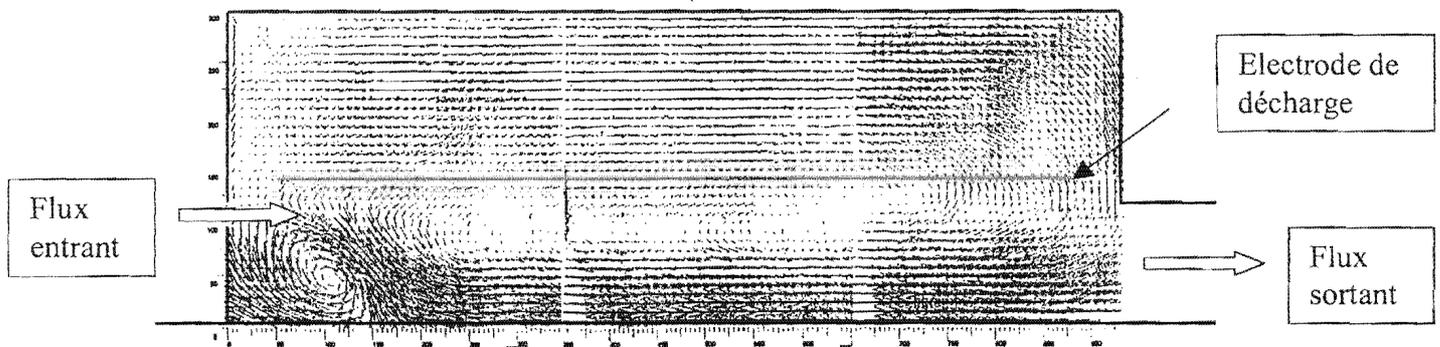


Figure 15 - 1^{ère} campagne – Potentiel nul sur l'électrode de décharge

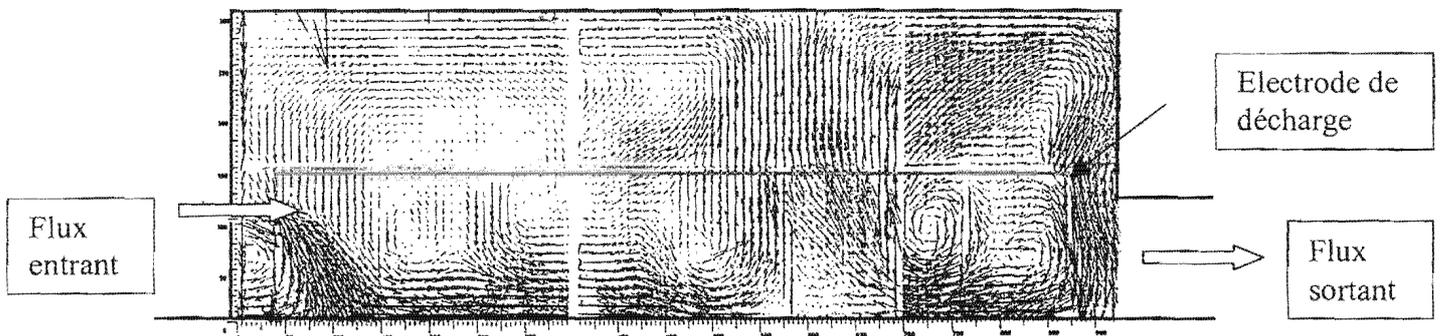


Figure 16 - 1^{ère} campagne – Potentiel de 60 kV sur l'électrode de décharge

6-2/ La seconde campagne

Dans ce paragraphe, nous rappelons, pour faciliter la lecture du présent rapport, comment est constitué le second banc d'essais.

Celui-ci se compose de la maquette construite par l'IFREMER, d'un générateur de fumée à friction et d'un caisson tampon, d'un générateur de tension et du système PIV. Tout ceci est schématisé sur la figure 17. Le positionnement exact des fils est précisé sur la figure 18. La photographie 19 représente une vue générale du banc expérimental.

Les résultats présentés ensuite correspondent à des moyennes PIV obtenues sur une trentaine de secondes. En effet, les mesures PIV instantanées laissent apparaître des structures très instables et apparemment peu ordonnées qui restent difficiles à interpréter. Par contre, nous conserverons à l'esprit que ces résultats sont des moyennes de structures « instationnaires », ce qui peut avoir des incidences importantes sur la résolution des équations d'un modèle de simulation. Les films, visualisant les lignes de courant de l'écoulement, obtenus à une fréquence de 15 Hz sont disponibles sur demande et pourront être exploités l'année prochaine pour perfectionner les travaux de modélisation et d'optimisation.

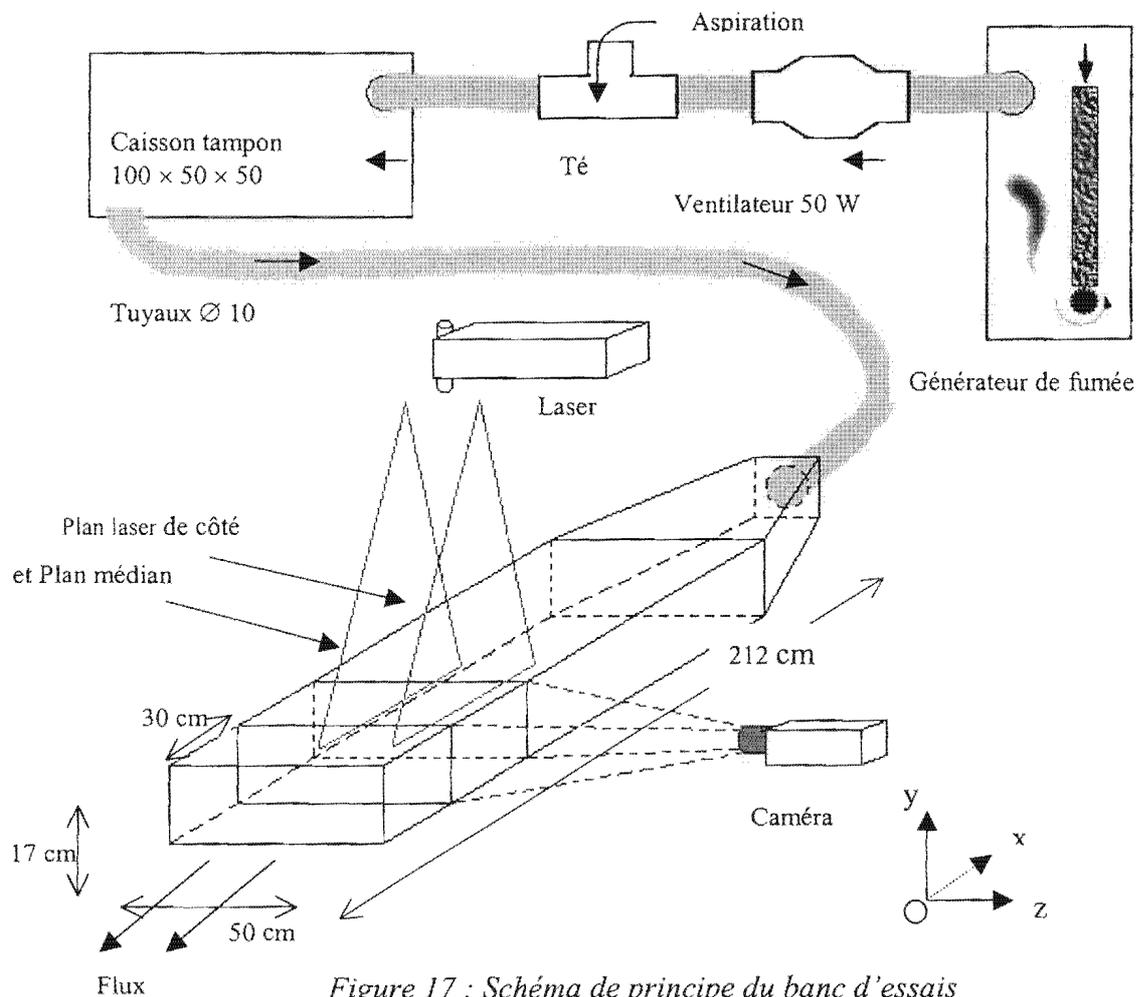


Figure 17 : Schéma de principe du banc d'essais

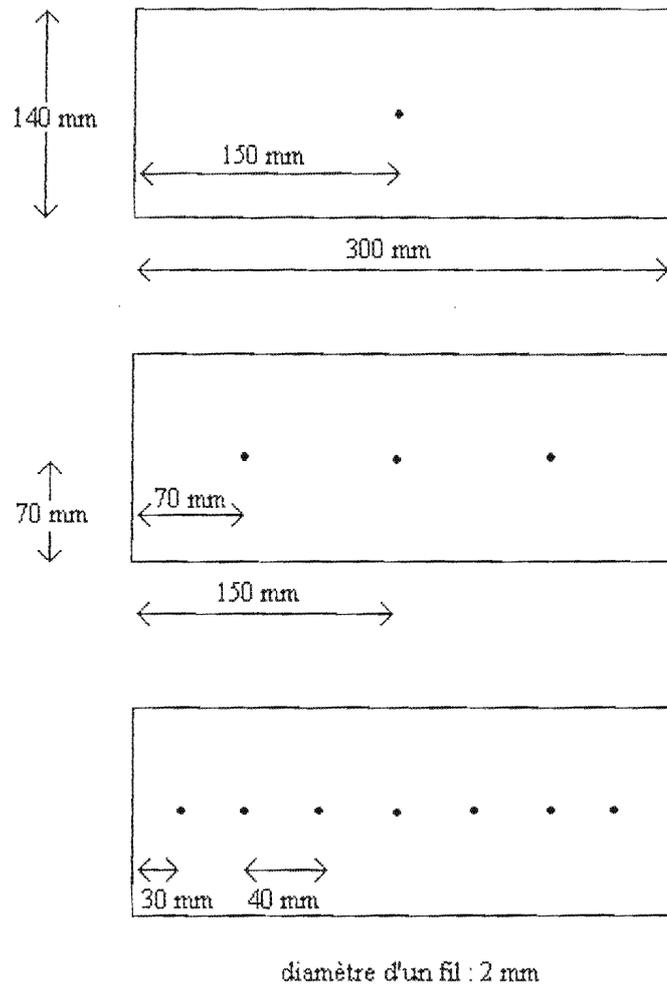


Figure 18 : Position des fils dans la maquette

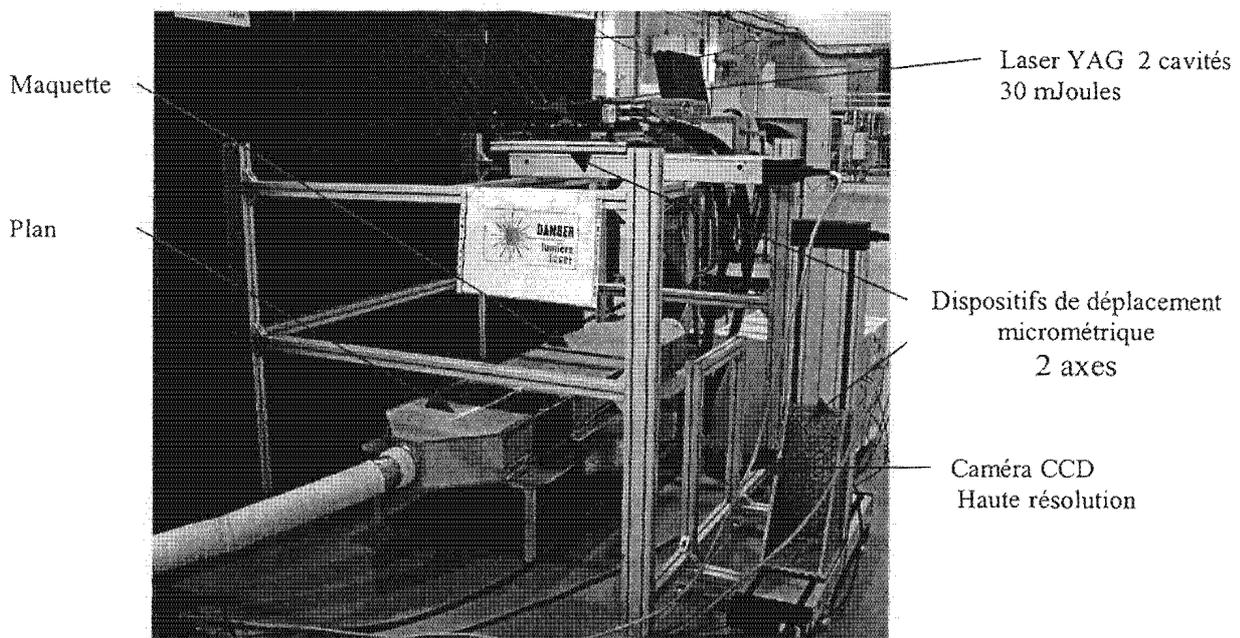


Figure 19: Vue générale du montage expérimental réalisé pour l'étude

Résultats

- cas 1 fil
 - 30 kV

Dans ce cas, les effets du champ électrostatique ne se font pas sentir. Les vecteurs vitesses sont parallèles à la frontière et ne sont pas du tout dévier par la présence du fil. L'intensité de la turbulence est quasiment uniforme dans l'ensemble du champ, exception faite d'une zone supérieure, où l'intensité lumineuse du laser est maximale, ce sont les effets de blooming qui perturbent probablement la mesure. Notons simplement une zone de petite taille à la verticale exacte du fil dans la zone d'impact où la « turbulence » augmente sensiblement.

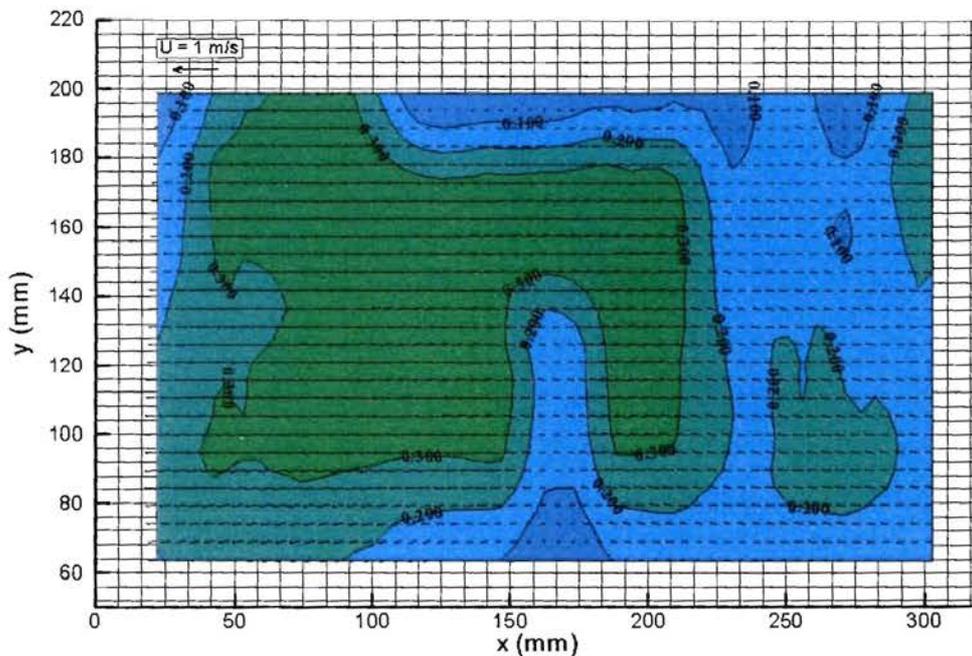


Figure 20 - Champs de vecteurs moyens et cartographie du module de la vitesse (m/s)

- 35 kV

A 35 kV les effets du champ électrostatique commencent à apparaître de manière significative. Le champ de vecteur présente un vortex bien organisé en amont du fil sous tension. A la verticale du fil, l'écoulement est franchement rabattu vers l'anode, tel un jet impactant une paroi.

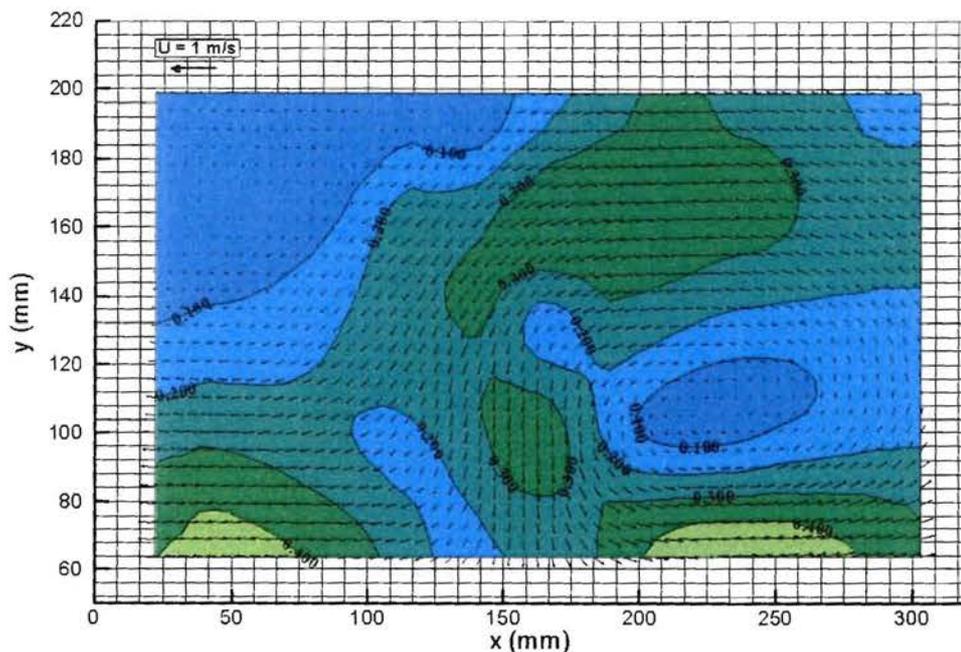


Figure 21 : Champs de vecteurs moyens et cartographie du module de la vitesse (m/s)

o 40 kV

L'image de la figure 22 correspond à une image instantanée de la caméra. Le sillage observé sur cette image est très instable et peut ne pas être présent.

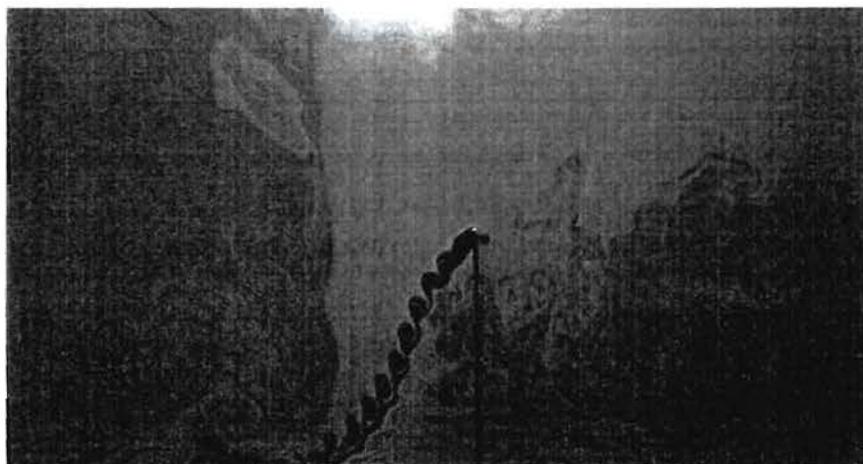


Figure 22 : Image instantanée de l'écoulement de la fumée

Sous ce potentiel, les effets électrostatiques sont plus marqués, sans pour autant être très différents par rapport au cas précédent. On observe toujours une forte déviation de l'écoulement vers l'anode et la présence du rouleau stationnaire en amont de celui-ci.

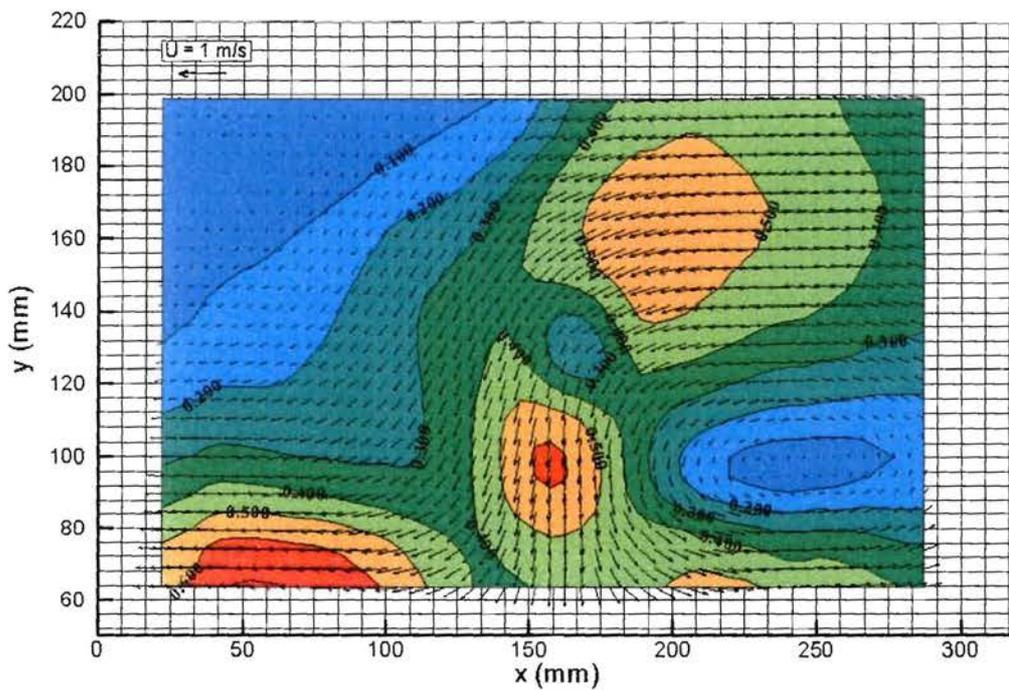


Figure 23 : Champs de vecteurs moyens et cartographie du module de la vitesse (m/s)

○ - 40 kV

En inversant le potentiel, la forme générale de l'écoulement reste globalement inchangée, à l'exception du vortex amont qui se positionne un peu plus haut et s'étire plus vers le fil de charge. Les niveaux de vitesses minimales et maximales sont à peu près identiques à ceux rencontrés précédemment.

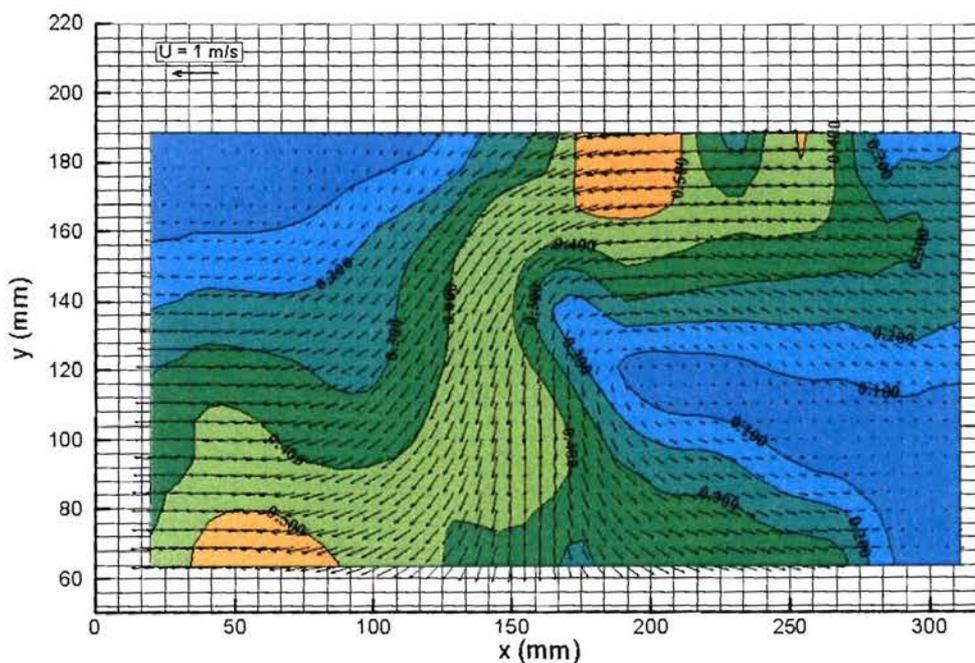
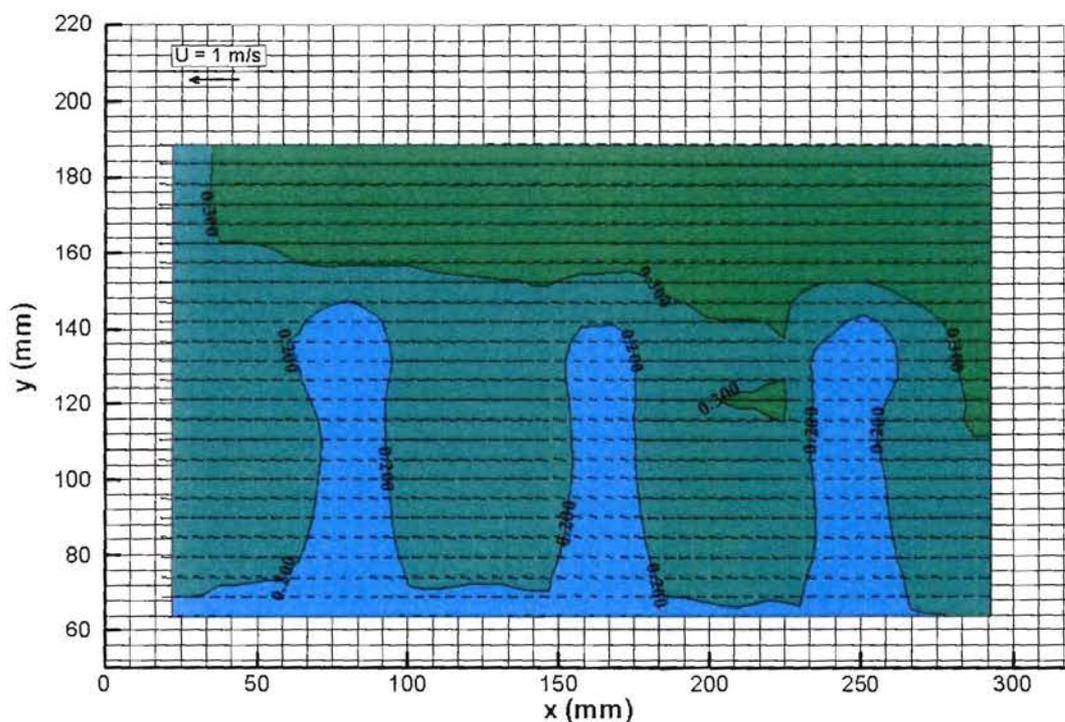


Figure 24 : Champs de vecteurs moyens et cartographie du module de la vitesse (m/s)

- cas 3 fils
 - 30 kV

Dans cette configuration, l'influence des trois fils est nettement visible mais les effets restent mineurs tant du point de vue du champ de vitesse que de l'intensité de la turbulence qui reste de l'ordre de grandeur de l'écoulement non électrisé.



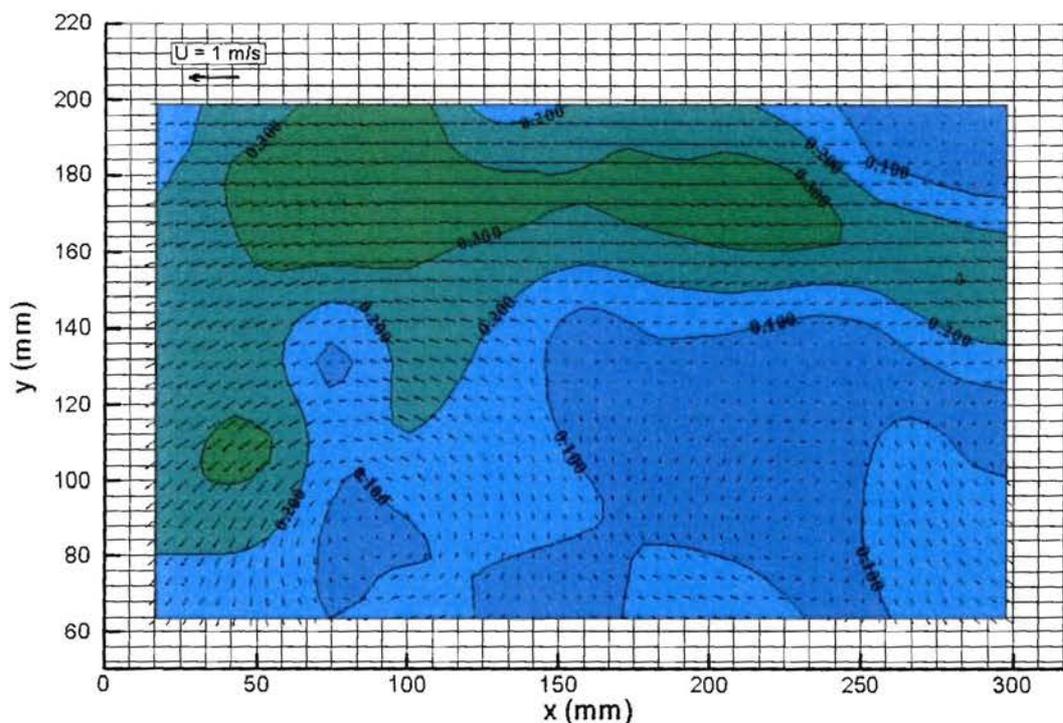


Figure 26 : Champs de vecteurs moyens et cartographie du module de la vitesse (m/s)

○ 40 kV

L'image de la figure 27 correspond à un « instantané » de la caméra. Le sillage observé sur cette image est très instable et peut ne pas être présent.



Figure 27 : Image instantanée de l'écoulement de la fumée – électrode 3 fils

A 40 kV, la déformation de l'écoulement est encore plus marquée qu'à 35 kV. La structure de l'écoulement est identique mais les vitesses en dehors des zones de recirculation sont un peu plus importantes. L'observation des films des lignes de courant montre une stabilité plus importante de l'écoulement au regard de l'écoulement moyen.

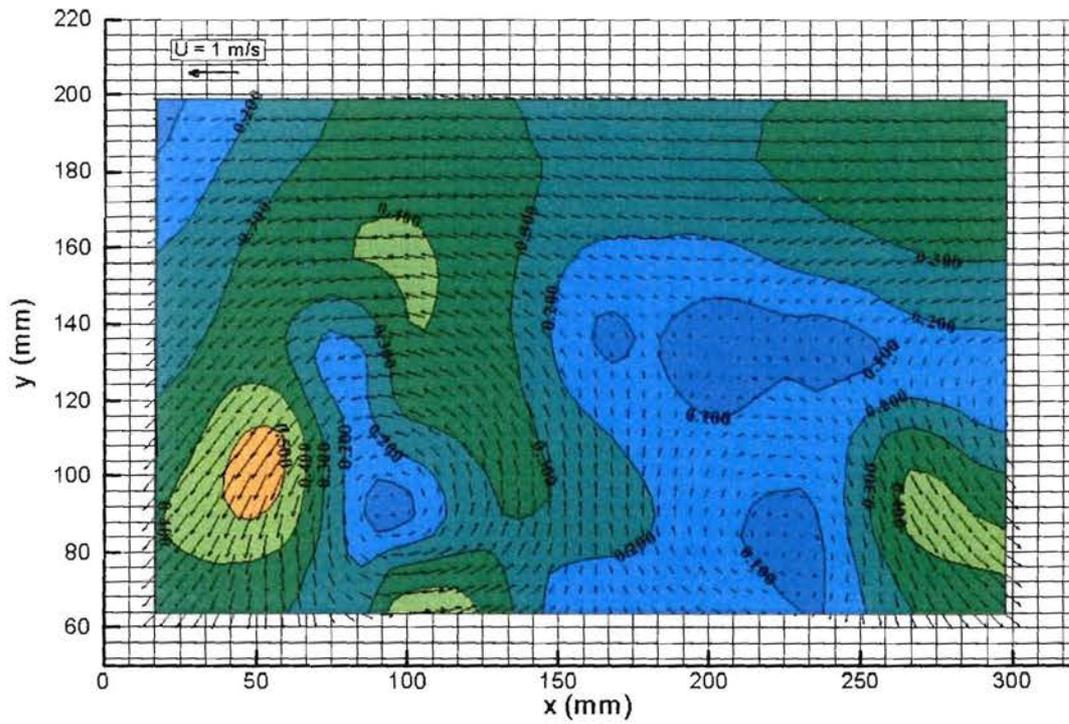


Figure 28 : Champs de vecteurs moyens et cartographie du module de la vitesse (m/s)

○ - 40 kV

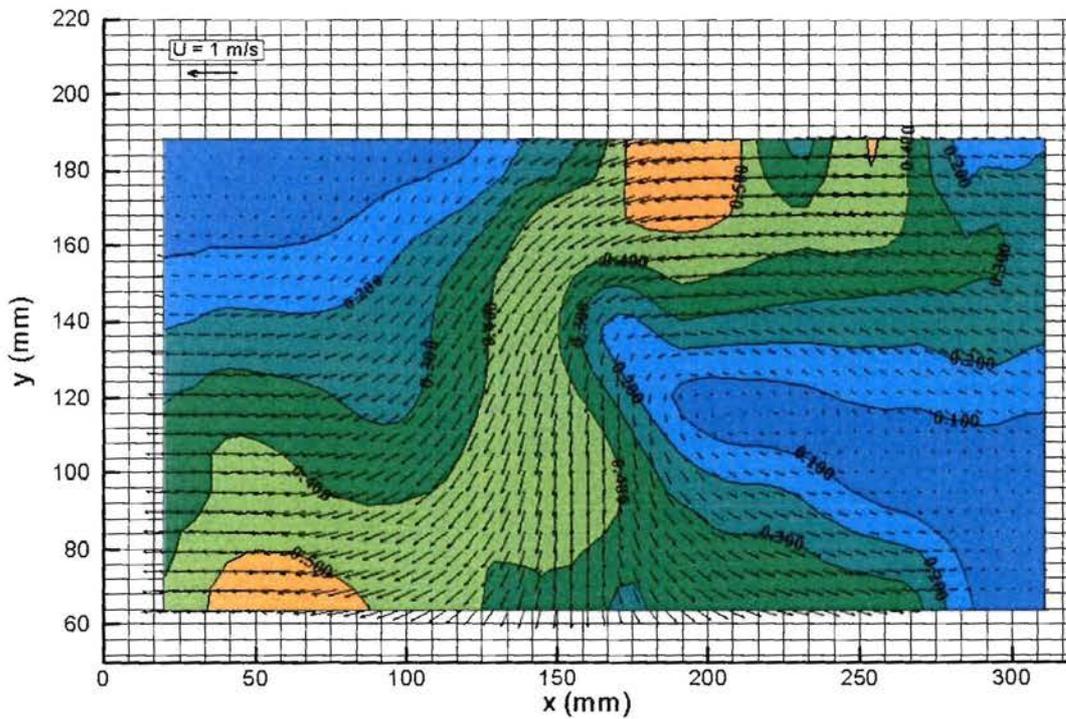


Figure 29 : Champs de vecteurs moyens et cartographie du module de la vitesse (m/s)

- cas 7 fils
 - 30 kV

A ce potentiel, les effets électrostatiques sont très faibles mais perceptibles à l’aplomb de chacun des fils.

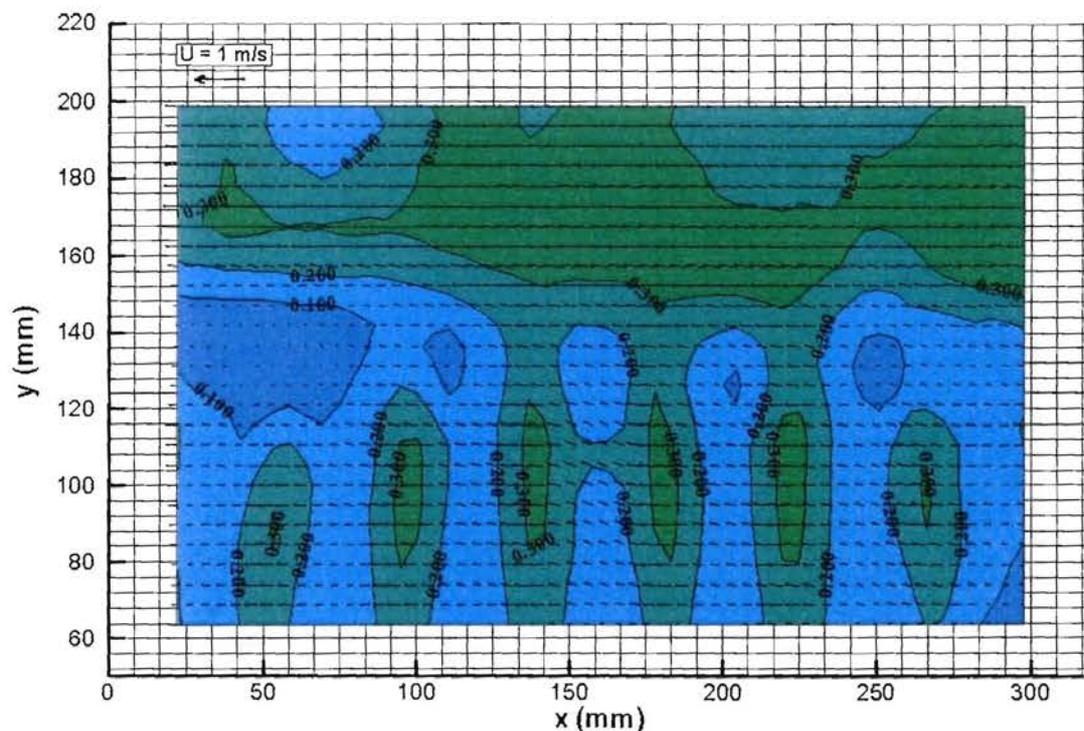


Figure 30 : Champs de vecteurs moyens et cartographie du module de la vitesse (m/s)

- 35 kV

L’effet du champ commence à se faire sentir sans toutefois perturber fortement l’écoulement. Deux zones se distinguent nettement. Une zone de vitesse plus importante apparaît dans la partie supérieure au plan des fils, les vitesses sont environ trois fois supérieures à celles du dessous de ce plan. Inversement les intensités de turbulence sont bien plus importantes dans la partie basse.

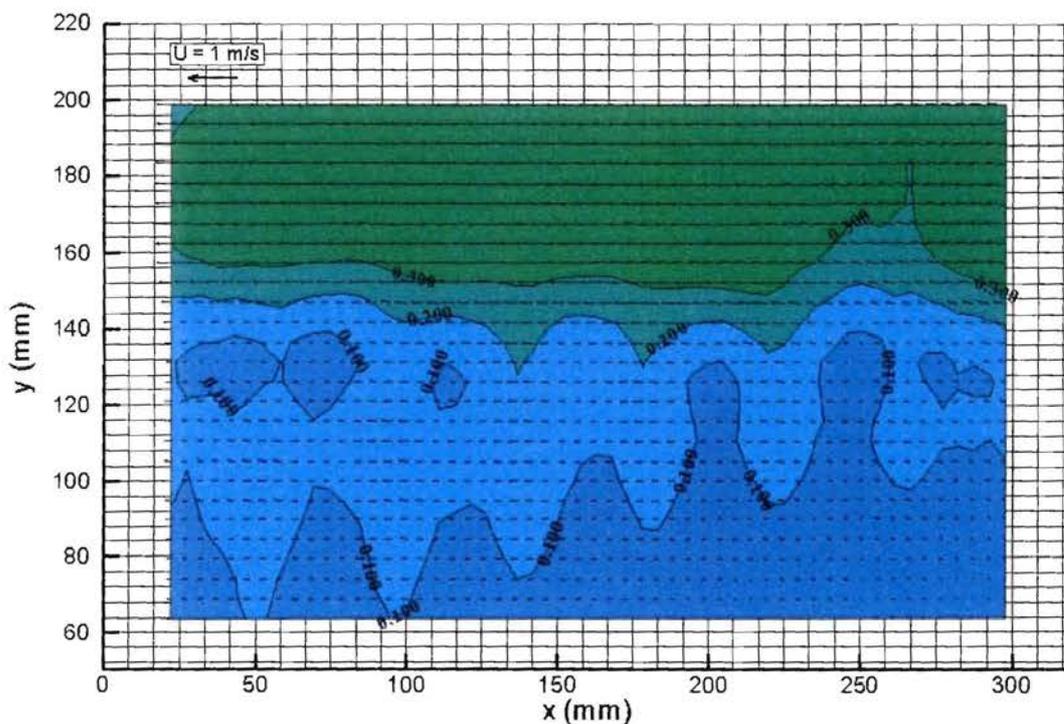


Figure 31 : Champ de vecteurs moyens et cartographie du module de la vitesse (m/s)

○ 40 kV

Dans ce cas, deux zones de vitesses se distinguent très nettement de part et d'autre du plan des fils. Une zone de survitesse apparaît dans la partie centrale supérieure.

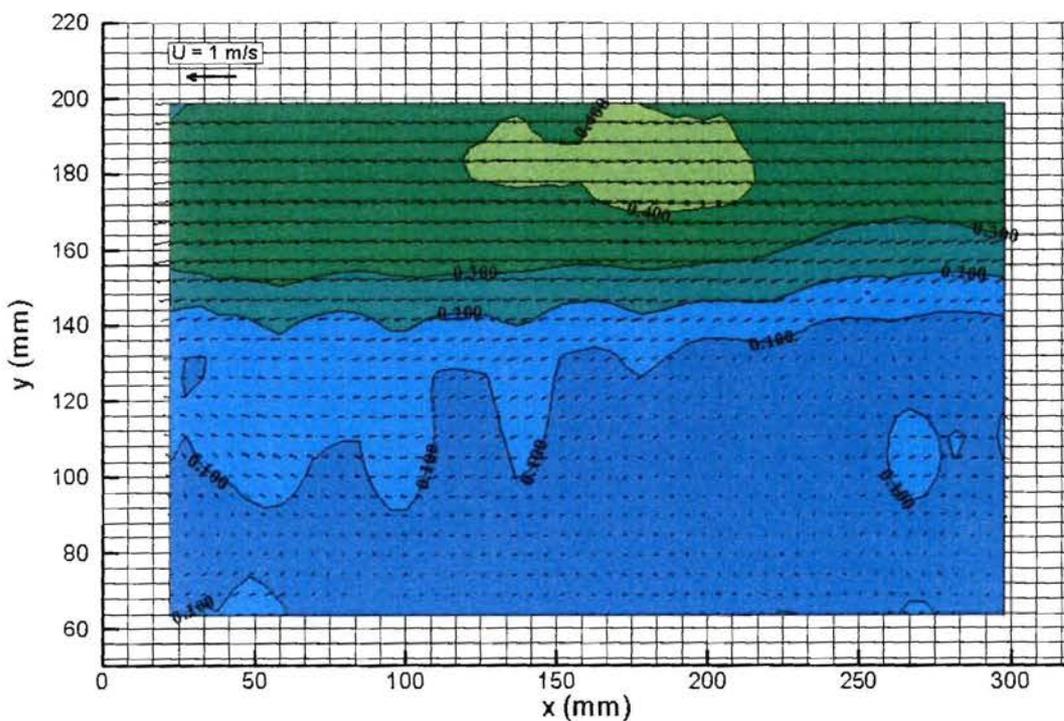


Figure 32 : Champ de vecteurs moyens et cartographie du module de la vitesse (m/s)

○ - 40 kV

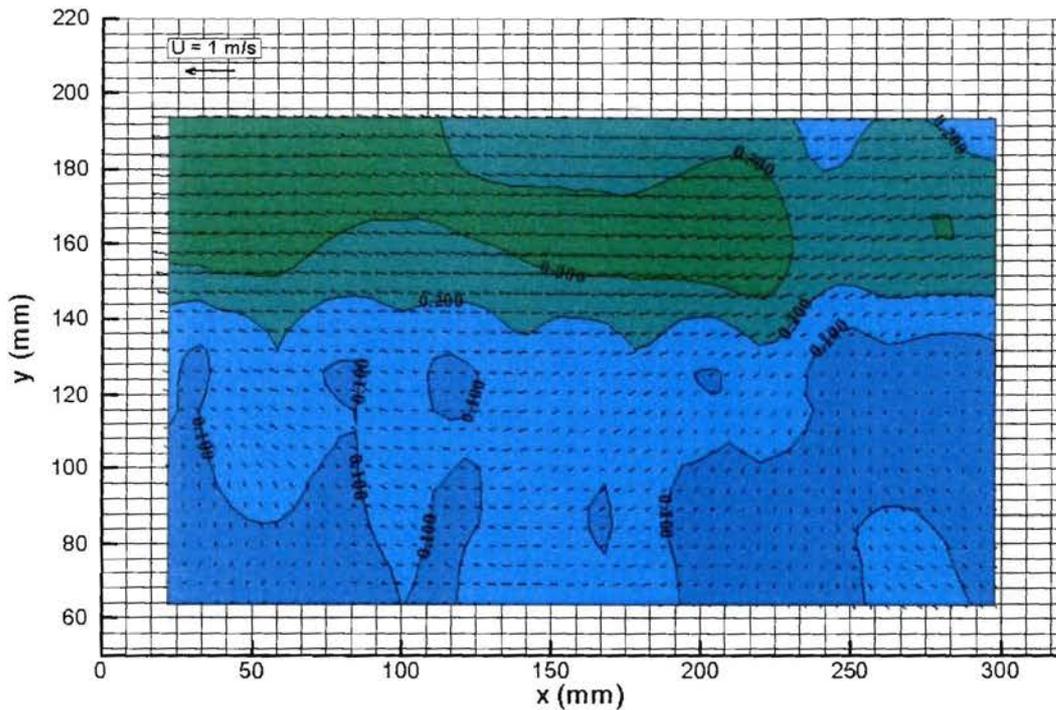


Figure 33 : Champ de vecteurs moyens et cartographie du module de la vitesse (m/s)

Les résultats du plan de côté ne sont pas présentés dans ce rapport d’avancement mais restent disponibles.

7/ Le codage et la résolution du modèle sous CFX

7-1/ Description de l’approche et des tests réalisés

Le premier codage que nous avons souhaité réaliser sous CFX consistait dans la résolution de l’équation de Laplace pour le calcul du champ électrique. Ce modèle totalement découplé est, bien évidemment, totalement irréaliste dans notre cas puisqu’il néglige le phénomène de charge ionique essentiel pour permettre la charge et la précipitation des particules.

Il s’agit dans ce cas de résoudre les équations suivantes $\vec{E} = -\vec{\nabla}\phi$ et $\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_j^2} = 0$ avec les

conditions aux limites appropriées. Nous comparerons le résultat à des résultats obtenus avec le logiciel Femlab dont l’utilisation est très aisée mais reste limitée à des problèmes simples.

Pour résoudre ce problème sous CFX, le solveur dispose d’une équation de transport scalaire de la forme :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(U_i^m \cdot \Phi - \Gamma_{\text{eff}}^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right) = 0$$

Cette équation n’est en fait pas si éloignée de l’équation résolvant le potentiel électrique. Il suffit juste de se placer en régime stationnaire et d’éliminer le terme de convection.

Ainsi, nous obtenons l’équation suivante : $\nabla \cdot (-\Gamma_{\text{eff}}^\Phi \nabla \Phi) = 0$

Pour pallier les inconvénients des phénomènes de turbulence sur le calcul du potentiel électrique, nous avons été obligés de fixer un nombre de prandlt turbulent très grand. En effet, le coefficient de diffusion effectif intervenant dans l'équation de transport est composé du coefficient de diffusion réel augmenté d'un coefficient de diffusion turbulente donné par la formule suivante :

$$\Gamma_{\text{eff}}^{\phi} = \epsilon_0 + \frac{\mu_t}{\sigma_t}$$

avec μ_t , la viscosité turbulente et σ_t , le nombre de prandlt turbulent. Ainsi, avec un très grand prandlt turbulent, on arrive à avoir un coefficient de diffusion turbulente quasi nul ou tout du moins totalement négligeable par rapport au coefficient de diffusion réel.

Le premier test effectué porte sur le cas de deux plaques parallèles, l'une à 40 kV, l'autre à 0 afin de vérifier la décroissance linéaire du potentiel dans ce cas.

La figure 34 suivante illustre parfaitement cette décroissance.

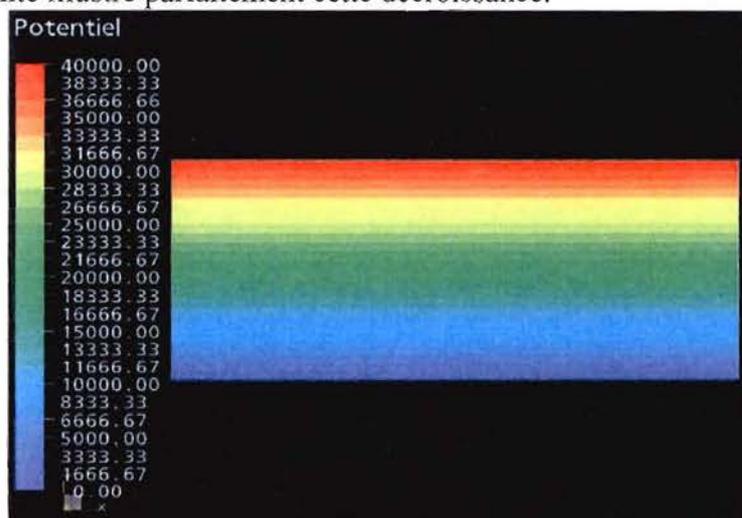


Figure 34 - Potentiel électrique - Cas 2 plaques

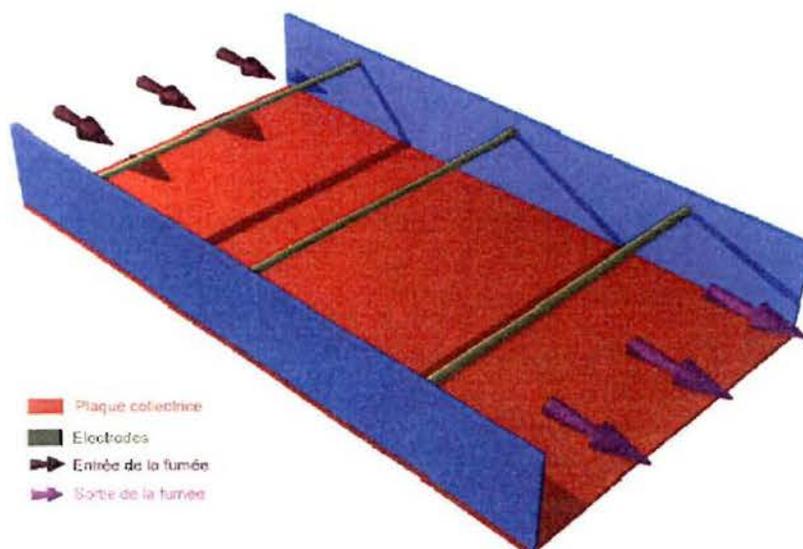


Figure 35 - géométrie une plaque – 3 fils

Puis dans le cas d'une géométrie proche de la seconde maquette PIV (cf. figure 35), nous obtenons la figure suivante :

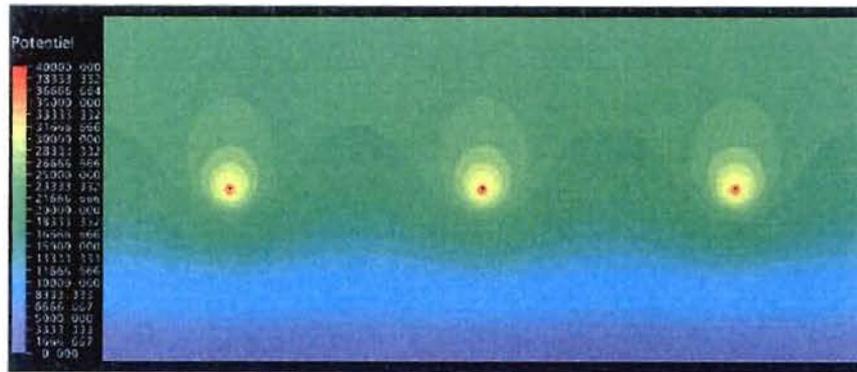


Figure 36 - Potentiel électrique - Cas d'une plaque collectrice- 3 fils

Les résultats obtenus avec Femlab pour des conditions aux limites identiques sont très proches, ce qui tend à valider les calculs.

L'étape suivante a porté sur l'incorporation d'une vitesse de glissement dans l'équation de transport de la phase dispersée en considérant le champ électrique E obtenu avec l'équation de Laplace et avec la valeur de charge particulière q_p instantanément égale à q_{max} , soit :

$$U_i^s = \frac{d_p \cdot \epsilon_0 \cdot \|\vec{E}\| \cdot E_i}{3 \cdot \mu} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right)$$

La vitesse du mélange est calculée par l'équation de Navier-Stokes en négligeant le vent ionique.



Figure 37 - Vitesse de glissement des particules

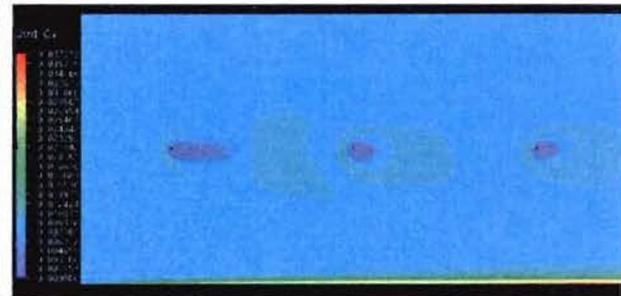


Figure 38 - Concentration en particules

Cette étape n'a pas posé de problème spécifique.

A l'étape suivante, nous avons cherché à enrichir le modèle en calculant l'équation de charge ionique ρ_{ion} mais en la découplant de la charge particulière ($q_p = q_{max}$ et donc $dq_p/dt = 0$). Cette valeur de ρ_{ion} est injectée ensuite dans le calcul du champ électrique E (équation de Poisson en négligeant la charge particulière). Nous réinjectons alors la valeur de E dans le calcul de la vitesse de glissement.

Néanmoins, le solveur de CFX ne semblait pas vouloir fournir de résultats cohérents pour la variable ρ_{ion} comme le montre la figure 39.

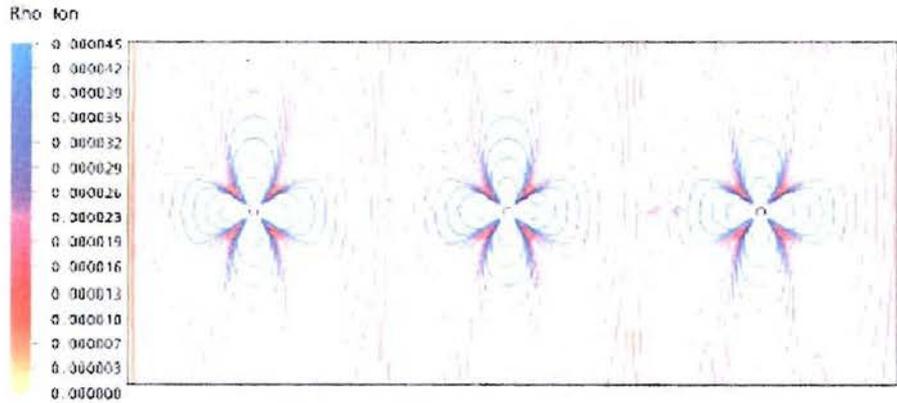


Figure 39 - Exemple de résultat aberrant sur ρ_{ion}

Pour mieux comprendre la nature du problème rencontré, nous avons choisi de résoudre le problème sur une géométrie simplifiée et de façon progressive.

Nous avons tout d’abord choisi de conserver la formulation implicite des équations de transport diffusion, notamment pour la contribution convective due au champ électrostatique. Nous avons cherché à implémenter un calcul sous la forme la plus réduite possible ne prenant en compte que le champ électrostatique.

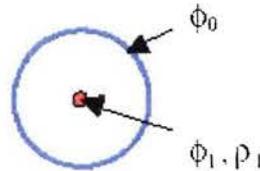
$$\nabla \cdot (\rho_{ion} (b_{ion} E)) = 0$$

$$\Delta \Phi = -\frac{\rho_{ion}}{\epsilon_0}$$

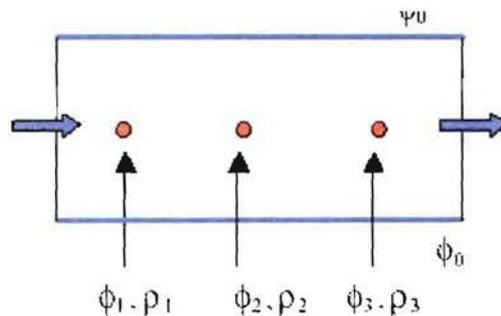
$$E = -\nabla \Phi$$

Deux cas de validation ont été retenus :

- [1] Electrode et cathode de formes cylindriques (R_0 : Rayon électrode 0.001m, R_1 : Rayon collecteur 0.1 m)



- [2] Electrodes entre deux plaques [Fletcher 98] (R_0 : Rayon électrode 0.001m, D_0 : 1/2 largeur canal 0.1 m, D_1 : Distance inter-électrodes 0.15 m, L : Longueur domaine 0.45 m)



avec la formulation des conditions aux limites suivante:

- Champ électrostatique : Electrodes et collecteur -> ϕ fixé, autres frontières (mur, entrées, sorties) -> flux nul

- Densité de charge ionique : Electrodes $\rightarrow \rho$ fixé, autres frontières (collecteurs, mur, entrées, sorties) $\rightarrow E \cdot \vec{n} \geq 0 \rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial n} = 0, E \cdot \vec{n} \leq 0 \rightarrow \rho = \rho_{fixé}$

Pour le cas [1], deux types de maillages ont été évalués sous CFX (cf. figures 40 et 41) :

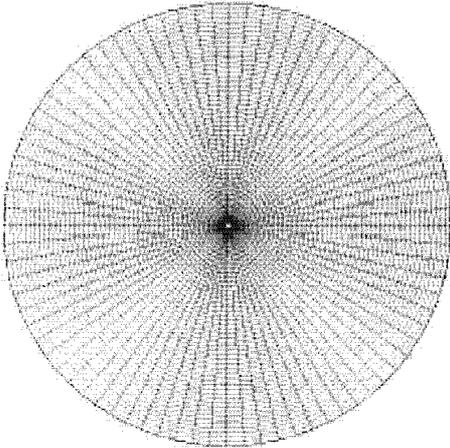
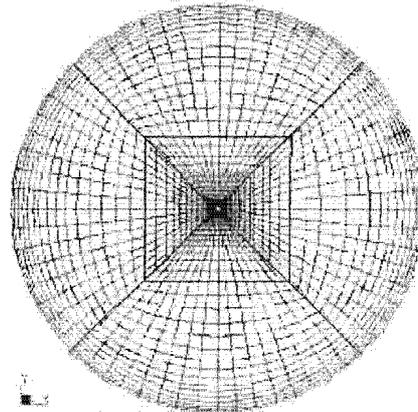


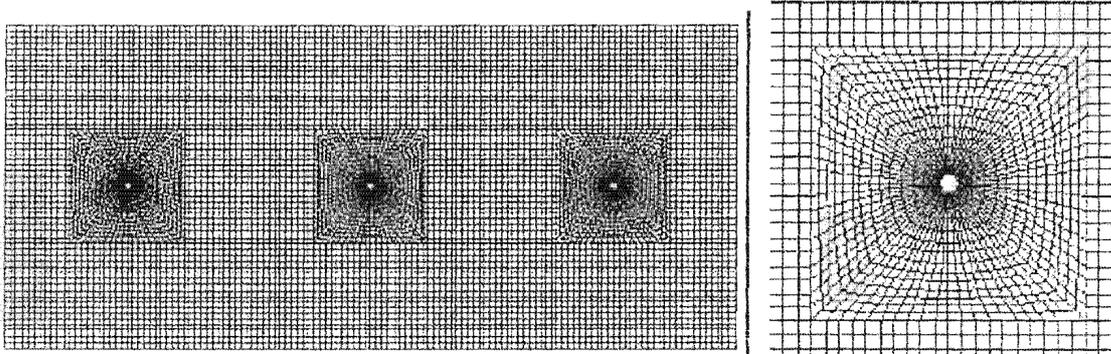
Figure 40 – Maillage rond - rond



Grille de calcul : 4488 éléments répartis dans 8 blocs

Figure 41 – Maillage rond – carré - rond

La géométrie rond – carré est indispensable pour l'étude du cas [2] (cf. figure 42), qui correspond à notre problématique principale.



Grille de calcul 9 Blocs 9000 éléments
Figure 42 – Maillage cas [2]

➤ [1a] Le cas le plus simple correspond au champ de vitesse donné uniforme, on a alors :

$$U_0 \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot \rho_{ion}) = 0$$

$$b_{ion} E_x = U_0 \cdot \cos(\alpha)$$

$$b_{ion} E_y = U_0 \cdot \sin(\alpha)$$

La forme résolue numériquement par CFX est la suivante :

$$\nabla \cdot ((b_{ion} E + U) \rho_{ion}) - \nabla \cdot (D_e \nabla \rho_{ion}) = 0$$

avec $D_e = 10^{-15}$, $b_{ion} = 2 \cdot 10^{-4}$ et $U = 0$ et, pour conditions aux limites dans les simulations :

$U_0 = 10$ m/s, $\rho_i = 1$ C/m³, Flux ionique à l'électrode donné par $\Phi_{ion}^1 = 2\pi R_1 U_0 \rho_i$

La solution analytique au problème ainsi posé est $\rho_{ion}(r) = \frac{\rho_i R_1}{r}$

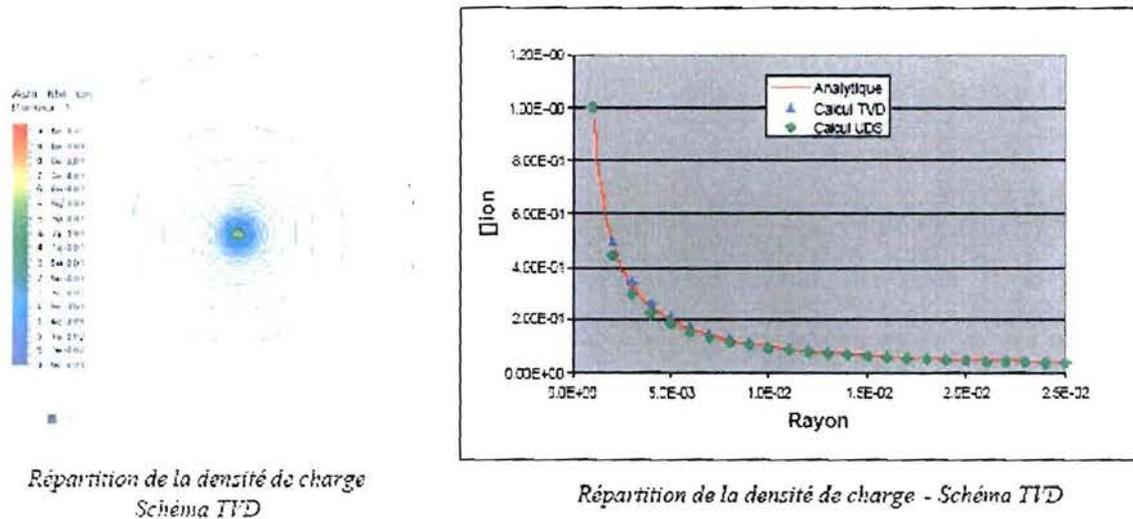


Figure 43– Solution du cas [1a]

Le calcul CFX fonctionne correctement aussi bien pour le maillage rond – rond que pour le maillage rond – carré – rond.

➤ [1b] Le problème est ensuite étendu au cas d'un champ de vitesse donné fonction de r

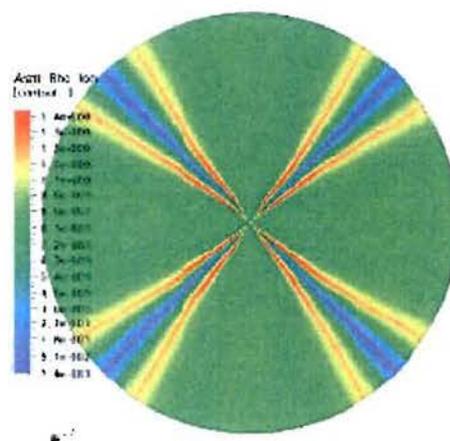
$$\frac{\partial}{\partial r}(r.b_{ion}\|E\|\rho_{ion}) = 0$$

$$b_{ion}E_x(r) = \frac{U_0.R_1}{r} \cos(\alpha)$$

$$b_{ion}E_y(r) = \frac{U_0.R_1}{r} \sin(\alpha)$$

La forme résolue par CFX est identique au cas précédent. Nous reprenons les mêmes conditions aux limites.

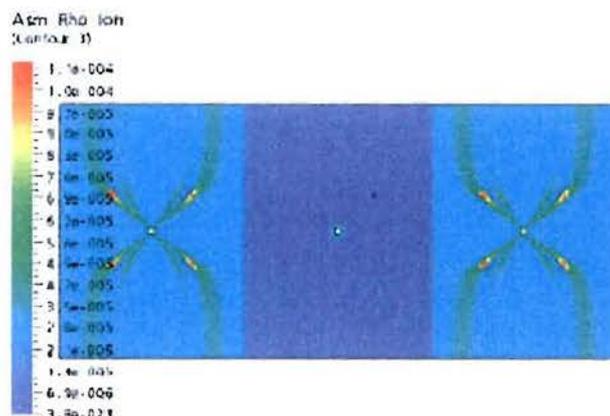
La solution analytique est dans ce cas : $\rho_{ion}(r) = \rho_I$. La solution numérique de CFX est représentée sur la figure 43 suivante :



Champ Ionique évalué à partir du champ de vitesse déduit

Figure 43 – Charge ionique, cas [1b]

Le même problème apparaît pour le cas [2], comme l'illustre la figure 44.

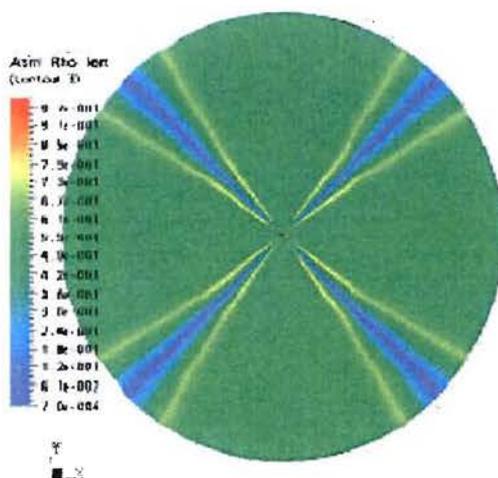


*Exemple de solution incorrecte sur le cas [2]
Fletcher*

Figure 44 – Charge ionique, cas [2]

Ce problème nous a fortement retardé pour l’obtention d’une résolution numérique cohérente.

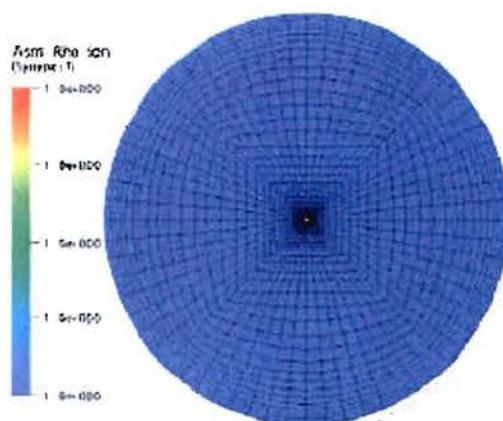
La première amélioration du calcul a consisté en l’introduction de la logique UDS dans l’interpolation des flux électrostatiques. Si cette correction évite l’apparition de valeur irréaliste, elle ne permet pas d’obtenir de solution cohérente (cf. figure 45).



Champ Ionique – Interpolation sous règle UDS

Figure 45 - Charge ionique après interpolation UDS, cas [1b]

D’où une seconde modification qui réintroduit une contrainte de continuité dans l’équation de transport diffusion de la densité de charge. Cette modification permet d’obtenir ainsi une solution cohérente (cf. figure 46).



Champ Ionique – Formulation consistante

Figure 46 – Charge ionique après régularisation conservative, cas [1b]

- [1c] Nous avons ensuite testé le cas d'un champ électrostatique et ionique découplé en conservant les modifications précédentes.

$$\frac{\partial}{\partial r}(rb_{ion}E_r\rho_{ion}) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial r}(r\epsilon_0\frac{\partial\phi}{\partial r}) = 0$$

$$E_r = -\frac{\partial\phi}{\partial r}$$

La forme résolue numériquement sous CFX est la suivante :

$$\nabla \cdot ((b_{ion}E + U)\rho_{ion}) - \nabla \cdot (D_e \nabla \rho_{ion}) = 0$$

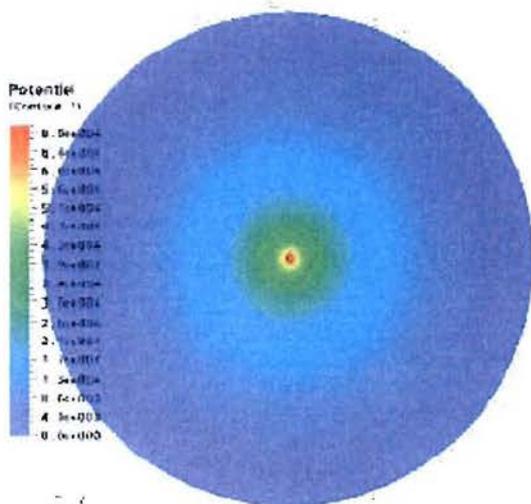
avec $D_e = 10^{-15}$, $b_{ion} = 2 \cdot 10^{-4}$ et $U = 0$

et $\nabla \cdot (\epsilon_0 \nabla \phi) = 0$ avec $\epsilon_0 = 8,8572 \cdot 10^{-12}$

Les conditions aux limites sont $\rho_i = 1 \text{ C/m}^3$, et le flux ionique à l'électrode donné par $\Phi_{ion}^1 = 2\pi R_0 \rho_i b_{ion} E_1 \cdot \vec{n}$ avec E_i évalué dans les cellules frontières, et $\phi_l = 70 \text{ kV}$ et $\phi_0 = 0$.

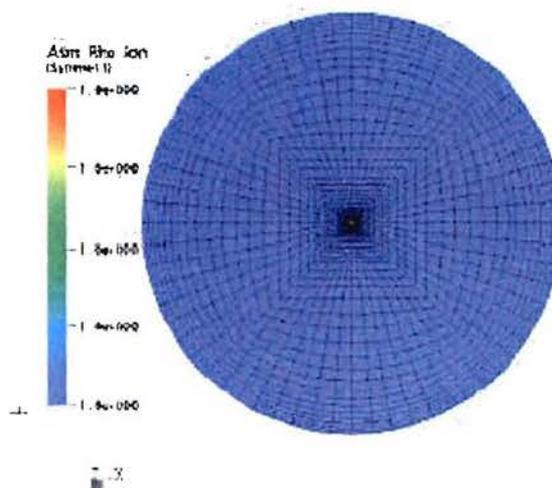
La solution analytique dans ce cas est $\rho_{ion}(r) = \rho_i$ et $\phi_l = a \ln(r) + b$.

La résolution sous CFX fournit les résultats suivants (cf. figures 47 et 48) :



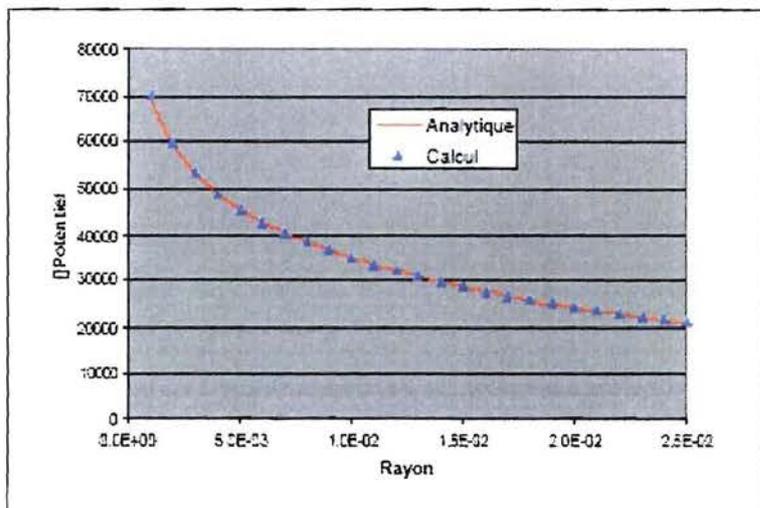
Potentiel

Figure 47 – Potentiel, cas [1c]



Densité de charge ionique

Figure 48- Charge ionique, cas [1c]



Evolution du potentiel

Figure 49- Comparaison solution analytique et calcul sur le potentiel, cas [1c]

Les résultats restent parfaitement consistants avec des conditions aux limites plus complexes comme l'illustre la figure 50 avec les conditions aux limites suivantes : $\rho_i = 1 \text{ C/m}^3$ de $\pi/2$ à 2π et $\rho_i = 0 \text{ C/m}^3$ de 0 à $\pi/2$.

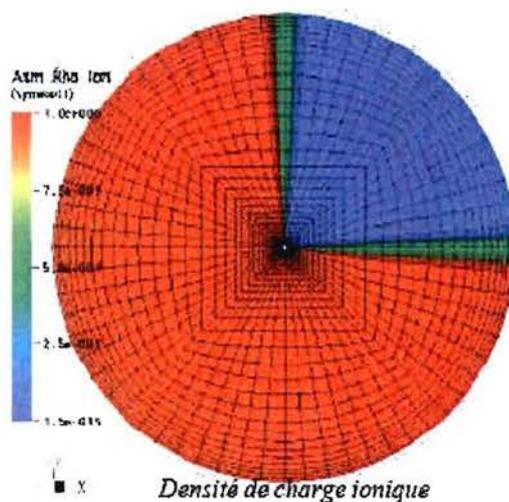


Figure 50- Charge ionique, cas [1c] avec conditions initiales particulières

➤ [1d] Nous avons poursuivi nos tests dans le cas d'un champ électrostatique et ionique non couplé, le champ électrostatique étant déterminé par une équation de Poisson

$$\frac{\partial}{\partial r}(rb_{ion}E_r\rho_{ion}) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial r}(r\epsilon_0 \frac{\partial \phi}{\partial r}) = P$$

$$E_r = -\frac{\partial \phi}{\partial r}$$

La forme résolue numériquement sous CFX est la suivante :

$$\nabla \cdot ((b_{ion}E + U)\rho_{ion}) - \nabla \cdot (D_e \nabla \rho_{ion}) = 0$$

avec $D_e = 10^{-15}$, $b_{ion} = 2 \cdot 10^{-4}$ et $U = 0$

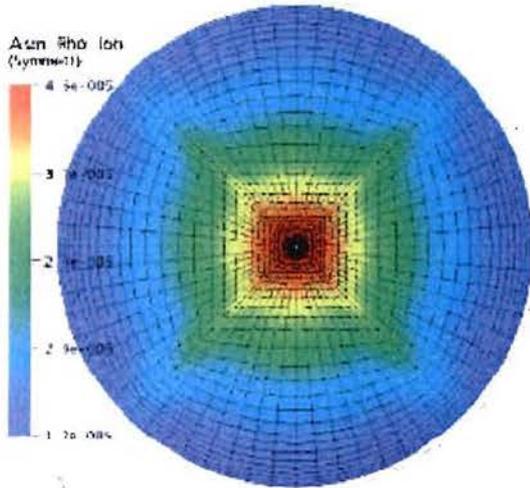
et $\nabla \cdot (\epsilon_0 \nabla \phi) = P$ avec $\epsilon_0 = 8,8572 \cdot 10^{-12}$ et $P = 6 \cdot 10^{-5}$

Les conditions aux limites sont $\rho_i = 45,7 \mu\text{C}/\text{m}^3$, et le flux ionique à l'électrode donné par $\Phi_{ion}^1 = 2\pi R_0 \rho_i b_{ion} E_1 \cdot \vec{n}$ avec E_i évalué dans les cellules frontières, et $\phi_l = 70 \text{ kV}$ et $\phi_0 = 0$.

La solution analytique dans ce cas est $\phi(r) = \frac{P}{4\epsilon_0} r^2 + a \ln(r) + b$ et $\rho_{ion}(r_{l+1}) = \frac{\rho_i r_l E_{r_l}}{r_{l+1} E_{r_{l+1}}}$ avec

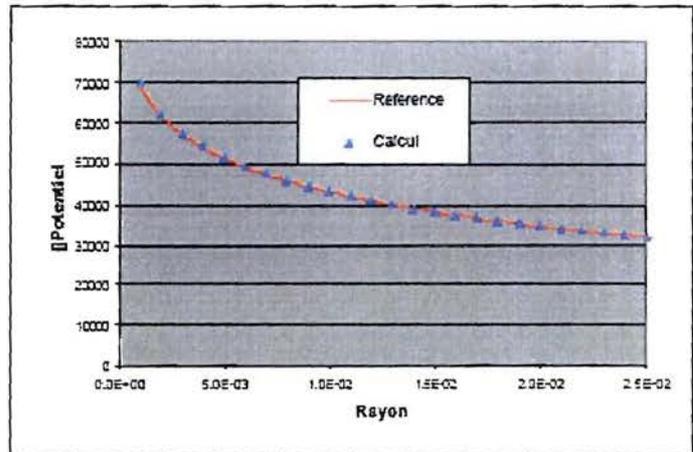
$$\rho_{ion}(r_l) = \rho_i \text{ et } E_r = -b_{ion} \frac{\partial \phi}{\partial r}.$$

Les résultats CFX sont les suivants (cf. figures 51 et 52) :



Densité de charge ionique - $P = 6 \cdot 10^{-3}$

Figure 51- Charge ionique, cas [1d]



Evolution du potentiel - $P = 6 \cdot 10^{-3}$

Figure 52- Potentiel, cas [1d]

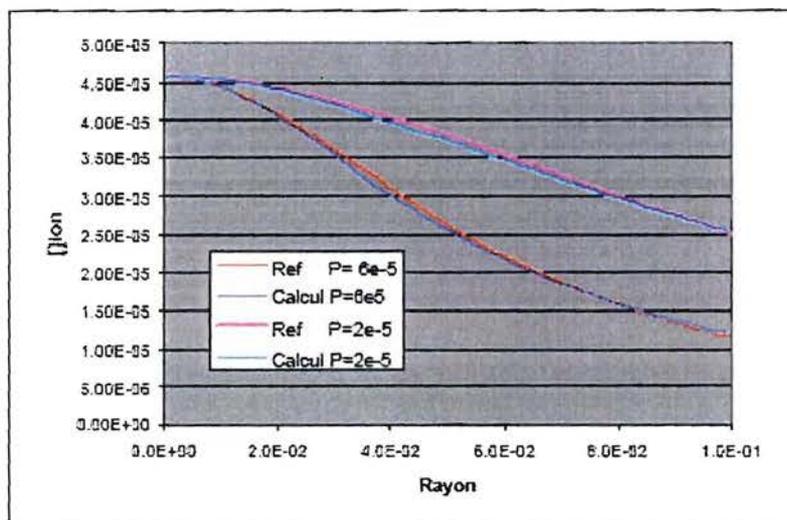


Figure 53- Comparaison solution analytique et calcul sur la charge ionique, cas [1d]

➤ [1e] L'étape suivante consiste à étudier le cas du champ électrostatique et ionique couplé

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r}(r b_{ion} E_r \rho_{ion}) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial r}(r \epsilon_0 \frac{\partial \phi}{\partial r}) &= \rho_{ion} \\ E_r &= -\frac{\partial \phi}{\partial r} \end{aligned}$$

La forme résolue numériquement sous CFX est la suivante :

$$\nabla \cdot ((b_{ion} E + U)\rho_{ion}) - \nabla \cdot (D_e \nabla \rho_{ion}) = 0$$

avec $D_e = 10^{-15}$, $b_{ion} = 2 \cdot 10^{-4}$ et $U = 0$

et $\nabla \cdot (\epsilon_0 \nabla \phi) = \rho_{ion}$ avec $\epsilon_0 = 8,8572 \cdot 10^{-12}$ et $P = 6,10^{-5}$

Les conditions aux limites sont $\rho_i = 45,7 \mu C/m^3$, et le flux ionique à l'électrode donné par $\Phi_{ion}^1 = 2\pi R_0 \rho_i b_{ion} E_1 \cdot \vec{n}$ avec E_i évalué dans les cellules frontières, et $\phi_l = 70$ kV et $\phi_0 = 0$.

Une solution analytique complexe (non présentée ici) existe. Elle sera comparée aux résultats numériques de CFX (cf. figures 54, 55 et 56).

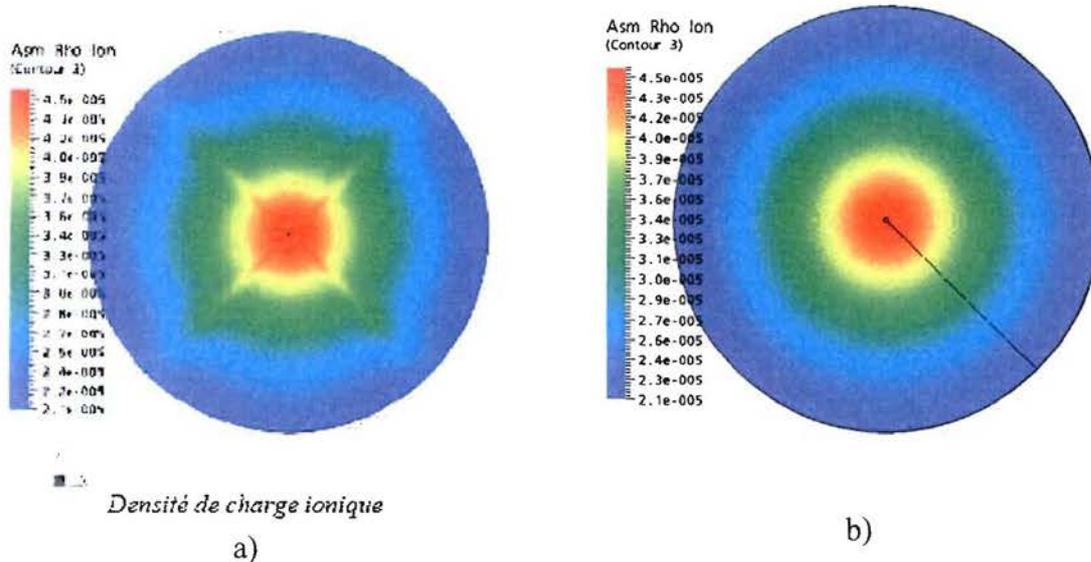
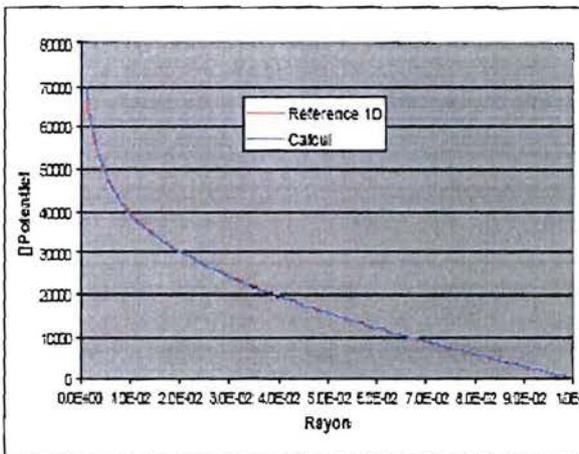
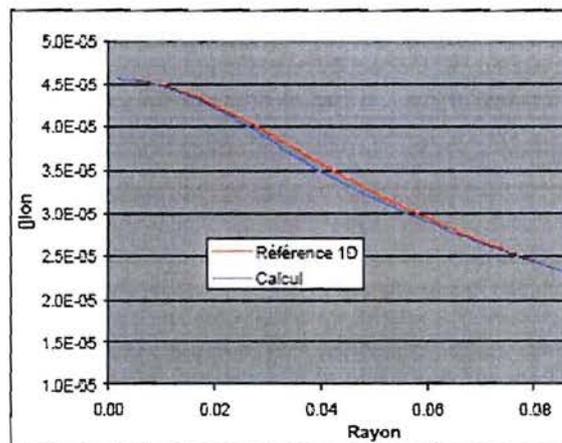


Figure 54- Charge ionique, cas [1e] a) maillage rond-carré-rond b) maillage rond-rond



Evolution du potentiel
Figure 55-Potentiel, cas[1e]



Evolution de la densité de charge ionique
Figure 56- Charge ionique, cas [1e]

- [2a] Nous poursuivons notre étude avec le cas du champ électrostatique et ionique non couplé, et le champ électrostatique déterminé par une équation de Laplace

La forme résolue numériquement sous CFX est la suivante :

$$\nabla \cdot ((b_{ion} E + U)\rho_{ion}) - \nabla \cdot (D_e \nabla \rho_{ion}) = 0$$

avec $D_e = 10^{-15}$, $b_{ion} = 2 \cdot 10^{-4}$ et $U = 0$

et $\nabla \cdot (\epsilon_0 \nabla \phi) = 0$ avec $\epsilon_0 = 8,8572 \cdot 10^{-12}$

Les conditions aux limites sont $\rho_1 = 1 \text{ C/m}^3$, $\rho_2 = 0 \text{ C/m}^3$, $\rho_3 = 1 \text{ C/m}^3$ et le flux ionique aux électrodes donné par $\Phi_{ion}^i = 2\pi R_0 \rho_i b_{ion} E_i \cdot \vec{n}$ avec E_i évalué dans les cellules frontières, $\phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = 70 \text{ kV}$ et $\phi_0 = 0$, aux parois et conditions d'entrée et de sortie : $\frac{\partial \rho}{\partial n} = 0$, aux Entrée – sortie $\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$.

Solution attendue : Les conditions aux limites génèrent un champ électrostatique cellulaire organisé autour de chaque électrode. L'équation de transport ne se réduisant qu'à une simple équation de continuité doit, en raison des densités de charge imposées aux électrodes, conduire à trois zones centrées autour de chaque électrode, de densité égale respectivement à 1,0,1.

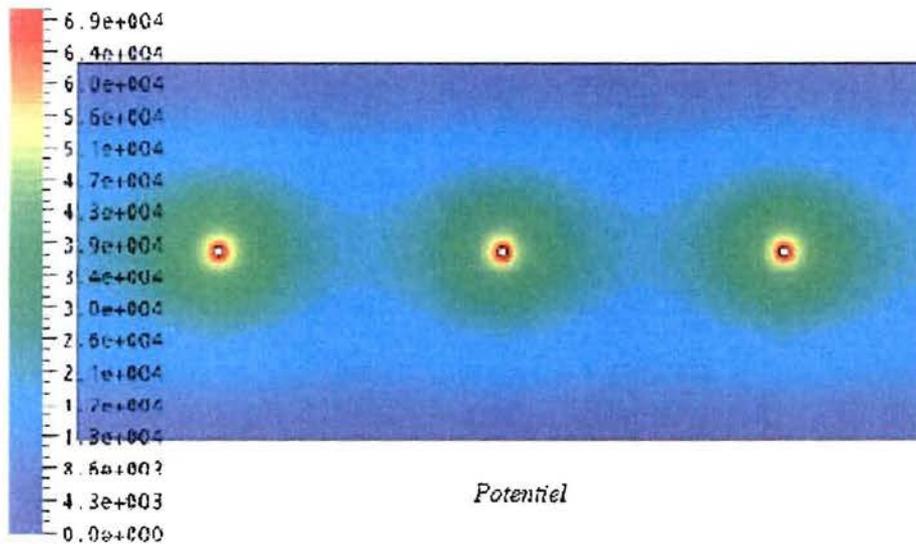


Figure 57- Potentiel, cas [2a]

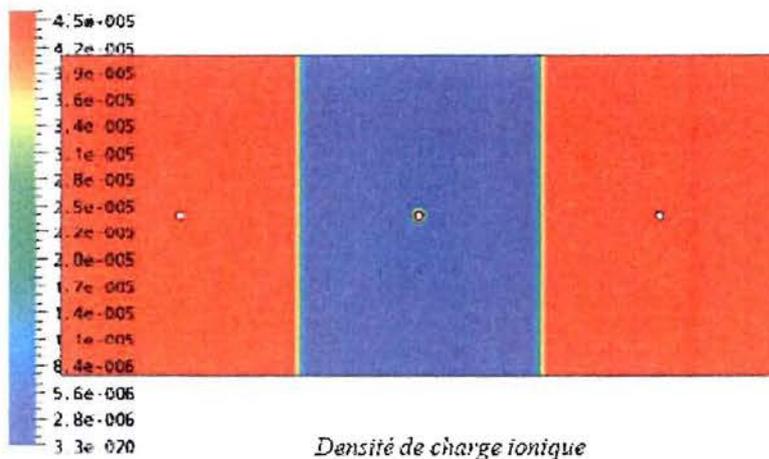


Figure 58- Charge ionique, cas [2a]

Dans ce cas, nous obtenons bien les solutions escomptées (cf. figures 57 et 58).

- [2b] Enfin, le dernier cas étudié avant d'aborder la programmation complète du modèle est le cas du champ électrostatique et ionique couplé

La forme résolue numériquement sous CFX est la suivante :

$$\nabla \cdot ((b_{ion} E + U) \rho_{ion}) - \nabla \cdot (D_e \nabla \rho_{ion}) = 0$$

avec $D_e = 10^{-15}$, $b_{ion} = 2 \cdot 10^{-4}$ et $U = 0$

et $\nabla \cdot (\epsilon_0 \nabla \phi) = \rho_{ion}$ avec $\epsilon_0 = 8,8572 \cdot 10^{-12}$ et $P = 6 \cdot 10^{-5}$

Les conditions aux limites sont $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = 45,7 \mu\text{C}/\text{m}^3$, et le flux ionique aux électrodes donné par $\Phi_{ion}^i = 2\pi R_0 \rho_i b_{ion} E_i \cdot \vec{n}$ avec E_i évalué dans les cellules frontières, $\phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = 70$

kV et $\phi_0 = 0$, aux parois et conditions d'entrée et de sortie : $\frac{\partial \rho}{\partial n} = 0$, aux Entrée - sortie

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0.$$

Nous obtenons les résultats suivants avec notre programmation sous CFX (cf. figures 59 et 60) :

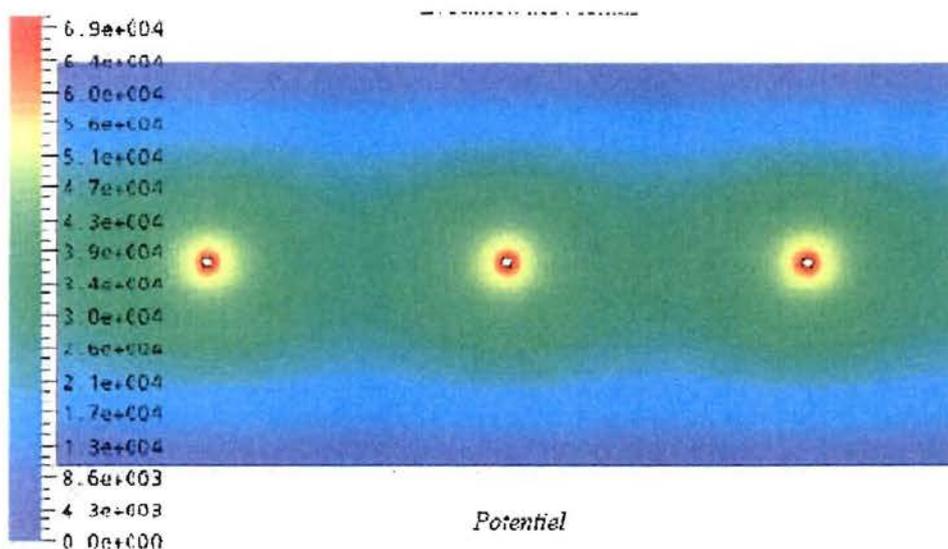


Figure 59- Potentiel, cas [2b]

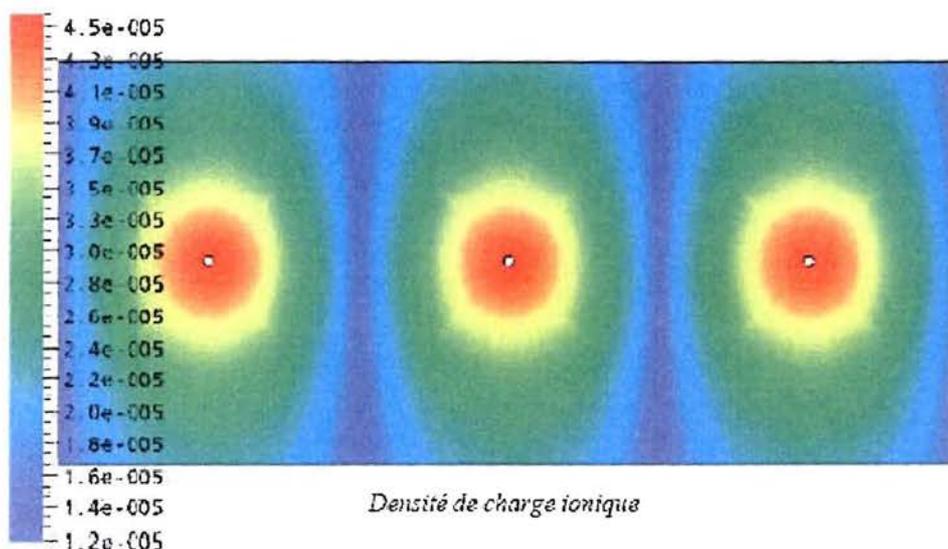


Figure 60- Charge ionique, cas [2b]

Nous obtenons ainsi une solution cohérente à notre problème. Nous pouvons alors entreprendre la programmation complète sous CFX de notre modèle présenté en section 5.

7-2/ Les principaux éléments du codage

Nous allons illustrer dans cette partie la méthode des volumes finis à l'équation de la charge particulaire, afin de voir comment coder et résoudre cette équation avec CFX.

L'équation de continuité de la charge particulaire est de la forme :

$$\frac{\partial [N_p^k] q_p^k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((U_j + u_{s_k}) [N_p^k] q_p^k - D_p \left(\frac{\partial [N_p^k] q_p^k}{\partial x_j} \right) \right) = [N_p^k] \frac{dq_p^k}{dt}$$

En appliquant la loi de Cross, il vient : $\frac{dq_p^k}{dt} = \frac{1}{\tau_E \times q_p^{\max}} (q_p^{\max} - q_p)^2$

D'où, comme $\tau_E = \frac{4 \epsilon_0}{\rho_{ion} \times b_{ion}}$, il vient :

$$\frac{\partial [N_p^k] q_p^k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((U_j + u_{s_k}) [N_p^k] q_p^k - D_p \left(\frac{\partial [N_p^k] q_p^k}{\partial x_j} \right) \right) = [N_p^k] \frac{\rho_{ion} \times b_{ion} \times q_p^{\max}}{4 \epsilon_0} \left(1 - \frac{q_p^k}{q_p^{\max}} \right)^2$$

Et l'expression de la vitesse de glissement est :

$$u_{s_k} = \frac{q_p \cdot E_i}{3 \pi \cdot \mu \cdot d_p}$$

D'où l'équation de continuité, en régime stationnaire :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(U_j + \frac{q_p \cdot E_j}{3 \pi \cdot \mu \cdot d_p} \right) [N_p^k] q_p^k - D_p \left(\frac{\partial [N_p^k] q_p^k}{\partial x_j} \right) \right) = [N_p^k] \frac{\rho_{ion} \times b_{ion} \times q_p^{\max}}{4 \epsilon_0} \left(1 - \frac{q_p^k}{q_p^{\max}} \right)^2$$

Le solveur de CFX peut résoudre une équation de transport de la forme :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(U_j^m \cdot \Phi - \Gamma_{eff} \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \right) = S$$

Les correspondances sont donc les suivantes :

Variable physique du problème	Variable codée sous CFX
$[N_p^k] q_p^k$	ϕ
D_p	Γ_{eff}
$U_j + \frac{q_p E_j}{3 \pi \cdot \mu \cdot d_p}$	U_j^m
$[N_p^k] \frac{\rho_{ion} \times b_{ion} \times q_p^{\max}}{4 \epsilon_0} \left(1 - \frac{q_p^k}{q_p^{\max}} \right)^2$	S

Il suffit donc d'ajouter la vitesse de glissement et le terme source pour résoudre notre équation. Nous résolvons de plus l'équation en régime stationnaire.

Par l'intermédiaire de la routine USRSLP dont un extrait est fourni en annexe 4, il est donc possible d'ajouter le terme correspondant à la vitesse de glissement ; ces quelques lignes de commande sont incluses dans le fichier source usrsfp.f. Nous savons que :

$$u_{s_k} = \frac{q_p \cdot E_i}{3 \pi \cdot \mu \cdot d_p} \text{ et } q_p^{\max} = \frac{3 \pi \epsilon_0 \epsilon_r \| \vec{E} \| d_p^2}{\epsilon_r + 2}, \text{ d'où le calcul de la constante CONST1, le calcul du}$$

module du champ électrique et l'expression des trois composantes de la vitesse de glissement :

```
CONST1 = PERM0*(1.D0+2.D0*(PPERMR(ISP)-1.D0)/(PPERMR(ISP)+2.D0))*DIAM/(3.D0*VISC)
E_XYZ=SQRT(SCAL(INODE,IPHASE,IEX)**2+SCAL(INODE,IPHASE,IEY)**2+
            SCAL(INODE,IPHASE,IEZ)**2)
```

```
SLIPX(INODE,ISP) = CONST1*SCAL(INODE,IPHASE,IEX)*E_XYZ
SLIPY(INODE,ISP) = CONST1*SCAL(INODE,IPHASE,IEY)*E_XYZ
SLIPZ(INODE,ISP) = CONST1*SCAL(INODE,IPHASE,IEZ)*E_XYZ
```

Pour coder le terme source, il faut connaître la façon dont CFX discrétise ce type d'équations et sous quelle forme est représenté le terme source.

C'est la méthode utilisée par CFX pour résoudre des équations aux dérivées partielles. Le domaine étudié est divisé en un nombre fini de sous-domaines, les volumes de contrôles, puis il faut intégrer sur chaque volume l'équation à résoudre. Les gradients entre les volumes de contrôle sont calculés par des méthodes de différences finies.

On obtient alors un système linéaire qu'il est possible de résoudre par plusieurs méthodes, notamment grâce à la forme particulière de la matrice, qui est tri-diagonale en une dimension, penta-diagonale en 2 dimensions ou hepta-diagonale en 3 dimensions.

Nous divisons donc notre domaine en cellules indexées avec la notation « boussole », c'est-à-dire qu'une cellule notée P sera entourée, en deux dimensions, des cellules E (East) et W (West) selon l'axe x et des cellules N (North) et S (South). En trois dimensions, par les cellules T (Top) et B (Bottom). Des lettres minuscules symbolisent les frontières d'une cellule. Ces notations sont très utilisées dans les articles traitant des volumes finis (figure 61).

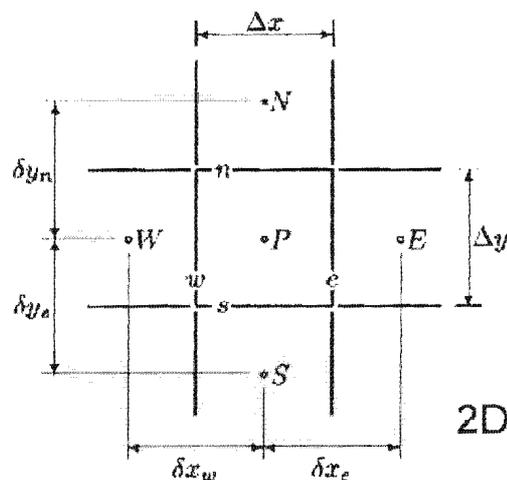


Figure 61 – Notations utilisées pour la discrétisation en cellules

Une équation de transport scalaire en régime stationnaire est donc de la forme :

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \phi) - \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) = S$$

avec Γ le coefficient de diffusion de ϕ , S le terme source, ρ la masse volumique du fluide et \vec{u} la vitesse du fluide qui transporte le scalaire ϕ .

En se plaçant en deux dimensions, on intègre cette équation sur une cellule P :

$$\int_{s_w}^{n_e} \int_{s_w}^{n_e} \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) dx dy + \int_{s_w}^{n_e} \int_{s_w}^{n_e} \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \phi) dx dy - \int_{s_w}^{n_e} \int_{s_w}^{n_e} \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dx dy - \int_{s_w}^{n_e} \int_{s_w}^{n_e} \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dx dy = \int_{s_w}^{n_e} S dx dy$$

Les approximations intégrales effectuées alors suivent des schémas de différences finies, le schéma adopté ici est dit « hybride », car selon la valeur d'un coefficient appelé le nombre de Péclet ($Pe = \frac{U \Delta x}{\Gamma}$), ϕ est approximé aux frontières de la cellule soit par interpolations linéaires

($\phi_e = \frac{\phi_E + \phi_P}{2}$), soit en donnant à ϕ_e la valeur ϕ_E ou ϕ_P (dans notre cas, la convection étant prédominante, le schéma hybride est préféré au schéma central par exemple) :

$$\int_w^e \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) dx \approx (\rho u)_e \frac{\phi_E + \phi_P}{2} - (\rho u)_w \frac{\phi_P + \phi_W}{2}$$

D'autre part, les flux diffusifs sont eux aussi évalués par un schéma de différence finie :

$$\int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dx = \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w \approx \Gamma_e \frac{\phi_E - \phi_P}{\delta x_e} - \Gamma_w \frac{\phi_P - \phi_W}{\delta x_w}$$

En intégrant le terme source, nous pouvons mettre le second membre sous la forme :

$$\int_w^e \int_s^n S dx dy = S_u + S_p \phi_p$$

Donc en écrivant les discrétisations des termes convectifs et diffusifs, il vient :

$$\begin{aligned} & (\rho u)_e \Delta y \frac{\phi_E + \phi_P}{2} - (\rho u)_w \Delta y \frac{\phi_W + \phi_P}{2} + (\rho v)_n \Delta x \frac{\phi_N + \phi_P}{2} - (\rho v)_s \Delta x \frac{\phi_P + \phi_S}{2} \\ & - \Gamma_e \Delta y \frac{\phi_E - \phi_P}{\delta x_e} + \Gamma_w \Delta y \frac{\phi_P - \phi_W}{\delta x_w} - \Gamma_n \Delta x \frac{\phi_N - \phi_P}{\delta x_n} + \Gamma_s \Delta x \frac{\phi_P - \phi_S}{\delta x_s} = S_u + S_p \phi_p \end{aligned}$$

Puis en factorisant, nous aboutissons à une expression du type :

$$a_p \phi_p + a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S = S_u + S_p \phi_p$$

En effectuant cette intégration sur toutes les cellules, un système linéaire de la forme suivante est obtenu :

$$[AM] \phi = c$$

où AM est une matrice penta-diagonale (ceci est dû au fait que nous sommes en deux dimensions).

Il est alors possible de résoudre ce système par méthodes itératives. En fonction des conditions du problème, d'autres schémas de différences finies peuvent être adoptés pour discrétiser les termes de convection (schéma Upwind, CDS, Power-Law, etc.). C'est sous cette forme que CFX code l'équation de continuité, avec la matrice AM et les termes sources SU et SP que nous allons modifier dans la routine USRSRC (extrait de usrsr.f disponible sur demande).

Dans le cadre de notre problème, nous pouvons trouver trois types de conditions aux limites :

- conditions de Dirichlet : la valeur du champ scalaire est imposée :

$$\phi = \phi_0$$

Ainsi les valeurs de ρ_{ion} aux électrodes, ou le potentiel appliqué sont fixés dans la routine USRINT disponible sur demande (ρ_{ion} est toutefois modifiable en fonction de la loi de Peek).

- conditions de Neumann : la dérivée par rapport à la normale au bord est imposée :

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \phi'_0$$

CFX introduit des cellules supplémentaires appelées dummy cells (cellules fantômes) au bord du domaine. Il suffit d'indiquer les valeurs aux frontières dans le fichier de commande, sous la commande WALL BOUNDARIES, dans le cas d'une condition de Dirichlet. Pour les conditions de Neumann, si un flux nul est facile à imposer sur une paroi, cela est plus difficile pour une entrée ou une sortie. Il faut alors le programmer dans un fichier source.

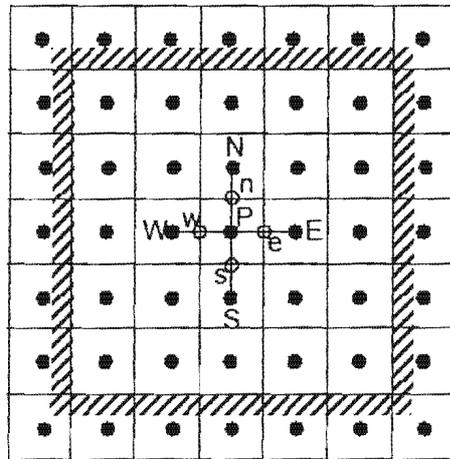


Figure 62– Représentation des cellules « fantômes »

Pour la résolution, le système linéaire est alors modifié. En effet, chaque cellule adjacente à une frontière sera traitée différemment, par exemple dans le cas d'une condition de Neumann :

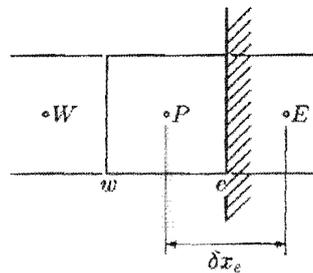


Figure 63– Notations pour les conditions aux limites

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \phi'_0 \approx \frac{\phi_E - \phi_P}{\delta x_e}$$

Nous en déduisons une valeur de ϕ_E en fonction de ϕ_P que nous reportons dans l'équation

$$a_P \phi_P + a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S = S_u + S_P \phi_P$$

d'où une modification du système linéaire.

- Pour les conditions aux limites « libres » utilisant des conditions aux limites dites « au loin », la programmation est plus délicate, et elle ne sera pas décrite dans ce rapport.

7-3/ La validation à partir des résultats de la publication de Choi et Fletcher

Afin de valider nos résultats numériques obtenus sous CFX, nous avons tout d'abord choisi de confronter ces résultats à ceux fournis dans l'article de Choi et Fletcher en 1998. Cet article fournit un modèle proche du notre, appliqué aux précipitateurs électrostatiques, sur une géométrie proche de notre seconde maquette. Le modèle de cet article est composé d'un mélange d'équations eulériennes (pour la phase porteuse, pour les équations de charge ionique et particulière, pour l'équation de Poisson) et d'équations lagrangiennes pour les particules. Le passage d'une forme à une autre est réalisé en effectuant des bilans de passage des particules dans des éléments de volume.

Le temps de calcul n'est pas évoqué dans l'article, mais il très raisonnable de penser que, même avec un ordinateur puissant et des algorithmes optimisés, ce temps se compte en heures.

Le précipitateur adopté est composé de trois électrodes et de deux plaques collectrices. L'enceinte est d'une longueur de 45 cm et d'une hauteur de 20 cm. Les trois électrodes, de diamètre 5 mm, portées à un potentiel de 70 kV, sont à des distances respectives de l'entrée de 7,5 cm, 22,5 cm et 37,5 cm. Elles sont placées à mi-hauteur.

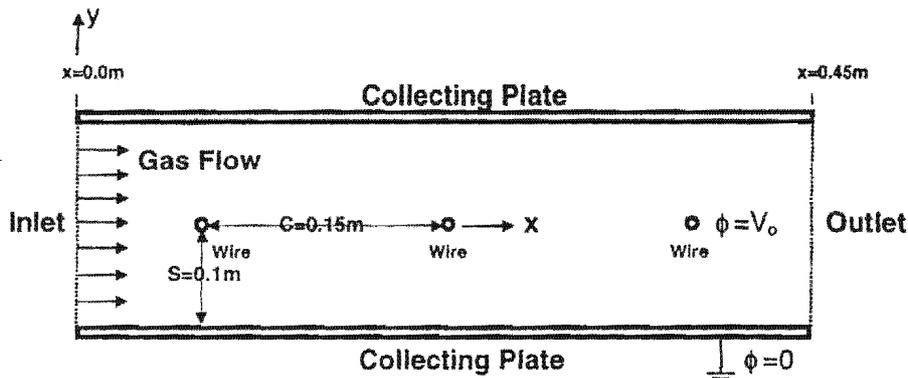


Figure 64 – Schéma de la géométrie du précipitateur de Choi & Fletcher

La vitesse à l'entrée est choisie égale à 1 m.s^{-1} , et les particules, de diamètre variant entre $1 \mu\text{m}$ et $20 \mu\text{m}$, ont une masse volumique de 1500 kg.m^{-3} . Choi et Fletcher exploitent la symétrie pour effectuer les calculs sur la moitié du domaine et réduire ainsi le temps de calcul. De notre côté, nous avons effectué les simulations sur le domaine entier, afin de pouvoir par la suite nous adapter à la géométrie utilisée en PIV.

Trajectoires et concentration particulaire

La figure 65 suivante présente les trajectoires de particules de diamètre $2 \mu\text{m}$, pour une concentration en entrée très faible. Nous constatons que les particules passant près de la première électrode sont rapidement déviées vers la plaque collectrice, car elles ont subi l'effet du champ au fil. En revanche, les particules plus éloignées sont moins déviées.

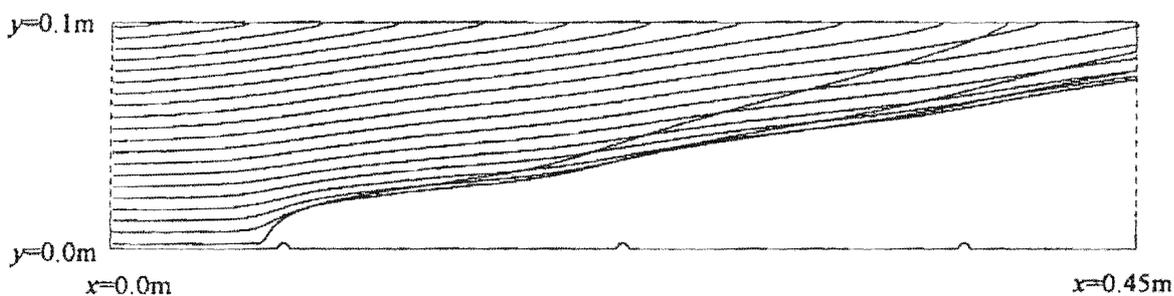


Figure 65 – Allure des trajectoires des particules pour $d_p = 2 \mu\text{m}$

De plus, Choi & Fletcher constatent qu'il existe une bande de plus forte concentration en particules, ceci étant dû aux évolutions différentes de la charge particulaire.

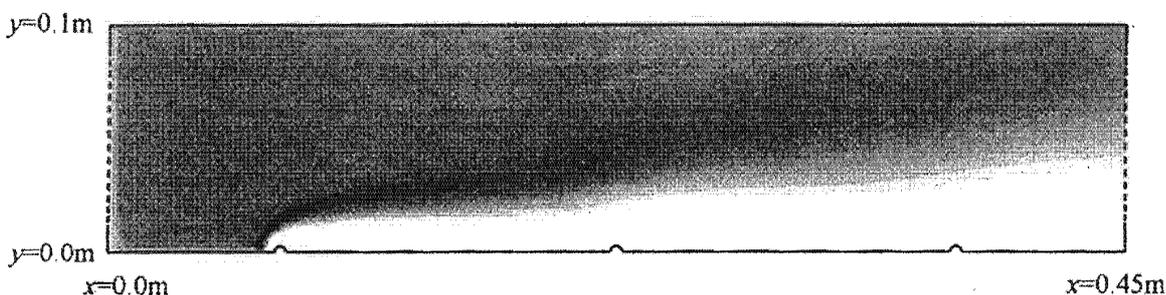


Figure 66 – Concentrations en particules pour $d_p = 2 \mu\text{m}$ et $[C]_{\text{inlet}} = 1 \text{ g/m}^3$

La figure 67 ci-dessous représente les résultats que nous obtenons pour les mêmes conditions. Nous retrouvons des trajectoires et concentrations similaires à celles de Choi et Fletcher. La zone de forte concentration est notamment bien visible.

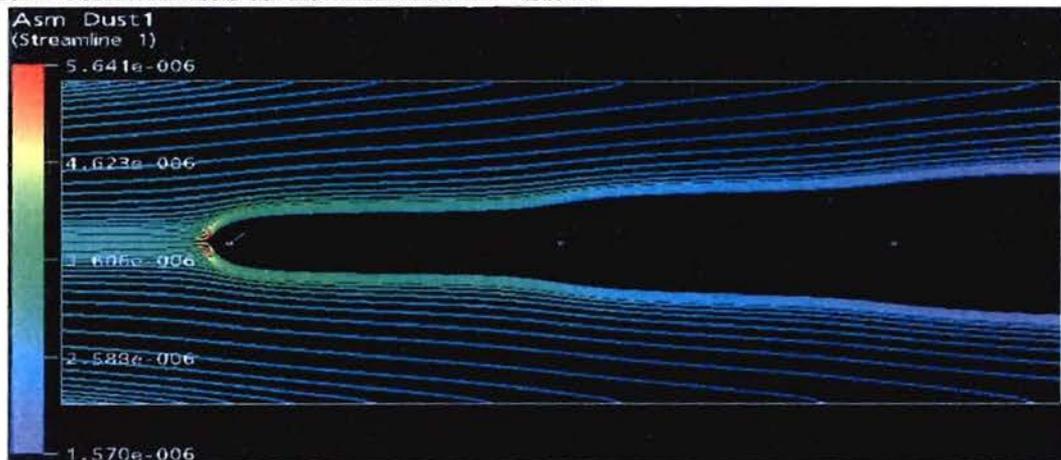


Figure 67– Allure des trajectoires et visualisation des concentrations

Champ ionique

En ce qui concerne l'évolution de la charge ionique, nous retrouvons également l'allure des résultats de Choi et Fletcher, le champ électrique produisant ce motif symétrique pour ρ_{ion} .

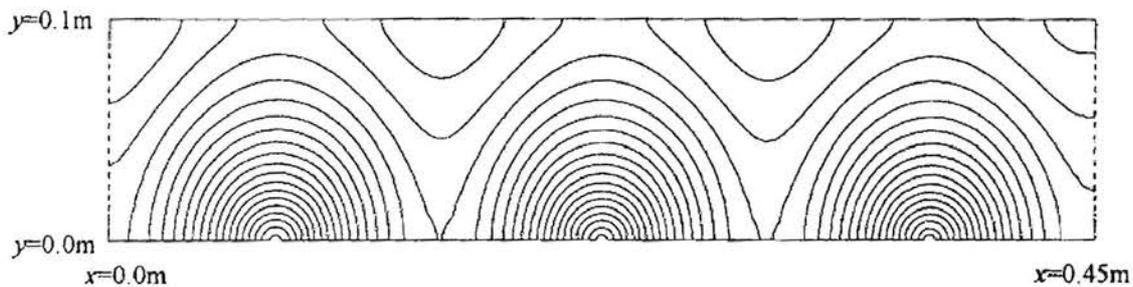


Figure 68 – Schéma du champ ionique ρ_{ion} obtenu par Choi et Fletcher avec $[C]_{inlet} = 0 \text{ g/m}^3$ et $(\rho_{ion})_{elec} = 45,7 \text{ } \mu\text{C/m}^3$

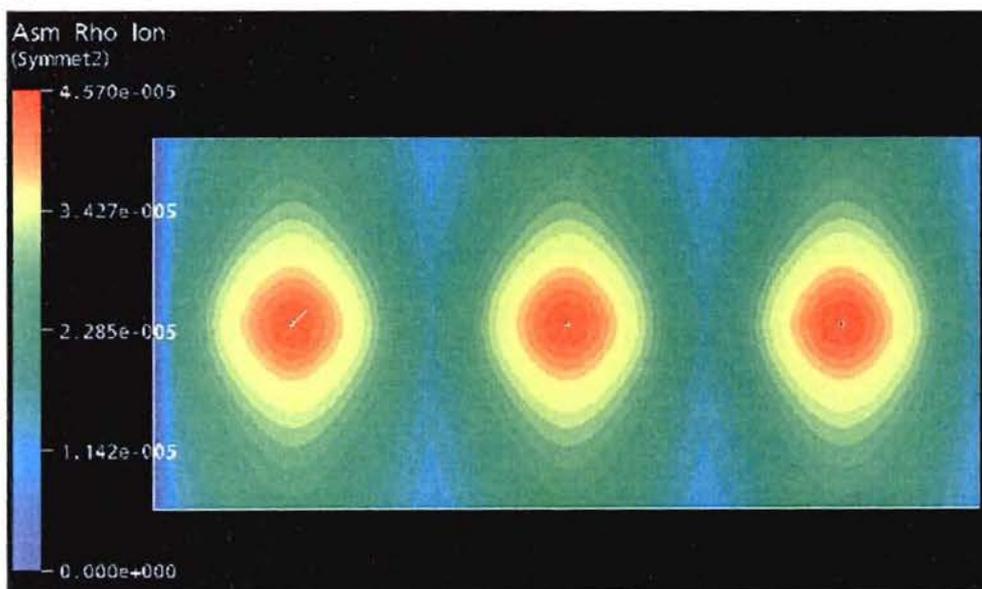


Figure 69 – Visualisation du champ ionique ρ_{ion} sous CFX avec les mêmes conditions aux limites que Choi et Fletcher

Choi et Fletcher soulignent que lorsque la concentration en particules devient plus importante, nous observons une réduction du courant électrique obtenu, ceci étant dû au fait que des particules très chargées vont diminuer le champ électrique au voisinage des électrodes, et ainsi freiner le processus d'effet couronne, c'est-à-dire le phénomène d'ionisation. La loi de Peek permet d'ajuster la valeur du ρ au fil à la valeur correcte en tenant compte de ce phénomène. Par contre, comme nous le verrons par la suite, les résultats présentés dans l'article sont surprenants car la concentration en particules à proximité des fils est très différente et donc la valeur du ρ au fil pour chacun des fils devrait être différente. Il est plausible de penser que le calcul proposé par Choi et Fletcher ait posé des problèmes d'ajustement sur cette valeur de ρ au fil et que les auteurs aient alors déterminé un ρ au fil identique pour les trois fils en respectant uniquement une condition sur l'un des fils.

Effet du diamètre des particules

Nous présentons ci-dessous la concentration et les trajectoires obtenus pour des particules de diamètre 5 μm . Nous remarquons que les résultats sont différents des figures avec les particules de diamètre 2 μm .

Nous retrouvons ainsi l'observation de Choi et Fletcher quant à la différence de déviation des particules selon leur diamètre. En effet, il apparaît que les particules de plus grande taille se chargent de façon plus importante, et sont ainsi plus rapidement déviées vers l'électrode collectrice. En effet, l'effet couronne est plus fortement atténué pour les petites particules, notamment parce que celles-ci restent plus longtemps dans la zone des électrodes, et qu'elles offrent au total une plus grande surface à charger.

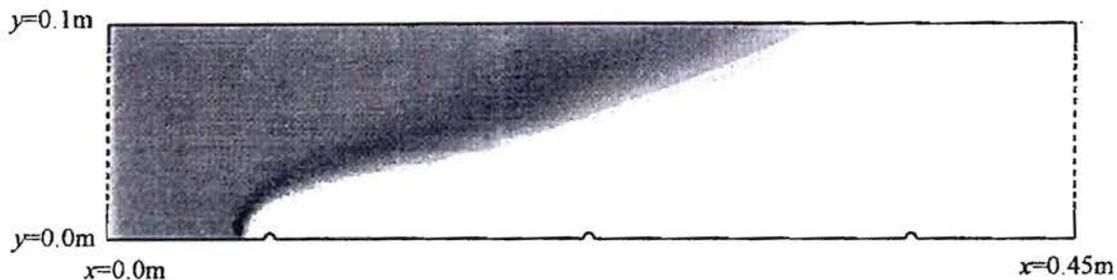


Figure 70 - Concentrations en particules pour $d_p = 5\mu\text{m}$ et $[C]_{inlet} = 1.9 \text{ g/m}^3$ selon Choi & al

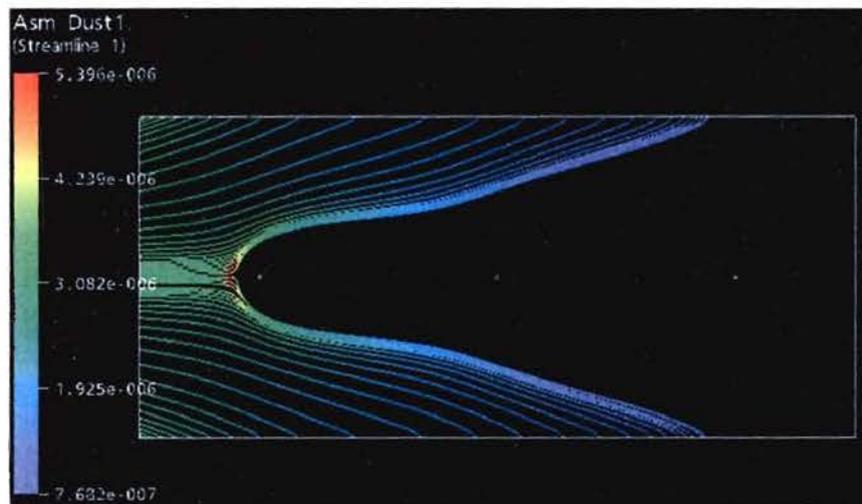


Figure 71 – Allure des trajectoires et concentrations obtenues avec notre modèle

L'efficacité de la collecte des particules est comparée lorsque nous prenons une seule classe de particules (**Cas 1** : diamètre $d_p = 5 \mu\text{m}$, $[C]_{inlet} = 1,9 \text{ g/m}^3$) et deux classes de particules (**Cas 2** : $d_p = 2 \mu\text{m}$, $[C]_{inlet} = 1 \text{ g/m}^3 + d_p = 5 \mu\text{m}$, $[C]_{inlet} = 1,9 \text{ g/m}^3$), afin de déterminer l'influence sur

la collecte des « grosses » particules de la présence des petites particules qui, nous l'avons vu, contribuent de façon significative à la distorsion du courant électrique. Choi & Fletcher constatent que les grosses particules, lorsqu'elles sont mélangées aux petites, sont moins précipitées vers les plaques collectrices. De fait, la distorsion du courant, provoquée par ces petites particules, a pour effet la réduction de la charge des grosses particules, d'où une force de Coulomb moins importante pour les dévier. Nos résultats confirment ce phénomène.

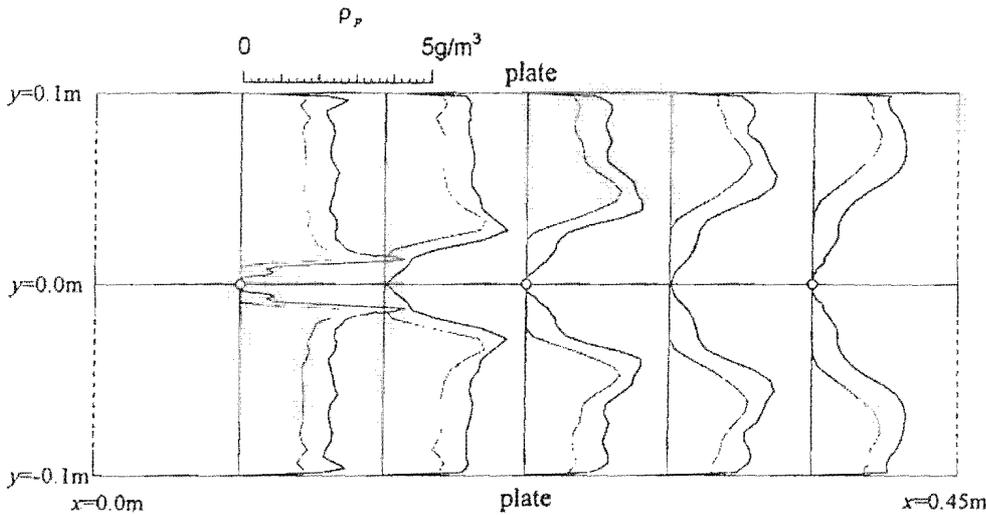


Figure 72 – Profils des concentrations en particules obtenus par Choi et Fletcher pour une seule classe de particules ($d_p = 5 \mu\text{m}$, $[C]_{inlet} = 1.9 \text{ g/m}^3$; ligne grise) et deux classes ($d_p = 1 \mu\text{m}$, $[C]_{inlet} = 0.6 \text{ g/m}^3 + d_p = 5 \mu\text{m}$, $[C]_{inlet} = 1.9 \text{ g/m}^3$; ligne noire)

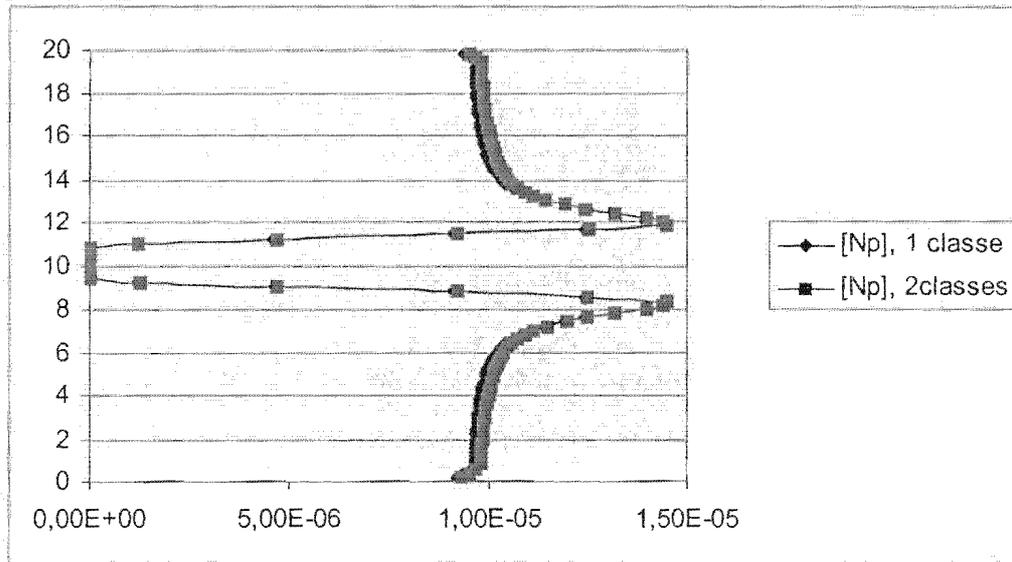


Figure 73 – Profils obtenus avec notre modèle, au niveau de la 1^{ère} électrode

La figure 73 présente les évolutions de $[Np]$, pour les mélanges Cas 1 et Cas 2, au niveau de la 1^{ère} électrode. Les valeurs du Cas 2 sont légèrement supérieures à celles du Cas 1, ce qui confirme les résultats de la figure 73, c'est-à-dire que la concentration en grosses particules est plus importante, donc la collecte a été moins efficace.

Tous ces résultats confirment la qualité de notre résolution sous CFX. Les performances de notre approche sont donc ici démontrées aussi bien sur la qualité des résultats que sur la vitesse de convergence des calculs car le temps nécessaire à l'obtention de ces résultats sur notre calculateur est de l'ordre de 20 minutes.

Comme nous l'avons évoqué précédemment le calcul de Choi et Fletcher nous semble légèrement inconsistant pour le calcul du ρ_{ion} car il ne respecte pas totalement la loi de Peek à proximité immédiate des fils.

Lorsque nous laissons converger notre modèle vers la loi de Peek, en ajustant les différentes valeurs de ρ au fil au niveau de chaque fil, nous obtenons la figure suivante pour ce calcul.

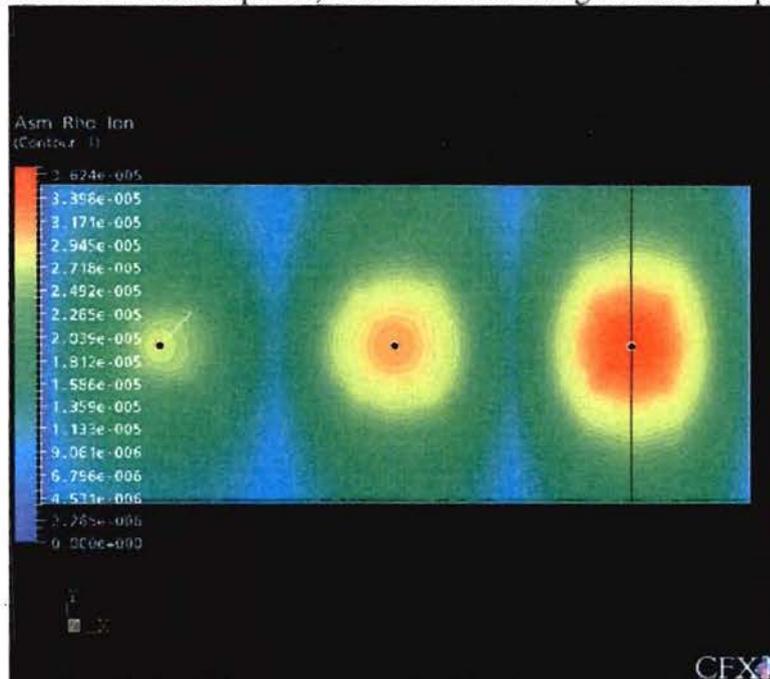


Figure 74 – Charge ionique incluant la loi de Peek dans le cas de Choi et Fletcher

Nous obtenons ainsi les valeurs suivantes de $\rho_1=26,1 \mu\text{C}/\text{m}^3$, $\rho_2=32,5 \mu\text{C}/\text{m}^3$, $\rho_3=37,2 \mu\text{C}/\text{m}^3$ pour les valeurs de vitesse de 1 m/s et une concentration entrante en particules de 1.10^{14} . La diminution du courant collecté à l'électrode est alors importante ce qui va parfaitement dans le sens des observations expérimentales.

Ces derniers résultats ne modifient toutefois pas fondamentalement les valeurs des autres grandeurs, comme le potentiel (cf. figure 75) ou la concentration en particules (cf. figure 76) ou la trajectoire des particules (cf. figure 77) ou le degré de collecte.

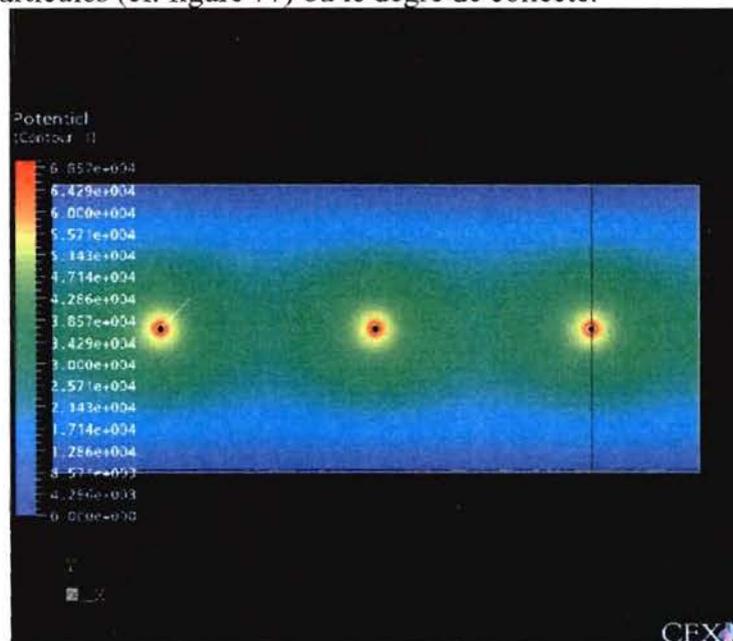


Figure 75- Potentiel, cas Choi et Fletcher

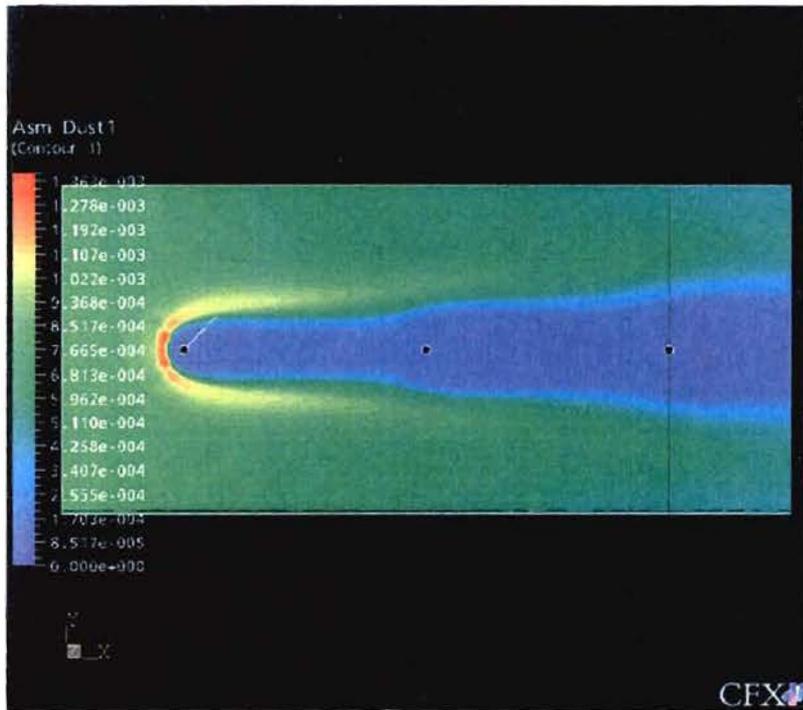


Figure 76- Concentration en particules, cas Choi et Fletcher

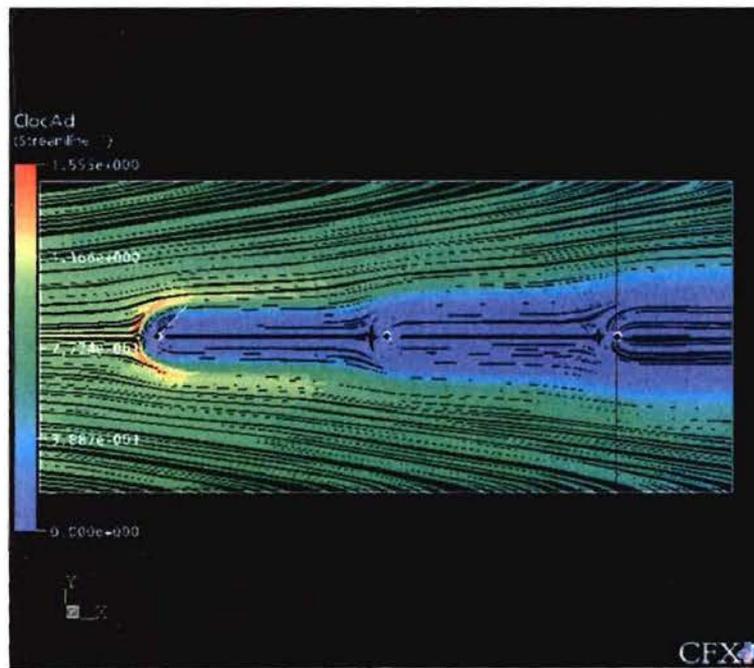


Figure 77 - Trajectoire des particules, cas Choi et Fletcher

7-4/ Les résultats de simulation pour une géométrie équivalente à la seconde maquette

Pour une géométrie équivalente à la maquette 3 fils, nous obtenons les résultats de simulation suivants pour le potentiel (cf. figure 78), pour la trajectoire des particules avec une vitesse entrante de 1 m/s (cf. figure 79) et pour la charge ionique (cf. figure 80), le tout sans tenir compte de la loi de Peek.

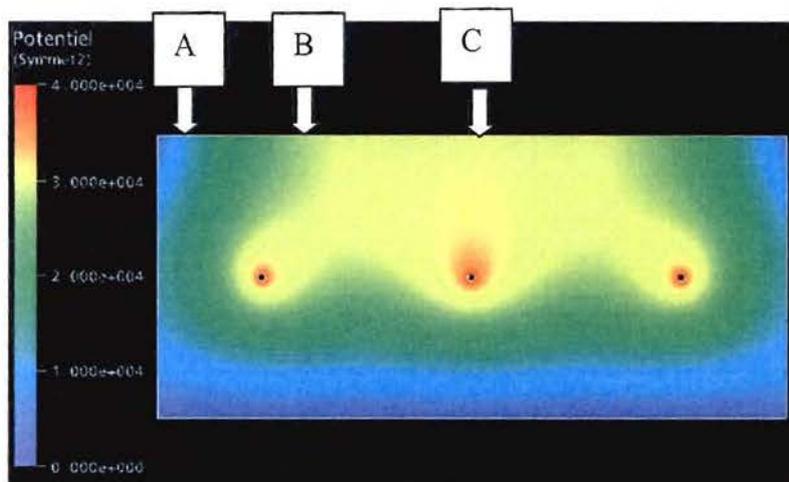


Figure 78 – Répartition du potentiel pour la maquette

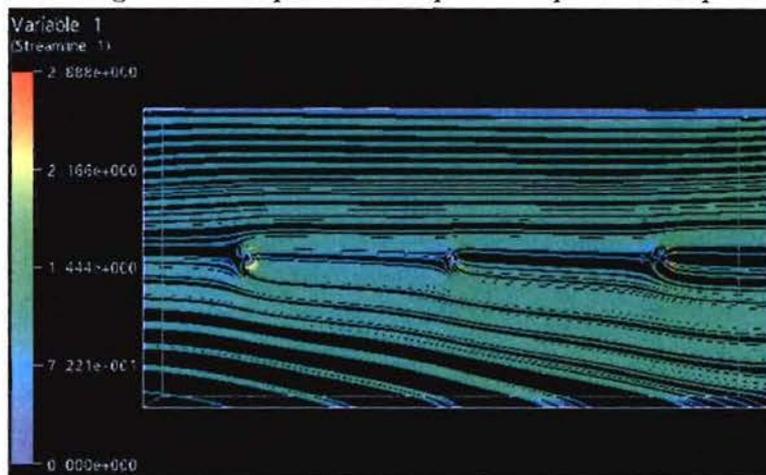


Figure 79 – Trajectoire des particules

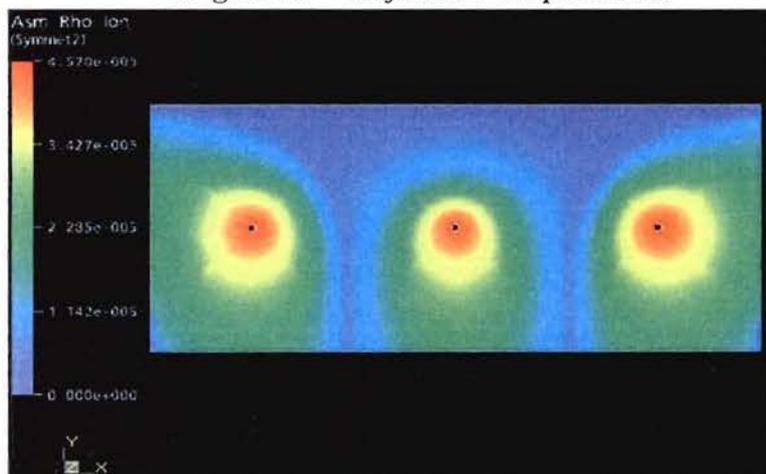


Figure 80 – Répartition de la charge ionique

Des mesures de potentiel, dont les emplacements sont schématiquement représentés sur la figure 78, confirment l'ordre de grandeur des potentiels calculés. Ces mesures ne fournissent qu'un ordre de grandeur car la sonde employée (sonde atténuatrice $\times 1000$ très haute impédance) dispose d'un embout de mesure de plusieurs millimètres. Les valeurs mesurées pour une tension aux fils de 40 kV étaient de 11 kV en A, de 22 kV en B et de 29kV en C.

8/ La comparaison avec la seconde campagne PIV

A ce jour, la confrontation et l'ajustement des coefficients et des conditions aux limites de nos résultats numériques avec les résultats PIV de la seconde maquette sont toujours en cours de réalisation. Nous avons pu constater que les conditions de vitesse entrante imposée lors de nos essais PIV sont faibles. En effet, les résultats numériques sont beaucoup plus sensibles aux paramètres et conditions aux limites pour des vitesses proches de 0,15 m/s, où les effets instationnaires doivent jouer un rôle non négligeable sur l'écoulement que pour des vitesses entrantes proches de 1 m/s.

Le modèle, intégrant les dernières évolutions algorithmiques, n'a pas pu être testé sur les conditions exactes de la seconde maquette (ni a fortiori sur la première maquette plus complexe). Nous avons essayé avec un modèle n'intégrant pas les conditions de Peek de faire quelques correspondances avec les résultats expérimentaux dans le cas de la géométrie 3 fils.

Dans ce cas, les résultats confirment simplement les tendances observées avec la PIV. Nous observons numériquement la présence de vortex au niveau des électrodes. Nous ne pouvons retrouver les mêmes champs de vitesse car les conditions expérimentales génèrent un écoulement fortement instationnaire très sensible aux perturbations. Il n'est pas certain que les mêmes champs soient obtenus lors d'une nouvelle expérience PIV dans les mêmes conditions. De plus, nous avons constaté que le champ de vitesses est très sensible à de faibles variations du potentiel. En effet, à des vitesses faibles de l'ordre de 0,15 m/s, le vent ionique est prépondérant devant les autres forces

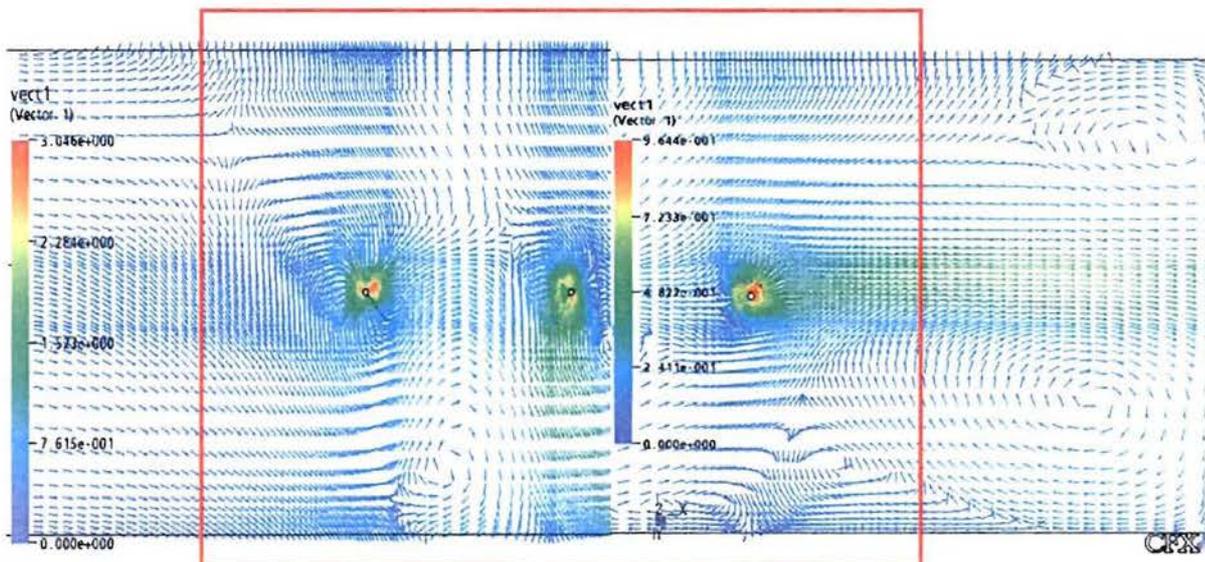


Figure 81– Champ des vecteurs vitesse et module de la vitesse

➤ Influence du potentiel aux électrodes

Nous savons que dans les conditions expérimentales, la précipitation électrostatique n'a lieu qu'à partir d'un potentiel de l'ordre de 35 kV. Nous avons donc testé l'effet du champ

électrostatique sur les trajectoires des micro-particules. Les résultats nous indiquent que la précipitation ne se fait qu'à partir d'un potentiel aux fils de l'ordre de 25 kV. Les trajectoires obtenues pour des potentiels de 10 kV et 40 kV sont représentées ci-dessous.

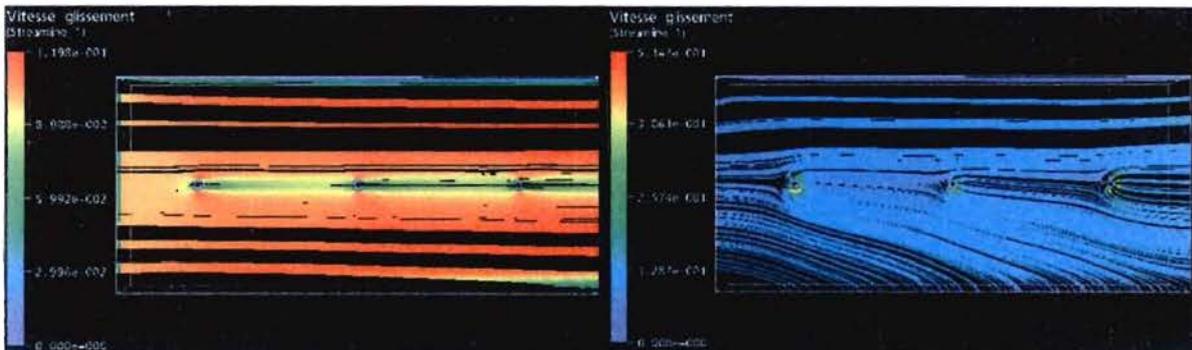


Figure 81 - Trajectoires des particules pour $\phi = 10 \text{ kV}$ et $\phi = 40 \text{ kV}$

La figure 81 montre bien la différence entre les trajectoires des particules correspondant à un potentiel de 10 et 40 kV.

A ce jour, nous pouvons donc dire que le modèle proposé semble cohérent et partiellement validé. Il reste encore à intégrer dans ce modèle les informations liées à l'adsorption des composés de la fumée par le produit à traiter.

Des résultats de luminance sur feuille de papier permettent d'obtenir une première approche de la quantité de fumée déposée et surtout de sa répartition. Il apparaît que les feuilles sont fumées de façon plus homogène que le laisseraient présager à première vue les résultats de PIV. On peut donc penser que l'impact de la fumée sur les feuilles de papier posées sur l'électrode de collecte ne soit pas le seul mode de dépôt. Une formalisation impliquant un dépôt proportionnel à la concentration de fumée à proximité de la surface à traiter, couplée à la concentration déposée sur la feuille elle-même, devra être prise en compte dans la description des dépôts de fumée. Les figures 82, 83 et 84 illustrent la répartition des dépôts de fumée sur feuille de papier blanc pour un fumage statique (la feuille de papier est fixe) de 5 minutes pour un potentiel de 40 kV.

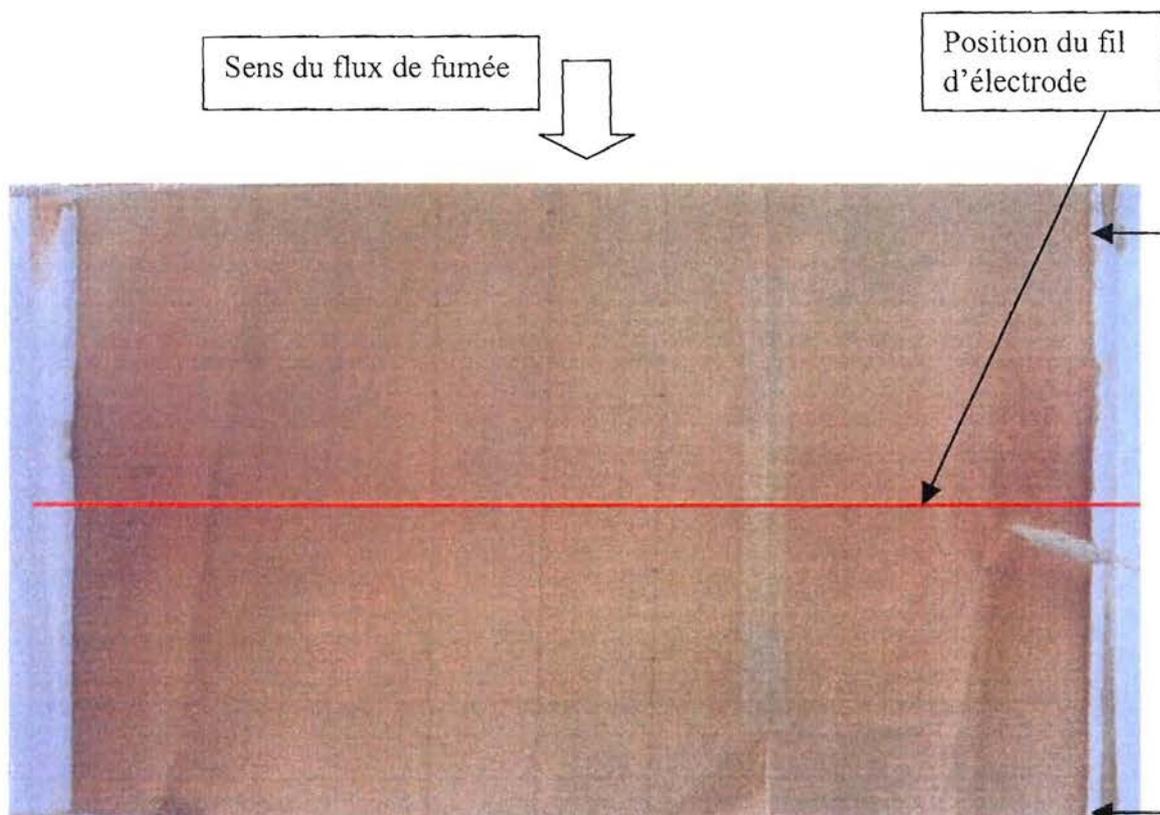


Figure 82 – Encrassement d'une feuille de papier sous l'électrode – cas 1 fil
Les deux flèches noires sur le côté correspondent à la largeur de la fenêtre de visualisation PIV.

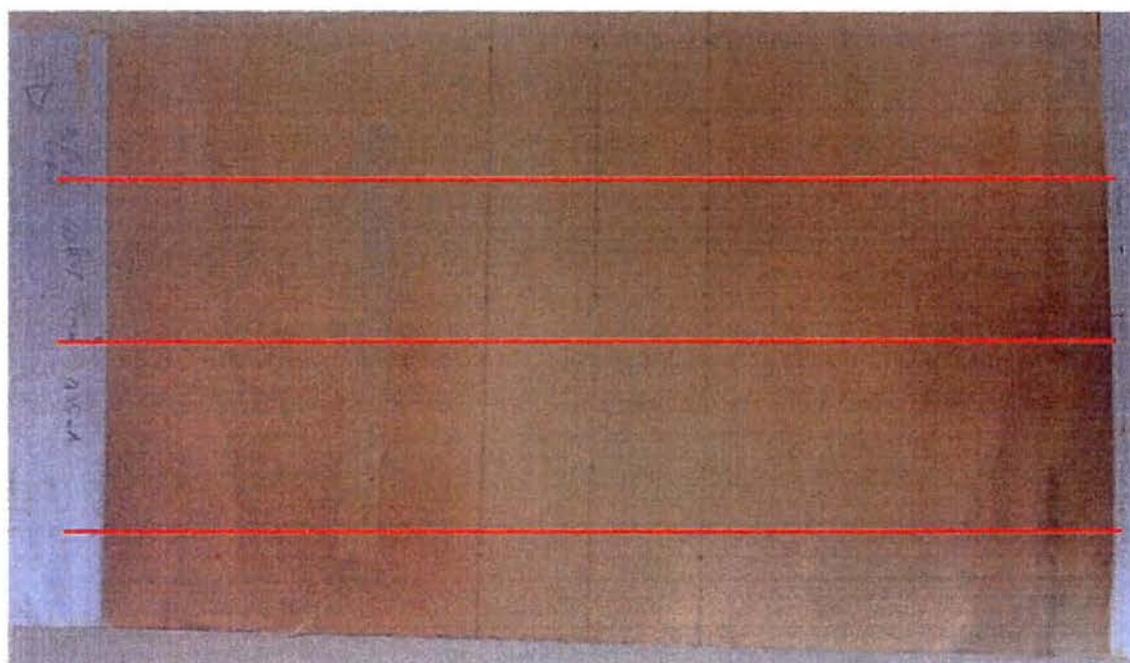
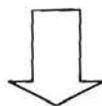


Figure 83– Encrassement d'une feuille de papier sous l'électrode – cas 3 fils

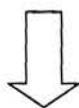
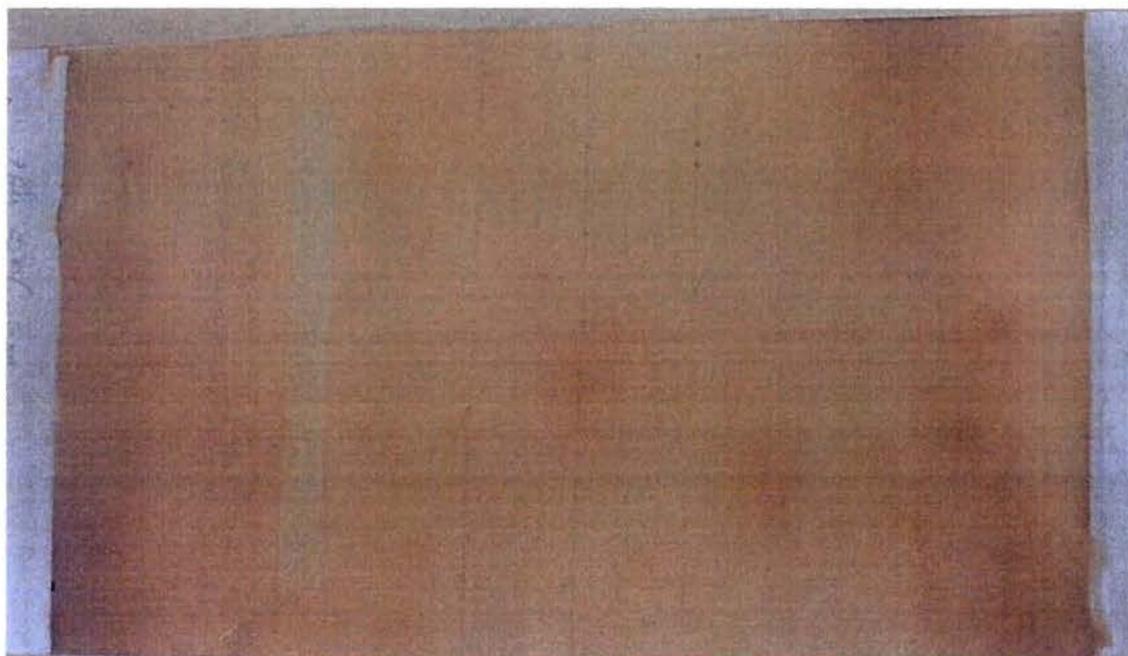


Figure 84– Encrassement d’une feuille de papier sous l’électrode – cas 7 fils

Un autre moyen de validation des données de simulation est l’observation des courbes de tension – courant obtenues expérimentalement sans et avec présence de fumée, et la comparaison avec les valeurs de I calculées. La figure 85 illustre les courbes ainsi obtenues.

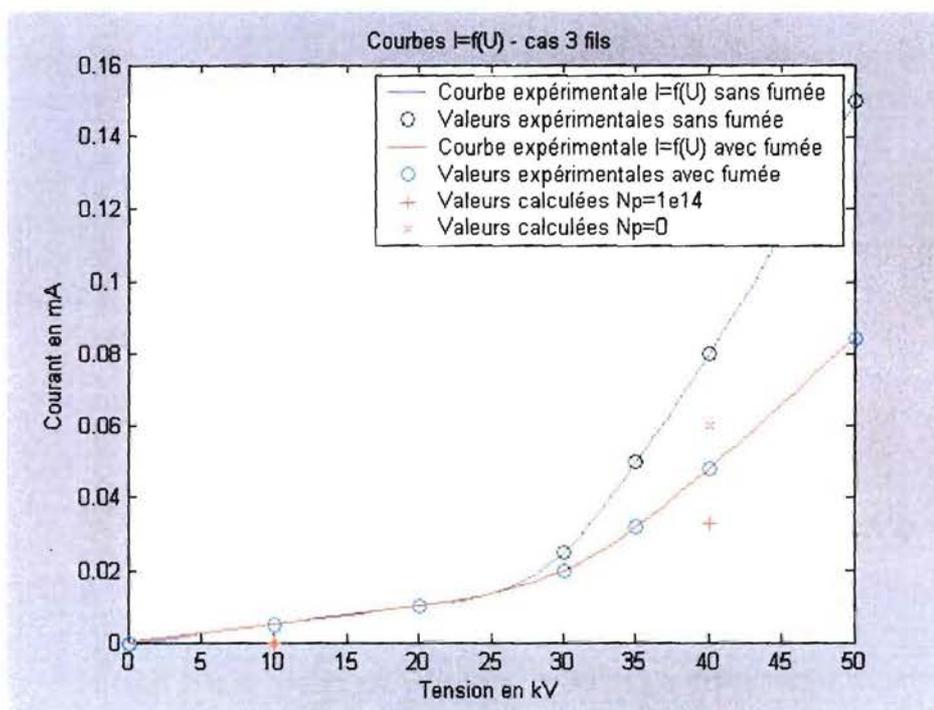


Figure 85 – Courbes $I=f(U)$

Les valeurs calculées par simulation s'avèrent un peu faibles devant les valeurs mesurées. Il convient toutefois de préciser que la valeur du courant I calculée est nulle jusqu'au début de l'ionisation, alors que la valeur mesurée n'est pas nulle pour des conditions purement électrostatiques et nous observons un courant de l'ordre 0.03 mA pour le début de l'ionisation. Cette constatation explique pourquoi le calcul sous-estime la valeur mesurée. Nous pouvons donc dire que l'ordre de grandeur entre mesure et simulation est respecté. Nous chercherons dans les prochains jours à compléter cette courbe.

9/ Propositions pour la réalisation d'un démonstrateur optimisé

Tout en développant notre outil numérique, nous avons cherché à partir des travaux de la littérature à évaluer expérimentalement l'impact de certains paramètres qui n'avaient jamais été testés auparavant.

A partir de ces expérimentations et de nos premiers résultats numériques, nous avons recueilli quelques éléments déterminant pour l'obtention d'un procédé performant. Ces éléments doivent encore être approfondis avant de se lancer dans la réalisation d'un démonstrateur industriel de petite taille.

9-1/ Les idées innovantes

Dans cette section, nous soumettons sept idées d'amélioration du procédé, seules les trois premières ont pu être testées expérimentalement, les trois suivantes ont été étudiées en simulation sur notre maquette simplifiée et pourront être prochainement évaluées sur de nouvelles simulations tenant compte de géométries plus complexes. Enfin la dernière pourra être évaluée en simulation sous réserve de modifier de nouveaux le code de calcul CFX afin qu'il permette un calcul en instationnaire.

9-1-1/ Générateur de fumée à plaque thermostatée

Nous avons choisi de travailler avec un générateur de fumée à friction dans le cas du fumage électrostatique afin d'accroître le temps de fonctionnement avant gouttage des électrodes (environ 2h). En effet, si l'utilisation d'un générateur de fumée à autocombustion associé au fumage électrostatique permet une aromatisation plus forte du produit, l'humidité dans l'enceinte devient trop importante après une vingtaine de minutes. Nous avons souhaité tester l'utilisation d'un générateur de fumée à plaque thermostatée Thirode dont la caractéristique est de ne pas nécessiter l'utilisation d'une sciure humidifiée. La sciure est dans ce cas plus grossière ou peut être remplacée par des petits copeaux de bois. Elle tombe directement sur une plaque dont la température est régulée. Afin d'obtenir une bonne régulation, nous avons substitué le régulateur Tout ou Rien à hystérésis qui permettait une régulation à ± 20 °C par un régulateur PID à sortie Tout ou Rien modulé par rapport cyclique qui assure une régulation de la température de la plaque à ± 2 °C. Une turbine permet l'aspiration de la fumée. L'analyse des 10 principaux composés phénoliques de la fumée ainsi générée semble indiquer que la fumée est proche de celle produite par autocombustion.

9-1-2/ Des fils d'électrodes de petits diamètres

Un article décrit les phénomènes d'encrassement et de perturbation de l'effet couronne sur des précipitateurs électrostatiques de géométrie fil – plaques. Une électrode composée d'un fil de

diamètre 0,7 mm est comparée à une électrode composée d'un fil de diamètre 0,19 mm. Les auteurs montrent ainsi clairement que le diamètre du fil influence non seulement les valeurs du seuil d'ionisation et les caractéristiques de cette ionisation mais également la possibilité de former des agglomérats ou non sur l'électrode et donc la formation de gouttes. Il semble que dans le cas de l'électrode à 0,19 mm de diamètre, un film qui ne perturbe pas foncièrement l'effet couronne, se dépose sur l'électrode de façon très homogène mais qu'après de nombreuses heures d'utilisation aucune goutte n'apparaît.

9-1-3/ Une alimentation Haute Tension alternative

L'utilisation d'un signal Haute Tension alternatif peut, selon la littérature sur les précipitateurs, permettre de faciliter l'agglomération de très petites particules et limiter l'encrassement des électrodes par la modification de la nature des ions et électrons dans la zone couronne et dans l'espace inter-électrodes. Le type de signal (créneau, triangulaire, sinusoïdale, ...), sa fréquence, son amplitude, son offset sont des paramètres qui peuvent agir considérablement sur les caractéristiques du précipitateur. Le LEA nous a prêté pendant quelques semaines un amplificateur - recopieur de signal qui recopie et amplifie par 1000 des signaux de générateurs de tension alternatifs. L'amplificateur est toutefois limité à des tensions comprises entre -20 000 et +20 000 Volts. Pour évaluer ce matériel, nous avons construit une petite maquette à 3 fils avec un espacement entre fils et plaque de collecte de 3 cm. Nous avons observé durant 5 minutes l'encrassement de feuilles de papier avec une alimentation continue de 15 000 V, puis nous avons substitué cette alimentation par notre amplificateur – recopieur de signal.

9-1-4/ La vitesse du flux de fumée

La vitesse maximale entrante du flux de fumée dans notre maquette était de l'ordre de 0,25 m/s. Nous avons constaté en simulation que cette valeur entraîne une difficulté de convergence de notre algorithme et une très grande sensibilité des résultats aux différents paramètres et aux écarts autour de cette valeur de vitesse entrante. Comme en pratique, nous constatons que des fluctuations autour de la valeur de la vitesse entrante est inévitable, le comportement moyen est donc difficile à calculer dans ce cas. Par contre, les simulations à des vitesses 3 à 4 fois plus grandes semblent beaucoup plus simples à obtenir et moins sensibles aux paramètres. Le taux de collecte des particules diminue avec l'augmentation de la vitesse entrante de façon non linéaire.

9-1-5/ La position des fils

L'espacement entre fils doit être suffisant pour ne pas créer d'interactions trop marquées sur le potentiel et la répartition de la charge ionique. De même, l'écartement entre fils et plaque collectrice est très important pour collecter les particules. Une distance faible favorise la collecte, mais une distance très faible entraîne rapidement des effets électriques (notamment des arcs) préjudiciables pour le système comme pour le produit. La distance 7,5 cm nous est apparu généralement comme un bon compromis. L'influence de la distance fils – plafonds peut également influencer l'écoulement. Ce paramètre a donc été étudié en simulation sur la géométrie 3 fils – une plaque.

9-1-6/ La polarisation du plafond

Il est également envisageable d'appliquer un potentiel sur le plafond afin de limiter son encrassement et de favoriser le dépôt des particules sur la zone de collecte. Le plus facile à

réaliser techniquement est de connecter le plafond au même potentiel que les fils de l'électrode de décharge.

9-1-7/ Des entrées de fumée pulsantes

Afin de permettre une collecte plus homogène sur la longueur utile du tunnel et d'augmenter ainsi le temps de fonctionnement, il peut être envisagé de réaliser des entrées de fumée dont les vitesses de flux seraient soumises à des allures sinusoïdales par exemple. L'amplitude et la fréquence de ces sinusoïdes peuvent être modulées.

9-2/ Les premiers essais et les premiers résultats sur maquettes de laboratoire

9-2-1/ Evaluation du générateur à plaque thermostatée couplé à une enceinte climatisée ou couplé au fumoir électrostatique

Une évaluation sensorielle de filets de hareng a été réalisée pour comparer les produits fumés par trois modes de fumage (générateur à autocombustion et enceinte climatisée, générateur à plaque thermostatée et enceinte climatisée, générateur à plaque thermostatée et fumoir électrostatique). Les produits finis, conditionnés sous vide, ont été stockés une semaine à – 80°C. Les filets, mis à décongeler à +4°C la veille des tests, ont été emballés individuellement dans une feuille d'aluminium, une heure avant la dégustation. Les séances se sont déroulées entre 10h30 et 12h30. Les juges avaient pour consigne de ne consommer que la partie dorsale des filets.

Des tests de profil sensoriel ont été réalisés afin de caractériser et de discriminer les produits au niveau de l'odeur, de la texture et de la saveur.

Le produit "électrostatique" étant a priori assez différent des deux autres, deux séances ont été organisées, à deux jours d'intervalle :

- 1^{ère} : comparaison des 3 produits
- 2^{ème} : comparaison des 2 produits fumés en cellule traditionnelle avec génération de fumée par autocombustion ou par plaque thermostatée

En effet, lorsque que deux produits sont proches et un troisième assez nettement différents des deux premiers, la différence entre les deux produits les plus proches est souvent masquée. Le second test permettra donc de mieux cerner d'éventuelles différences entre les deux modes de génération de fumée.

Les descripteurs sensoriels suivants ont été utilisés :

Odeur

fumée
feu de bois
fumée froide
végétale
poisson

Texture

fermeté
grasse

Flaveur

fumée
 feu de bois
 fumée froide
 poisson
 salée

La sélection des critères a été réalisée par les responsables du jury, après une dégustation préalable des produits. Au cours des deux séances, tous les juges (26) ont testé les mêmes produits, présentés simultanément et selon un ordre défini par un carré Latin, de manière à éviter un effet "ordre de présentation". L'échelle de notation utilisée par les juges est une échelle non structurée bornée par les termes "faible intensité" et "forte intensité", correspondant à une notation de 0 à 10.

Les données des profils ont été traitées par une analyse de variance à 2 facteurs (effet produit, effet juge) pour le premier test (3 produits) et par un test de student pour le second test (2 produits). Une analyse en composantes principales non normée (ACP) a été également réalisée sur les moyennes des notes des 5 produits afin de visualiser les principales caractéristiques de chaque échantillon.

Comparaison des 3 produits

Les moyennes des notes et le résultat de l'analyse de variance sont présentés dans le Tableau 3.

	Autocombustion Enceinte climatisée (A)	Plaque thermo. électrostatique (E)	Plaque thermo. Enceinte climatisée (T)	Analyse de variance - +
od. fumée	6.7	3.5	6.3	***E T A
od. feu de bois	4.4	3.1	5.0	**E A T
od. fumée froide	3.3	1.4	2.6	*E T A
od. végétale	0.6	1.7	1.2	***A T E
od. poisson	3.4	4.2	2.8	**T A E
fermeté	5.2	3.8	5.5	***E A T
texture grasse	5.3	5.7	4.7	*T A E
fl. fumée	5.5	3.4	6.0	***E A T
fl. feu de bois	4.6	3.1	4.3	**E T A
fl. fumée froide	2.1	1.0	2.5	**E A T
fl. poisson	4.2	5.1	3.8	**T A E
sav. salée	6.4	5.3	6.3	**E T A

Tableau 3: Moyennes des notes et résultat de l'analyse de variance

Test de Duncan : ***significatif à 5% - **significatif à 1% - *significatif à 0.1%

Les échantillons reliés par un trait n'ont pas des moyennes significativement différentes

Le hareng fumé par voie électrostatique est significativement différent des deux autres pour la plupart des descripteurs, sauf pour l'odeur végétale qui semble être une caractéristique des produits fumés avec le générateur à plaque thermostatée ; les moyennes pour ce critère restent cependant faibles.

Les produits fumés en enceinte climatisée sont plus fumés, moins poisson, plus fermes que l'échantillon électrostatique. Ce dernier est perçu moins salé que les deux autres, alors qu'il a été salé de la même façon ; ce phénomène est peut être dû à sa flaveur fumée moins intense.

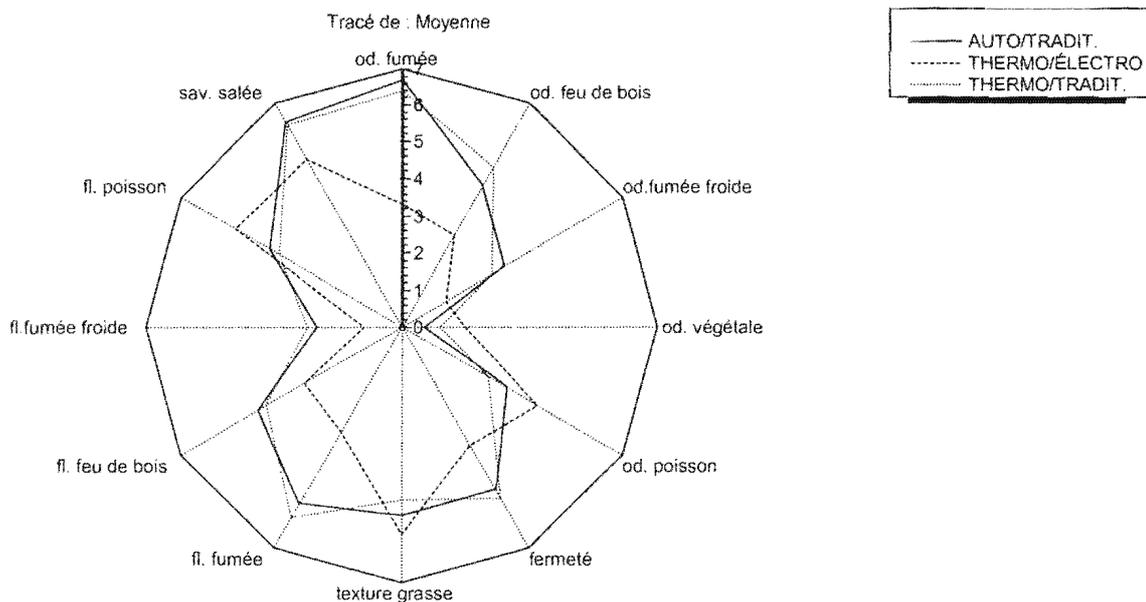


Figure 86 : représentation du profil sensoriel des 3 produits

Comparaison des 2 produits fumés en enceinte climatisée

Les moyennes des notes et le résultat du test de student sont présentés dans le Tableau 4.

	Autocombustion traditionnel (A)	Plaque thermo. traditionnel (T)	test de student p
od. fumée	6.2	5.6	0.15
od. feu de bois	5.1	4.2	0.12
od. fumée froide	3.0	2.7	0.61
od. végétale	0.5	1.3	**0.004
od. poisson	3.3	3.2	0.74
fermeté	4.9	4.9	0.91
texture grasse	5.0	4.6	0.18
fl. fumée	5.2	6.0	**0.008
fl. feu de bois	4.7	5.0	0.43
fl. fumée froide	2.2	2.1	0.70
fl. poisson	4.0	3.6	0.09
sav. salée	6.5	6.4	0.89

Tableau 4: Moyennes des notes et résultat du test de student
Test de Duncan **significatif à 1% -

Le hareng "plaque thermostatée" a une *odeur végétale* plus forte que le hareng "autocombustion", ce qui confirme les résultats du test précédent. Il a également une *flaveur fumée* légèrement plus intense. Les deux produits ne sont pas différents au niveau des descripteurs « feu de bois » ou « fumée froide ».

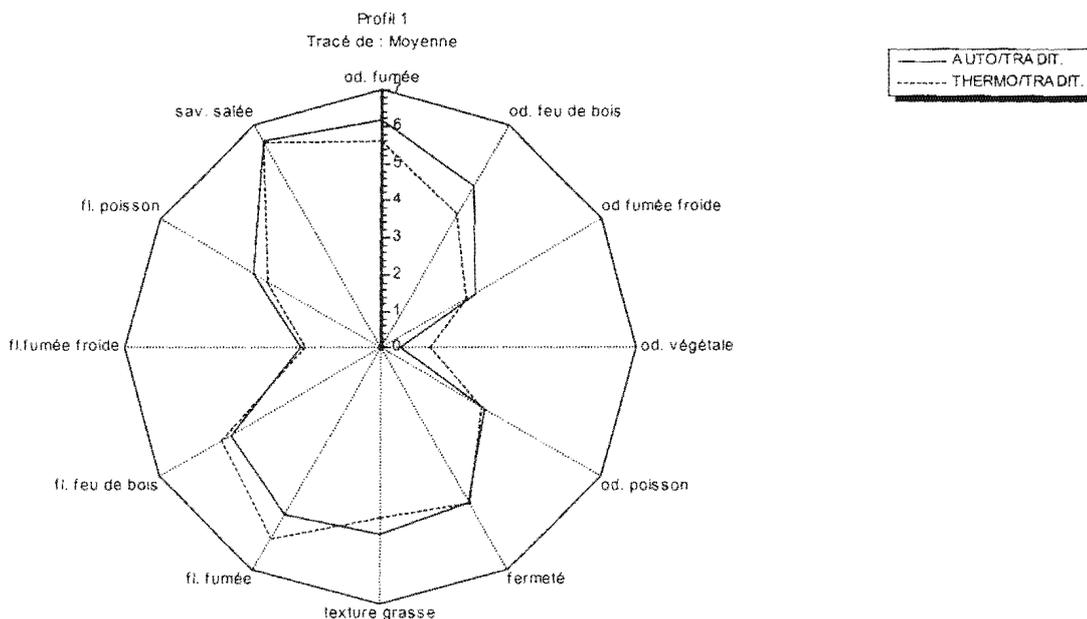


Figure 87 : représentation du profil sensoriel des produits fumés en enceinte climatisée

Le plan 1-2 de l'ACP (Figure 88) résume bien ces différents résultats ainsi que la bonne répétabilité du panel.

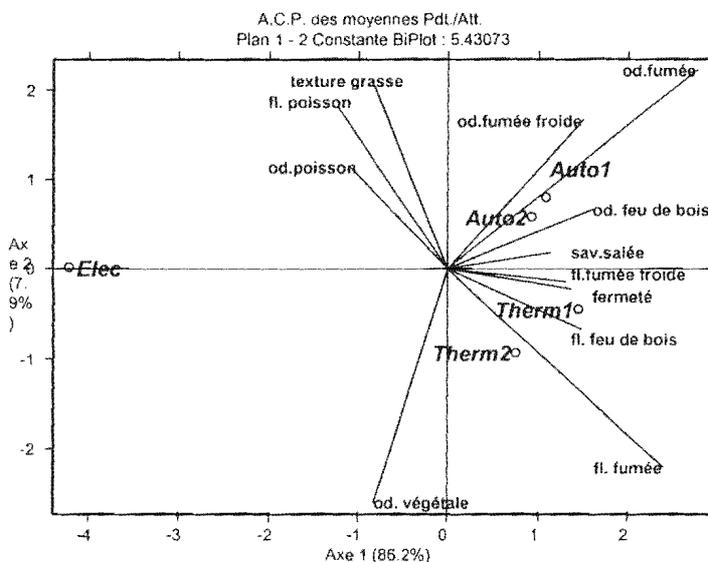


Figure 88 : Représentation simultanée des produits et des variables sensorielles sur le plan 1-2 de l'ACP

L'aromatisation et la coloration (résultats non présentés) des produits fumés avec un générateur à plaque thermostatée sont donc très proches de celles obtenues avec un générateur à autocombustion. Des études précédentes avaient montré que le générateur à friction ne fournissait pas une fumée aussi aromatisante que la fumée à autocombustion.

Avec le générateur à plaque thermostatée et notre « ancien » pilote de fumage électrostatique, les « gouttes de fumée » issues des électrodes apparaissent au bout d'environ 1h30mn de

fonctionnement, alors que des gouttes apparaissent après moins de 45mn avec notre générateur à auto-combustion et après environ 1h45mn avec un générateur de fumée à friction.

La consommation énergétique des trois types de générateurs de fumée a également été évaluée bien que la quantité de fumée produite ne soit pas strictement identique. Nous pouvons grossièrement estimer que le générateur à friction dont nous disposons fournit un peu moins de fumée que le générateur à autocombustion, qui lui-même semble un peu moins prolifique que le générateur à plaque thermostatée. L'estimation de la quantité de fumée produite peut être assimilée à la quantité de sciure, de copeaux ou de bûches consommée sur une période de temps fixée, sous réserve que la totalité du bois consommé serve à la pyrolyse, c'est-à-dire qu'il n'y ait pas d'imbrûlé. On considère alors qu'environ 800 g de bûches de hêtre sont consommés en friction pour une heure de fonctionnement, 1kg de sciure de hêtre non humidifiée pour l'autocombustion et 1,2 kg de copeaux de hêtre pour la plaque thermostatée. Pour trois heures de fonctionnement et en incluant la montée en température des plaques pour les générateurs à autocombustion ou à plaque thermostatée, la consommation électrique est de 5,2 kWh pour le générateur à friction, de 2,8 kWh pour l'autocombustion et de 4,2 kWh pour la plaque thermostatée à 420°C.

La **fumée à plaque thermostatée** étant plus compatible avec le fumoir électrostatique sur le plan du temps de fonctionnement avant nettoyage qu'un générateur à auto-combustion tout en étant aussi aromatisant et tout en étant moins consommateurs d'énergie que le générateur à friction, il est **souhaitable** de travailler avec ce type de générateur.

9-2-2/ Evaluation d'électrodes composées de fils de 0,25 mm de diamètre ou de fils de 0,4 mm de diamètre

Nous avons évalué sur maquette 3 fils – une plaque l'influence du diamètre des fils. Dans un premier temps et afin de disposer de données de comparaison, nous avons laissé le procédé fonctionner à vide avec des fils de diamètre 1,2 mm pour déterminer le temps nécessaire à l'apparition de gouttes. Le gouttage intervient dans ce cas au bout de moins d'une heure avec un générateur à plaque thermostatée. Nous avons ensuite évalué dans les mêmes conditions le comportement du procédé pour des fils de 0,25 mm de diamètre. Après 8 heures d'utilisation, nous avons arrêté l'installation. Aucune goutte n'est apparue pendant cette phase. Une pellicule très fine de composés brunâtres entourait alors l'électrode mais sans créer pour autant de zone d'amorçage préférentielle à une goutte comme cela était observé pour des gros diamètres. Aucune dérive du courant n'a été observée dans ces conditions contrairement à l'utilisation des fils de 1,2 mm de diamètre où l'on observe une dérive progressive du courant qui augmente environ de 30 % en moins d'une heure avant que des arcs électriques associés aux gouttes n'apparaissent.

Les essais avec des électrodes de 0,4 mm de diamètre ont permis de produire environ 6h30 sans gouttes. Une dérive du courant de moins de 10% a été constatée pendant la totalité de ce temps. La courbe de tension courant à vide est modifiée et le début de l'ionisation est perceptible dès 17,5 kV. Le courant à 40 kV est de 0,35 mA pour cette géométrie soit environ 4 fois plus important qu'avec des fils de 2 mm de diamètre.

La coloration des feuilles de papier pour un fumage à 40 kV pendant 5 minutes est beaucoup plus marquée pour les fils de 0,25 mm de diamètre.

Nous avons ensuite choisi d'évaluer les caractéristiques biochimiques et sensorielles (uniquement l'odeur) de pulpes de hareng fumées avec cette nouvelle installation (et à partir d'un générateur de fumée à plaque thermostatée).

Nous avons, pour ces expériences en maquette (avec produit à fumer fixe centré sur le fil du milieu), fait varier différents paramètres (temps de fumage, température de la plaque thermostatée, tension sur les fils) selon un plan factoriel en étoiles.

Sur le plan sensoriel, les produits perçus comme les moins fumés ont des tensions basses ou/et un temps de fumage court. Les produits ayant l'odeur la plus fumée ont eu une durée de fumage égale ou supérieure à 8 minutes combinée à une tension supérieure ou égale à 32,5 kV.

Les produits sont moins bien discriminés pour le critère « odeur fumée feu de bois » : l'odeur forte de hareng pouvant dominer, tous les échantillons présentent une odeur plus ou moins légèrement « feu de bois ». Elle est plus faible pour les produits les moins fumés et inversement. L'un des trois points centraux est particulier car, jugé moyennement fumé, il est parmi les 3 échantillons les plus "feu de bois".

Contrairement à l'odeur « feu de bois », l'odeur « fumée froide » peut être quasiment absente chez les échantillons les moins fumés. Comme pour l'intensité globale, l'apparition de l'odeur fumée semble favoriser par une durée de fumage égale ou supérieure à 480 secondes combinée à une tension supérieure ou égale à 32,5kV. A noter la comparaison 28 kV / 622 s et 37 kV / 622 s : dans le premier cas, le critère « feu de bois » domine (3/4 de l'intensité globale) alors que dans le second cas, la fumée « feu de bois » et la « fumée froide » sont en quantité équivalente.

Il serait donc possible de fabriquer, par voie électrostatique, un produit moyennement fumé (4,5/10) avec une note « feu de bois », à condition d'utiliser une tension faible pendant une durée assez longue (supérieure à 10 minutes).

Retenons que globalement l'odeur fumée des produits était plus intense qu'avec notre ancien pilote de fumage électrostatique. La couleur de la pulpe était en moyenne légèrement plus foncée (résultats non présentés).

Sur le plan chimique, le dosage des phénols totaux par colorimétrie indique des produits considérablement plus fumés qu'avec notre ancien pilote. En effet, tous les produits ont une valeur en phénols comprise entre 0,3 et 2 mg/100g de chair pour des temps de fumage allant de 4 à 10 minutes, des tensions comprises entre 25 et 40 kV et des températures de plaque thermostatée allant de 410 à 460°C.

Les conditions moyennes étaient : 7 minutes de fumage, une tension de 32 kV, et une température de pyrolyse de 416°C. La teneur moyenne des échantillons en phénols totaux, dosés par colorimétrie, est de 1 mg/100g de chair. Cette valeur est à comparer au $0,4 \pm 0,2$ mg /100 g obtenu avec notre ancien pilote pour un temps de fumage de 8 minutes.

La mesure des phénols totaux étant très délicate et assez imprécise, nous n'avons pas réussi à obtenir un modèle performant pour décrire l'effet des différents paramètres. Toutefois, les tendances suivantes apparaissent : il y a moins de phénols totaux quand la température de pyrolyse baisse, les teneurs en phénols augmentent avec la tension et avec le temps de fumage.

Aucune correspondance réellement exploitable, avec le dosage des phénols totaux par colorimétrie ou avec les résultats sensoriels, n'a pu être déduit du dosage des 10 principaux phénols par CPG pour cette expérience.

9-2-3/ Evaluation d'une alimentation Haute Tension alternative

Après plusieurs semaines d'essais en exploitant notre maquette spécifique (hauteur fils – plaque de 3 cm) et notre alimentation Haute Tension alternative (-20 à +20 kV), les résultats sur feuille de papier se sont avérés très décevants. Le dépôt sur feuille est quasiment nul pour

des fréquences supérieures à 10 Hz. En dessous, le fumage reste faible. La fréquence la plus basse que nous ayons pu tester avec notre générateur a été de 0,1 Hz. A cette fréquence, la coloration de la feuille, pour 5 minutes de traitement, est environ 8 fois moins importante (déduite de la variation de luminance de la feuille) que dans le cas d'une alimentation continue.

9-2-4/ Simulation numérique d'une vitesse entrante de 1 m/s

Comme évoqué précédemment, les simulations sur maquette 3 fils - une plaque pour une injection de la fumée à une vitesse de 1 m/s montrent des conditions très stables et peu sensibles aux variations de paramètres ou de conditions opératoires, contrairement à une vitesse de 0,25 m/s. Si l'on considère que le flux impactant la plaque de collecte est déposé, il est possible de faire un bilan du rapport nombre de particules sortantes sur nombre de particules entrantes afin de comparer l'efficacité de collecte. A 0,25 m/s, environ 90 % des particules sont collectées, à 1 m/s environ 60 % des particules sont collectées avec simplement 3 fils.

Une maquette avec 8 fils et une vitesse entrante de 1 m/s donnera un résultat de collecte relativement proche de l'efficacité de collecte à 3 fils et 0,25 m/s.

9-2-5/ Simulation numérique de la polarisation du plafond

Afin de diminuer l'encrassement de la plaque supérieure de l'enceinte, la possibilité de porter cette plaque à la même tension que les fils a été étudiée.

Les concentrations en particules le long d'une ligne horizontale au niveau de la plaque supérieure sont mesurées. Les résultats (figure 89) nous montrent que les concentrations en particules de fumée au niveau de cette plaque sont plus faibles dans la partie qui accumule le plus de particules, quand la plaque est chargée. Cela nous montre que cette configuration peut être envisagée, s'il en résulte en pratique un encrassement moindre.

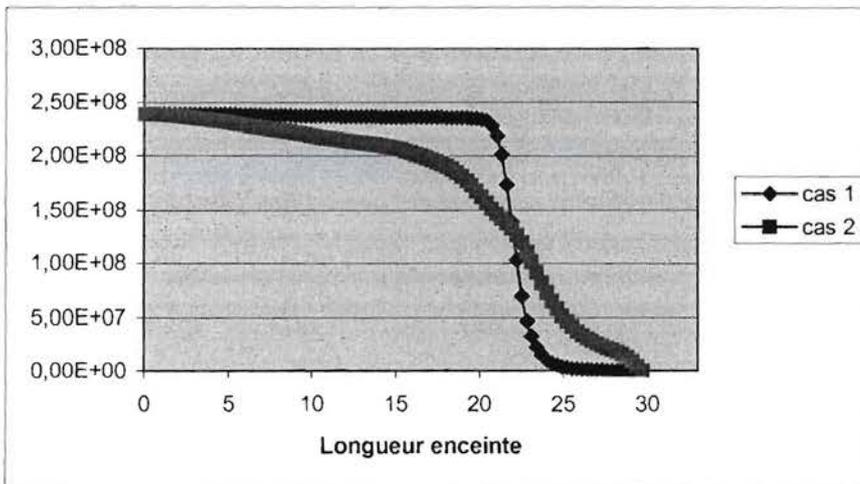


Figure 89 – Profils des concentrations en particules obtenus avec notre modèle, avec une plaque non chargée (cas1) ou chargée (cas2)

9-2-5/ Simulation numérique de la position des fils

Nous remarquons sur les différents profils de trajectoires des particules que toutes celles situées dans la moitié supérieure de l'enceinte ne précipitent pas et restent au-dessus des fils. Elles traversent ainsi l'enceinte sans être déviées. Il paraît logique de positionner les fils plus haut afin de recueillir plus de particules. Nous avons testé cette hypothèse avec des fils rehaussés de

40 mm. La figure 90 montre que la nouvelle configuration offre une plus grande surface de précipitation.

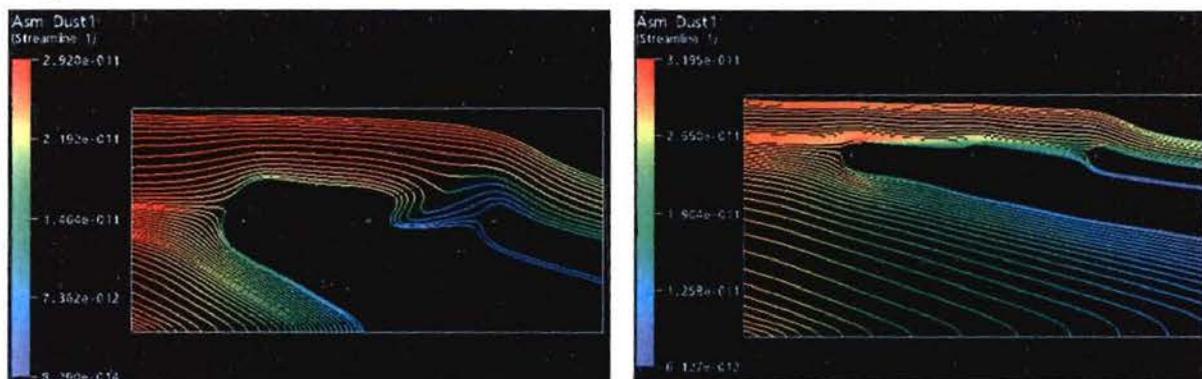


Figure 90 – Trajectoires des particules pour la géométrie initiale (gauche) et avec le repositionnement des fils (droite)

La figure 91 ci-dessous mesure les concentrations en particules le long d'une ligne située à 1 mm au-dessus de la plaque collectrice. Nous constatons que la concentration en particules est plus importante avec la nouvelle position des fils, ce qui semble confirmer les hypothèses émises. De plus, le fait de porter la plaque supérieure à 40 kV semble augmenter encore la quantité de particules collectées. Ces résultats demandent à être confirmés en modélisant de façon plus précise les phénomènes de dépôt, en prenant en compte notamment les vitesses des particules près de la plaque collectrice.

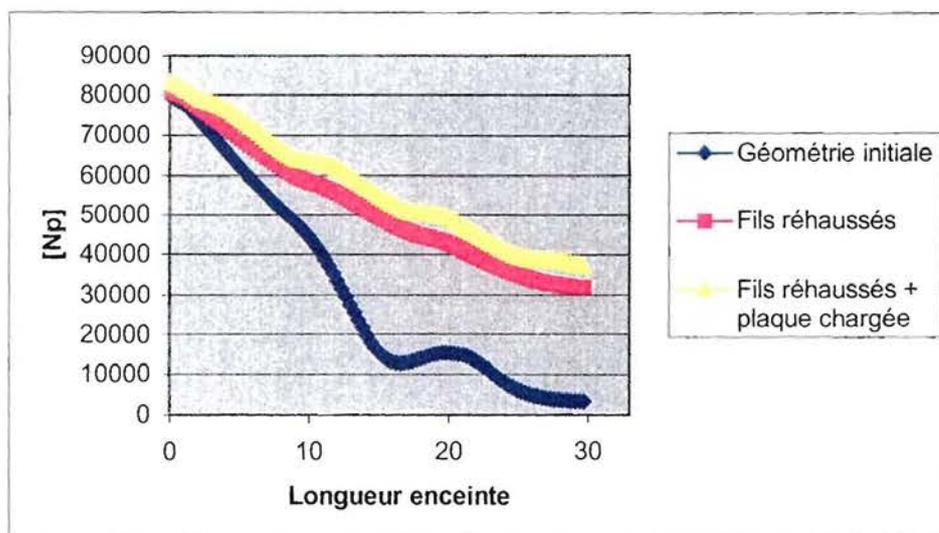


Figure 91 – Concentrations en particules pour la géométrie initiale (bleu), avec le repositionnement des fils (rose), et la plaque supérieure à 40 kV (jaune)

Les hauteurs paroi – électrodes – plaque collectrice ont donc une grande importance pour l'efficacité de collecte et l'encrassement des parois.

Une autre idée que nous chercherons à évaluer par simulation consiste à tester une hauteur fil – plaque décroissante pour chaque fil. Ce système devrait permettre d'exploiter de façon plus homogène la totalité de la longueur de la plaque de collecte tout en augmentant l'efficacité de collecte.

10/ Bilan des actions des deux premières années et conclusions provisoires

Le programme de travail initial avait été décomposé en 9 actions. Les 5 premières actions constituaient le programme de ces deux premières années de travail, baptisée globalement Etape 1 dans le contrat. L'action 9, sur la valorisation des résultats, s'étendait sur les trois années du programme. Nous présentons dans cette section un bilan de ces actions.

- Action 1 – Choix du modèle, adaptation logicielle :

Cette action, primordiale pour la suite du travail, est aujourd'hui terminée. Elle s'est avérée beaucoup plus délicate que initialement envisagée et a nécessité un travail important et très novateur. Trois stagiaires sur des périodes différentes étalées au total sur 10 mois ont participé à cette action. Le CETIM a été contraint de renforcer son temps d'encadrement en raison des difficultés rencontrées et surtout de prendre directement en charge la programmation de certaines routines.

- Action 2 – Caractérisation de la fumée, expérimentations :

Cette action a été menée dans les temps initialement programmés pour tous les aspects concernant la caractérisation physique et chimique de la fumée. Nous noterons également qu'une méthode innovante d'estimation de la concentration en particules a été développée. Les campagnes de mesures d'écoulement par Imagerie de particules ont démontré clairement le très fort potentiel de cette mesure pour notre application. Le traitement de ces différentes données a fourni des informations importantes pour la précipitation électrostatique. Ces données apportent parfois un regard nouveau sur les phénomènes étudiés.

- Action 3 – Discussion du modèle :

La confrontation mesure et simulation a bien évidemment été retardée par les difficultés rencontrées dans l'action 1. Toutefois, l'incorporation progressive de plusieurs éléments a été réalisée au cours de cette action. Par exemple, l'incorporation du vent ionique, des équations de vitesse de charge des particules, l'analyse des courants induits, l'analyse quantitative des dépôts de particules et l'intervention de la loi de Peek ont constitué des améliorations que nous avons souhaité intégrer dans notre modèle.

- Action 4 – Validation, enrichissement :

Cette phase a bien avancé depuis les 4 derniers mois de ce programme. Elle constitue une phase essentielle à notre démarche. L'outil numérique actuellement disponible intègre de très nombreuses améliorations et constitue indéniablement l'outil numérique le plus performant, à notre connaissance, actuellement disponible pour l'étude de la précipitation électrostatique. Cette action mérite encore, à l'heure actuelle, d'être affinée par une nouvelle phase d'expérimentation sur maquette ou sur notre ancien pilote afin d'obtenir une validation complète de nos hypothèses.

- Action 5 – Optimisation :

Comme nous l'avons évoqué préalablement, cette phase vient tout juste d'être initiée (il y a moins d'un mois et demi). En effet, elle sera complètement amorcée lorsque l'action 4 sera totalement close. De plus, la complexité des géométries à tester et du modèle nous laisse penser

que la période de 3 mois initialement programmée sera révisée. Six à huit mois devraient probablement être nécessaire pour atteindre cet objectif.

- Action 9 – Valorisation des résultats :

La valorisation des résultats actuels a été réalisée essentiellement sous la forme de publications et de présentations orales lors de congrès. Trois articles sont actuellement en phase finale de rédaction et seront donc rapidement soumis à des revues pour publication.

La liste des publications réalisées pendant ces deux années de contrat est la suivante :

- Sérot T., Baron R., Knockaert C., Vallet J.L. (2004) – Effect of smoking processes on the contents of ten major phenolic compounds in smoked fillets of herring (*Clupea harengus*). Food Chemistry. Vol. 85, p.111-120.
- Baron R., Curet S., Knockaert (2002) – Utilisation at-line d'un spectrocromimètre comme indicateur rapide de la « qualité » de harengs fumés - Comparaison des résultats pour différentes technologies de fumage – Actes des journées technologiques « Instrumentation et traitement du signal et des images dans les procédés agroalimentaires et biotechnologiques »- Nantes, France. p. 235 – 239.
- Baron R., Havet M., Pottier L. (2003). Elements of modelling a continuous electrostatic smoking process. Actes du Thème "Optimisation et Conduite" du 9^{ème} congrès de la Société Française de Génie des Procédés – Saint-Nazaire, France. Septembre 2003, p.25- 31.
- Havet M., Pierrat D., Delanoue N., Pottier L., Baron R. (2004). The modelling of the flow of smoke in an electrostatic smoking process. Actes du 9^{ème} Congrès International Conference on Engineering and Food – ICEF 9 - Montpellier, France. Mars 2004.
- Bellier J., Sollic C., Pavageau M., Baron R. (2004). Analysis of the electrostatic precipitation of particles and drops in a smoking process of seafood products. Actes du Congrès Tracers and tracing methods. Ciechocinek, Poland, Juin 2004.
- Baron R., Havet M., Sollic C., Pavageau M., Pierrat D., Knockaert C., Touchard G. (2004). Le fumage du poisson par précipitation électrostatique : approche expérimentale et théorique. Actes de la 4^{ème} Conférence de la Société Française d'Electrostatique. Poitiers, France. Septembre 2004, p.115-119.
- Pierrat D., Baron R. , Havet M. Lecuyer D., Touchard G., Sollic C. (2004) Modélisation d'un procédé de précipitation électrostatique de fines particules : Régularisation d'une approche eulérienne incorporant un fort couplage champ électrique ionisé, mécanisme de décharge électrique, dynamique de la phase porteuse et dynamique des particules. ANSYS: Les Journées de la Simulation numérique, November 8-9, 2004 - Avignon, France

Un accord d'information privilégié entre la société Euroseafood Trading et l'IFREMER a été conclu. Cette société, qui travaille comme coordinateur de consortium d'équipementiers industriels, d'ensembliers et de bureaux d'études pour la conception et la réalisation de chaîne de fabrication industrielle, se prononcera vers la fin du contrat ADEME - IFREMER sur un éventuel positionnement en tant que société de promotion / valorisation / assistance technique du procédé. Elle assure dès maintenant une information auprès de ses clients (industriels transformateurs de produits de la mer) ou partenaires sur ce procédé.

L'objectif principal de ces deux premières années de contrat (**Etape 1**) était d'obtenir un outil numérique très performant permettant de simuler le comportement d'un procédé de fumage du poisson par précipitation électrostatique. A partir de cet outil de simulation, la fin du travail consistait à optimiser le procédé pour pouvoir proposer en début d'année 2005 la construction

d'un démonstrateur (à l'échelle du pilote industriel, étape indispensable pour convaincre les transformateurs de ce secteur).

Nous pouvons considérer que nous avons développé l'un des outils numériques sur la précipitation électrostatique parmi les plus performants. Cet outil est le seul actuellement à intégrer autant d'informations sur la précipitation électrostatique dédiée au fumage de produits alimentaires. Il reste encore quelques phases de validation à compléter, comme par exemple la réalisation d'une campagne PIV sur maquette équipée d'électrodes à fils de petits diamètres. Il conviendra également à l'avenir d'enrichir l'outil développé en ce qui concerne la nature, la quantification des dépôts et des composés adsorbés par la surface du produit à traiter et leur impact sur la « qualité » du produit.

Nous attirons toutefois l'attention sur le fait que nous avons développé notre outil de calcul en réalisant une adaptation du logiciel CFX4.4 en raison de l'ouverture de son code. Mais cette version du logiciel n'est plus aujourd'hui disponible dans le commerce. La dernière version commercialisée est la version 5.7. Or depuis la version 5.5, les routines écrites en 4.4 ne sont plus directement compatible avec les nouvelles versions en raison de modifications majeures des algorithmes de maillage et de calcul. Nous avons donc initié une discussion avec la société développant ce logiciel (ainsi qu'avec certains de ses concurrents) afin que la réactualisation des routines spécifiques soit envisagée pour générer une « toolbox » dédiée à la précipitation électrostatique.

Le développement de cet outil de calcul s'est avéré beaucoup plus complexe que prévu. Un retard dans la validation de cet outil et dans son exploitation à des fins d'optimisation du démonstrateur de fumage en continu a donc été enregistré.

Toutefois, les essais expérimentaux associés ou complémentaires aux travaux de modélisation et de résolution nous permettent aujourd'hui d'être optimistes sur la possibilité de lever le premier point de blocage pour l'industrialisation du procédé. En effet, le principal défaut rencontré sur les installations industrielles de fumage par précipitation consistait dans l'apparition des phénomènes de gouttage des électrodes après 1h30 à 2h d'utilisation. Les essais de laboratoire portant sur l'utilisation d'électrodes fils de petits diamètres (\leq à 0,4 mm) espacés d'une dizaine de centimètres démontrent que le temps d'utilisation du procédé avant nettoyage est ainsi au moins multiplié par 4, ce qui le rend parfaitement compatible avec les fréquences de nettoyage des différentes installations de fumage industrielle.

Cette modification mineure entraîne, selon nos premiers essais, également un effet très positif sur la productivité de l'installation et sur l'aromatisation des produits. Sur ce dernier point, une compréhension plus fine des phénomènes doit encore être menée pour permettre de maîtriser plus correctement l'adsorption des différents composés et mieux connaître l'impact de ces composés sur la « qualité du produit ». Ces éléments s'avèreront essentielles pour envisager l'applicabilité de cette technologie à des poissons fumés à forte valeur ajoutée comme le saumon par exemple qui représente plus des deux tiers du marché français et dont les exigences « qualités » sont plus sévères.

D'autres petites modifications du procédé sont proposées dans ce document (cf. section 9-1) qui devraient permettre d'en accroître son efficacité. Ces modifications n'entraînent pas de bouleversements majeurs dans la conception matérielle du procédé dans le cas d'une application identique à celle de la société Chancerelle (cf. section 1). Il nous semble raisonnable d'évaluer leurs impacts, dans un premier temps, sur des maquettes de laboratoires, puis, dans un second temps, sur notre ancien pilote de fumage en l'adaptant.

application identique à celle de la société Chancerelle (cf. section 1). Il nous semble raisonnable d'évaluer leurs impacts, dans un premier temps, sur des maquettes de laboratoires, puis, dans un second temps, sur notre ancien pilote de fumage en l'adaptant.

Cette démarche permettrait ainsi de mieux évaluer, à moindre coût, les hypothèses formulées dans ce document et de préciser les marchés cibles potentiels de ce procédé qui restent à ce stade encore limités. L'étude des marchés applicatifs de ce procédé et la finalisation, basée sur les principes développés dans ce rapport, des équipements adaptés à ces marchés cibles seront alors du ressort d'un équipementier, accompagné si nécessaire par les structures de valorisation des établissements impliqués dans cette étude.

En résumé, la **prolongation de l'étape 1 du contrat**, pour confirmer et valider les travaux scientifiques et techniques réalisés lors de ces deux années concernant la modélisation des écoulements des particules, **est indispensable** jusqu'au mois de Mai.

La substitution, lors de l'**étape 2**, de la réalisation d'un nouveau démonstrateur par la modification et l'**adaptation de notre ancien pilote industriel** sera ensuite envisagée suivant les résultats de l'étape 1.

La conception d'un démonstrateur de taille industrielle de nouvelle génération pourra ensuite être aisément esquissée si nécessaire. La finalisation, la réalisation et le financement de ce démonstrateur devraient alors être pris en charge par un équipementier. Cet équipementier serait alors lié contractuellement avec les partenaires de ce programme pour exploiter les résultats nouveaux issus du programme et/ou les résultats associés, si nécessaire, à la technologie brevetée détenue par l'IFREMER (cf. brevets cités en section 1).

11/ Résultats numériques complémentaires

Le cas des calculs à faible vitesse entrante, même sur des géométries simples, reste délicat. Le calcul ne converge pas correctement et les oscillations pour des faibles différences de conditions initiales sont considérables. Le calcul devrait probablement se faire d'une autre manière (calcul en instationnaire notamment) pour pallier ces difficultés. Ce constat est très gênant pour permettre la confrontation entre les mesures PIV et les résultats numériques. Nous avons choisi, en accord avec l'UMR GEPEA – EMN et en supplément du programme initial, de réaliser une troisième campagne de mesures PIV sur une maquette avec des fils de petits diamètres, des vitesses entrantes plus grandes et un canal de visualisation plus large. Nous avons donc réalisé une nouvelle maquette en plexiglas et bois avec des fils de diamètre 0.25mm. La tension de ces fils, sans trop perturber le champ de vision de la caméra, s'est avérée très difficile à réaliser. La manipulation de cette maquette est donc très délicate. La campagne initialement programmée fin Mai-début Juin a malheureusement dû être déprogrammée en raison de problèmes techniques sur la caméra. Pour des raisons de disponibilité du matériel, cette campagne est reportée d'une année.

Nous travaillons actuellement sur la réalisation d'essais de fumage avec des vitesses entrantes (par jets) beaucoup plus importantes. Ces vitesses, hors effet électrostatique, sont de l'ordre de 0,8 m/s soit environ 6 fois plus importantes que lors des essais sur les deux premières années. Notons également que dans ce cas la concentration particulaire entrante est modifiée par un fort effet de dilution avec l'air, mais le tirage augmentant au niveau de la pyrolyse la quantité d'imbrûlé dans les cendres de la combustion diminue considérablement ce qui laisse à penser que la quantité de particules générées dans le temps est plus élevée.

Jusqu'à présent, la résolution des équations nécessitait des temps de calculs importants même sur des géométries bidimensionnelles. La figure ci-dessous illustre ainsi des difficultés de convergence lorsque l'on considère l'ensemble des phénomènes. Nous avons donc axé nos efforts sur l'amélioration des techniques numériques pour éviter que ces temps de calcul ne soient prohibitifs et empêchent l'exploitation ultérieure du modèle sur des géométries plus complexes. Ceci a nécessité un investissement très important compte tenu de la nécessité de modifier considérablement les méthodes employées et d'approfondir certaines sous-routines spécifiques.

Pour optimiser cet algorithme, nous avons dans un premier temps travaillé sur la prédiction de la densité d'ions et l'implantation d'une méthode itérative plus rapide de détermination de cette densité au fil. La deuxième figure ci-dessous montre que la convergence est atteinte beaucoup plus rapidement sans oscillations des résidus à des valeurs trop élevées. Nous poursuivons à l'heure actuelle cette démarche en essayant d'en déterminer les limites et en vérifiant sa non-sensibilité au maillage. Ce point sera d'autant plus critique quand on étudiera des géométries nécessitant plus de mailles.

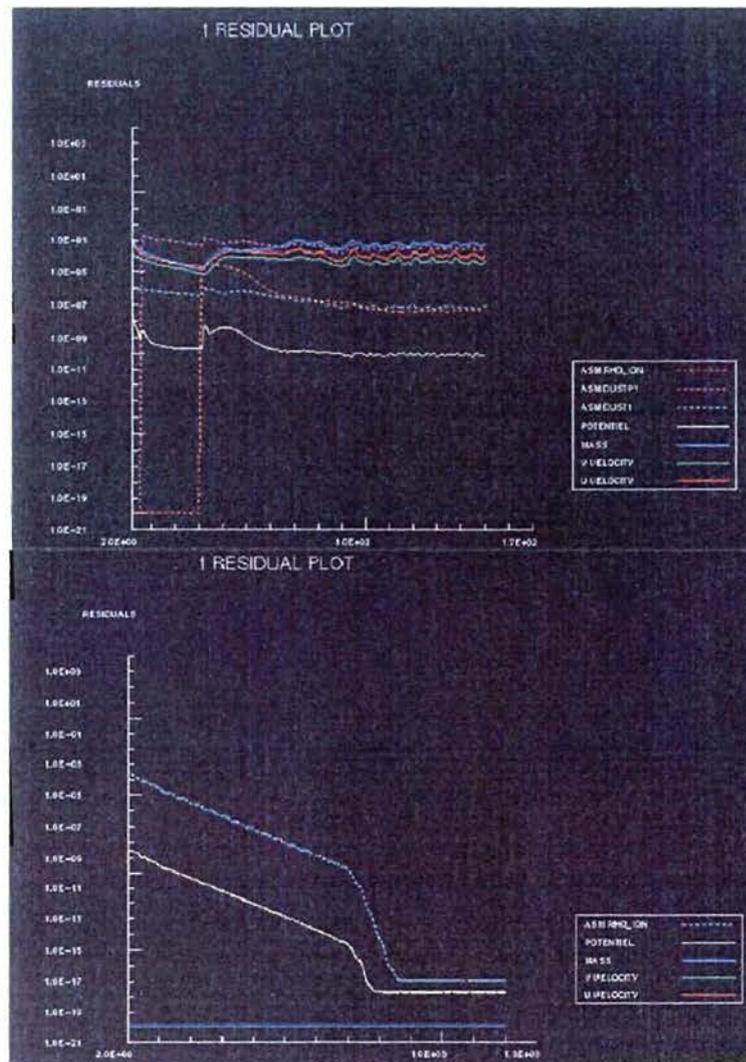


Figure 92 – Exemples de vitesse de convergence

L'intérêt d'un modèle est de permettre de réaliser rapidement des études paramétriques. L'exemple ci-dessous est typique de cet intérêt. Nous avons déterminé le pourcentage de particules collectées par rapport au nombre entrant dans l'installation. Il s'agit de la configuration de la maquette IFREMER avec un potentiel fixé à 40kV. En fonction de la

vitesse de la phase porteuse, ici entre 0,25 et 1,5 m/s, on observe une décroissance de l'efficacité. Celle-ci étant bien sûr plus faible pour les particules de plus faible diamètre. Evidemment, cette illustration sommaire témoigne uniquement des potentialités d'exploitation. Il faut toutefois poursuivre les améliorations du code pour s'assurer de l'obtention de résultats fiables rapidement.

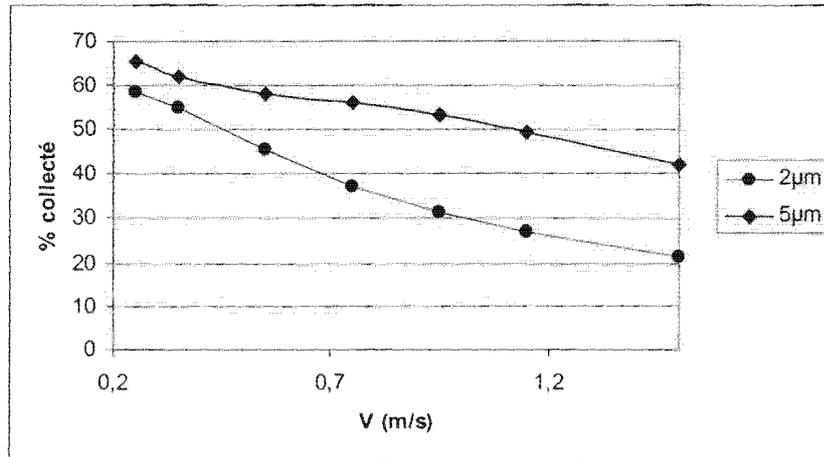


Figure 93 – Influence de la vitesse entrante sur le pourcentage de collecte (pour une géométrie 3 fils)

La réalisation de géométrie en trois dimensions compatible avec les contraintes industrielles, comme par exemple, la réalisation de grille, le confinement du champ électrique sur une portion de la largeur et non la totalité afin de limiter l'encrassement des parois, la polarisation partielle du plafond du tunnel, sont en cours de finition. La possibilité d'inclure un calcul instationnaire, pour simuler le comportement d'un flux de fumée à vitesse variable en entrée via des conditions aux limites variables dans le temps, a également été testée. Malheureusement le calcul s'avère actuellement instable ou à convergence très lente et fournissant des résultats dans ce cas peu cohérents.

Ce point s'avère très limitant pour proposer à terme une optimisation géométrique conséquente du fumoir par l'intermédiaire d'un outil de résolution numérique. Nous cherchons actuellement à vérifier les possibilités de calcul en 3D sur des géométries élémentaires afin de comprendre la nature des problèmes numériques observés.

L'outil numérique doit donc être travaillé pour atteindre ces objectifs initiaux. Pour l'optimisation du tunnel nous avons donc été contraints de nous contenter des résultats numériques en deux dimensions sur des géométries relativement simples. Toutefois, les informations apportées restent extrêmement pertinentes et utiles pour la réflexion et ne remettent en rien en cause la pertinence de cet outil.

12/ Description des modifications apportées au pilote IFREMER

Comme évoqué dans les conclusions provisoires (cf. partie 10), nous avons fait le choix de conserver la base du pilote IFREMER et d'évaluer sur ce pilote, avec des installations pouvant ne pas être nécessairement compatibles avec des contraintes industrielles à long terme, l'intérêt de modifications, souvent mineures, de principe de fonctionnement. Ces évaluations permettront à terme de proposer des schémas de procédé pour des installations industrielles futures.

Les modifications apportées sont les suivantes :

1/ La forme de l'électrode de décharge :

- L'utilisation de petits fils parallèles entre eux et perpendiculaires à l'écoulement de diamètres 0.25 mm et 0.35 mm.
- La modulation de l'espace entre fils (6 et 10 cm)
- La modulation de la hauteur entre les deux électrodes (14 cm et 8 cm)
- La polarisation du plafond soit sous forme d'une plaque soit sous la forme de fils

2/ La modification des caractéristiques du générateur de fumée

3/ La modification de la vitesse entrante (qui agit également sur le tirage du générateur de fumée)

4/ La répartition cyclique ajustable des flux entrants (avec un débit global entrant constant mais une répartition sur les deux entrées fluctuante)

Les deux premiers points ont été testés et analysés. Le troisième point a fait l'objet de quelques essais dont les analyses et les résultats n'ont été que partiellement dépouillés. Le 4^{ème} point est en cours de montage, et fera l'objet d'une campagne expérimentale en Novembre 2005.

- Point numéro 1 :

Nous avons d'abord cherché à réaliser des jeux d'électrodes sur un support indépendant (du châssis et du capot du fumoir) et aisément transportables afin d'utiliser le même principe avec le fumoir de la société Chancerelle à Douarnenez (en adaptant toutefois la largeur des électrodes et la hauteur des supports). Nous avons pour cela réalisé des jeux d'électrodes dont le support était composé de tuyaux et de raccords en PVC rigidifiés à l'intérieur par une pâte à bois. Les différents éléments ont été collés et percés pour permettre le passage d'un fil serpentant de part en part du support pour former un agencement de fils parallèles entre eux, à une distance préalablement définie. L'électrode est donc constituée d'un agencement de fils orientés perpendiculairement à l'écoulement et à la circulation des produits à traiter.

Ce type d'électrodes a permis la réalisation de plusieurs essais mais s'est rapidement avéré trop fragile. De plus, le support a pris feu lors d'un essai dans la société Chancerelle (sans dommage pour le reste de l'installation toutefois). Nous avons alors choisi de construire des électrodes plus robustes et fixées au capot du fumoir.

Ces électrodes ont alors été réalisées avec un support en bois collé sur les côtés du capot avec un seul fil serpentant à travers ce support en bois. Le premier inconvénient observé est la rigidité des électrodes ; en effet au bout d'une dizaine de fumages, les fils se détendent et nous ne possédons pas de système pour les retendre, il faut donc les remplacer. Le deuxième inconvénient est le support qui n'est pas pratique à manipuler pour le nettoyage, cela peut abîmer les électrodes voire les casser, car elles sont très fragiles (Diamètre : 0.2mm ; Résistance : 200g).

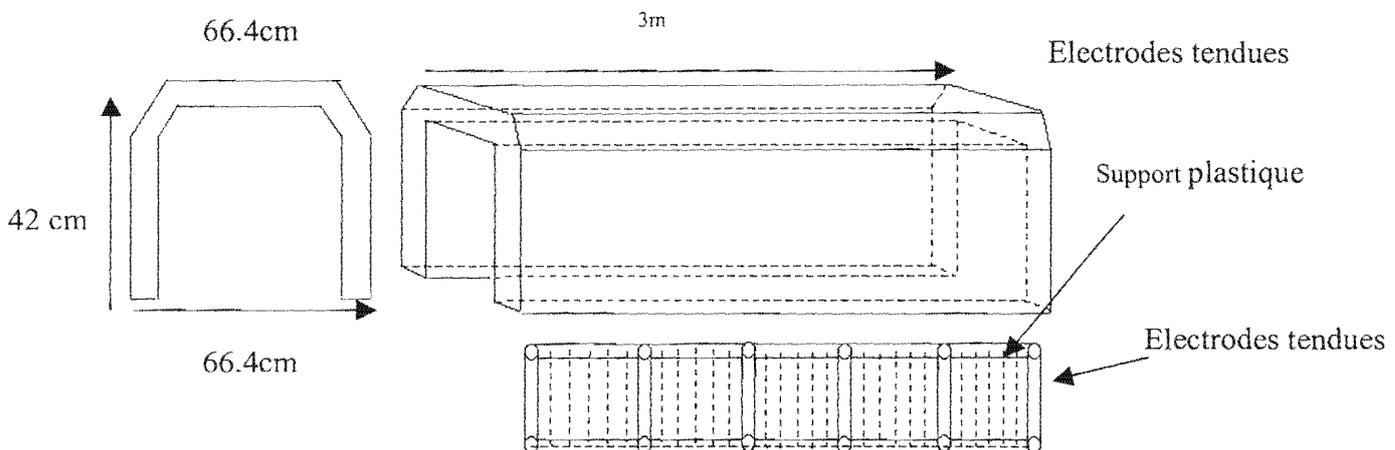


Figure 94 a - 1^{ère} électrode fixée au capot

En premier lieu, il a été décidé de coller une structure en bois à l'intérieur du tunnel (fixation par collage) afin de renforcer la protection des électrodes, ensuite de réaliser un système qui puisse détendre ou tendre ces mêmes électrodes grâce à des crochets placés tous les 10 cm.

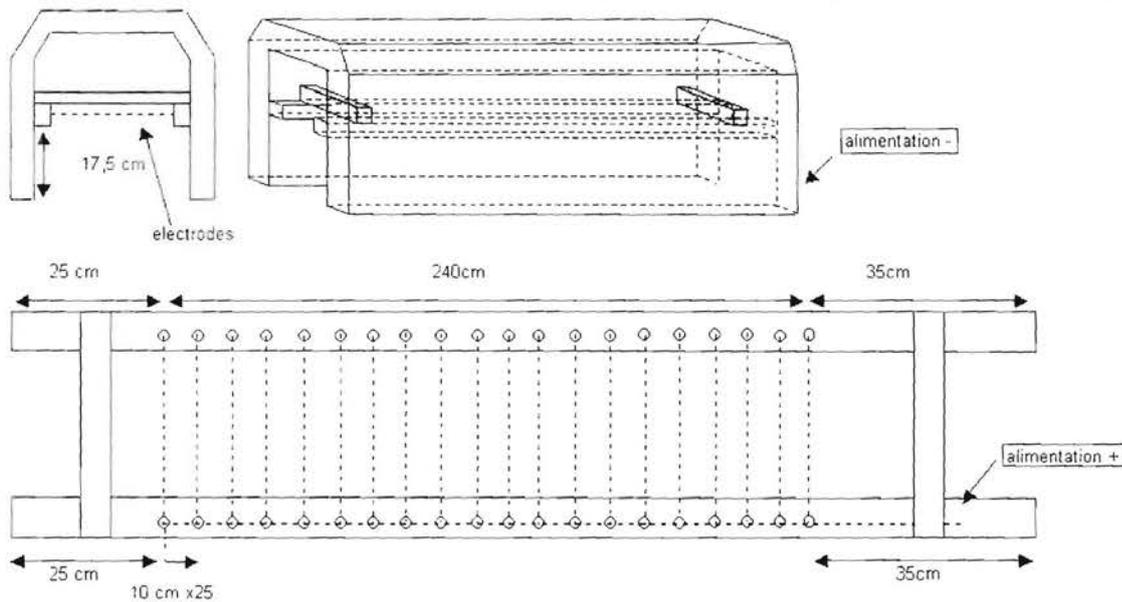


Figure 94 b – Schéma des électrodes actuellement installées



Figure 95 – Photographies des électrodes

Ce système peut être aisément basculé pour permettre un nettoyage simple par pulvérisation d'une solution de soude diluée puis un rinçage (sans pression pour ne pas rompre les fils).

- Point numéro 2

Afin d'améliorer la maîtrise de la génération de fumée, nous avons choisi d'étudier l'incorporation sur la tuyauterie d'arrivée des fumées (donc entre le générateur de fumée et le fumoir) de mesures opacimétriques adaptées. L'utilisation d'une photodiode amplifiée 10530 EAW couplée à un éclairage à ampoule a été étudiée lors du stage de BTS de M. Fonteneau. Ce capteur simple permet de suivre l'évolution de la concentration particulaire. Même si l'étalonnage n'a pas pu être réalisé totalement, en liaison avec l'analyse granulométrique laser décrite dans la section 3-1, cette mesure nous fournit une indication comparative (et non quantitative) sur la concentration en particules générée. La figure 96 illustre le type de signal obtenu par la mesure opacimétrique après un changement (augmentation) sur la quantité de petits copeaux de hêtre qui tombe sur la plaque thermostatée.

Le générateur de fumée à plaque thermostatée Thirode a permis d'obtenir un produit ayant des caractéristiques sensorielles plus proches des produits fumés traditionnels comparé au générateur à friction, mais il fournit une quantité de particules beaucoup plus faible que la friction.

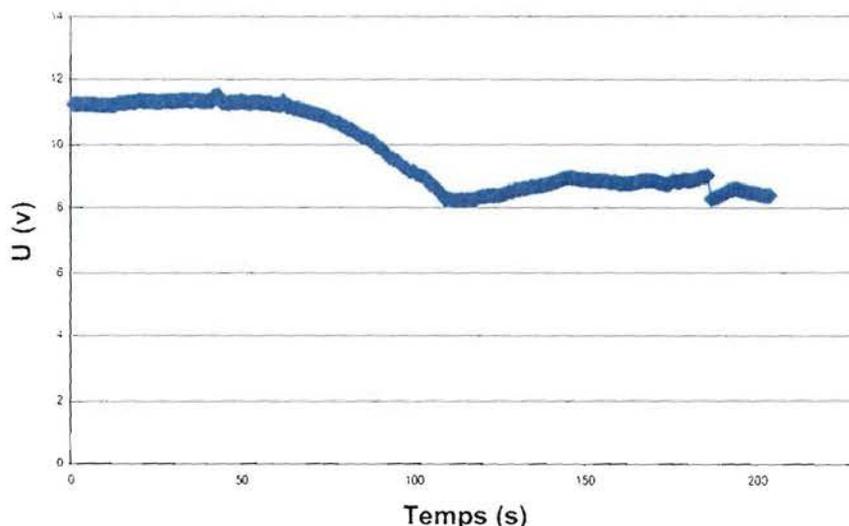


Figure 96 – Evolution du signal de réception de quantité de lumière (signal sans fumée = 14 V environ)

Plusieurs améliorations sur le générateur initial ont été apportées afin de maximiser sa production et de la rendre plus régulière. Le premier point à consister en l'utilisation de contre-plaques trouées pour optimiser la répartition de la sciure ou des copeaux sur la plaque (cf. Figure 97).

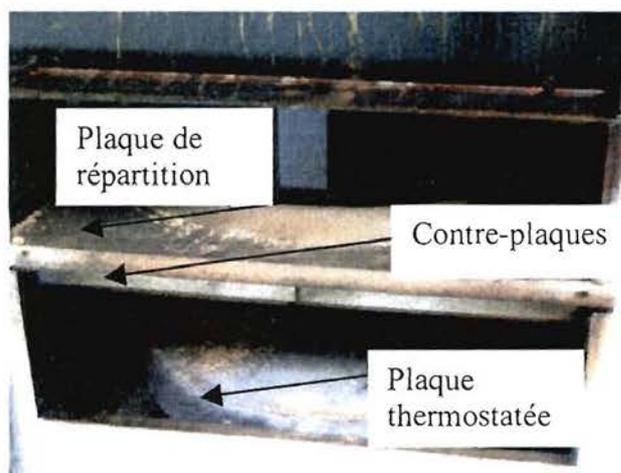


Figure 97 – Réglage de répartition des copeaux

Une seconde modification, actuellement en cours de réalisation, consiste à monter un variateur sur la trémie d'alimentation en copeaux pour pouvoir moduler la vitesse de rotation (cf. Figure 98) et désactiver la fin de course, afin de fonctionner en continu. Le système actuel était initialement composé d'une vitesse fixe assez rapide et d'un capteur de fin de course permettant d'arrêter la rotation après un tour. Une temporisation réglable se déclenchait après une rotation. L'apport en copeaux ou sciure était alors, avec ce mode de fonctionnement, réalisée de façon cyclique.



Figure 98 – Installation d'un variateur sur la trémie d'alimentation en copeaux

- point numéro 3 :

Nous avons installé une turbine beaucoup plus puissante avec variateur afin de pouvoir ajuster, sur une large gamme, la vitesse entrante de la fumée. La figure 99 montre le montage réalisé. L'utilisation d'une turbine disposant d'un couple au démarrage beaucoup plus puissant évite le nettoyage systématique de la turbine après chaque utilisation, même si évidemment un nettoyage périodique reste indispensable.



Figure 99 – Turbine de tirage du générateur de fumée

Pour pouvoir créer un flux préférentiel dans le fumoir, il convient de disposer d'un débit de soutirage en rapport avec le flux entrant. Nous avons donc installé une turbine plus puissante en sortie fumée du fumoir (cf. Figure 100).



Figure 100 – Turbine d'extraction des fumées

- point numéro 4 :

La réalisation d'un servomécanisme de position, cf. rapport de stage de M. Fonteneau, pour permettre la répartition en cycle déphasé de la fumée sur les deux admissions est en cours de finition.

13/ Description des modifications apportées au fumoir de la société Chancerelle

Nous avons fait le choix, en accord avec la société Chancerelle, de perturber le moins possible l'installation existante tout en évaluant l'impact de la principale préconisation de modification que nous avons formulée à la section 10. La seule modification a donc consisté en l'utilisation d'une électrode à fils parallèles de diamètre 0.35 mm. L'espacement entre fils a été fixé à 10 cm, et la hauteur entre électrode de décharge et électrode de collecte à 8 cm. L'électrode de décharge initiale était constituée d'un maillage (selon la figure 101a) et était placée environ 14 cm au-dessus de l'électrode de décharge (cf. figure 101b).



a /
b /
*Figure 101 – a / électrode de décharge initiale,
b/ électrode de collecte où circule le produit à traiter*



Figure 102 – Fils constituant la nouvelle électrode installé sur le fumoir Chancerelle

14/ Résultats des essais sur le plan microbiologique

Les résultats présentés dans cette section ont été obtenus dans le cadre du stage de BTS de M^{lle} Berton. Les expérimentations ont toutes été réalisées à partir des installations IFREMER avec l'électrode à fil de diamètre 0.25 mm et une hauteur inter-électrodes de 14 cm, avec le générateur à plaque thermostatée et une vitesse entrante non encore modifiées.

L'objectif de ces expérimentations est de fournir des éléments de réponse à la question suivante : quelle est l'influence d'un fumage électrostatique sur la flore du saumon fumé, et notamment sur les germes pathogènes tel *Listeria monocytogenes*, en comparaison avec un fumage traditionnel ?

Nous avons choisi de comparer 3 procédés de fumage différents : un fumage traditionnel, un fumage électrostatique en tunnel (procédé continu) et un fumage électrostatique en cellule par cycles discontinus.

Ainsi, les manipulations ont visé à qualifier et à quantifier les différences qui apparaissent au niveau microbiologique sur des saumons fumés par les différents procédés. Nous avons donc étudié la croissance de différentes flores : la flore totale, les *Listeria*, la flore lactique, les *Lactobacillus*, les entérobactéries, les levures/moisissures, et enfin les *Brochothrix thermosphacta*. Etant donné que *Listeria monocytogenes* nous intéressait particulièrement, nous avons inoculé nos échantillons de saumon fumé avec cette bactérie. Cette inoculation était censée représenter une contamination lors du processus de transformation du saumon. Nous avons dans cet objectif voulu simuler deux cas de figure :

- une contamination après le fumage (relativement fréquente lors du tranchage des filets) : **expérience 1**
- une contamination avant le fumage (l'origine peut être la contamination de la matière première elle-même, ou un contact avec du matériel, une personne ou une surface souillée) : **expérience 2**

Nous avons également réalisé des analyses biochimiques afin de déterminer les teneurs en divers constituants. Nous nous sommes particulièrement intéressés aux taux de phénols et de sel ; en effet, ces deux composants ont un effet bactériostatique, voire bactéricide, et il était important de pouvoir discuter les résultats des analyses microbiologiques avec ces valeurs.

La flore du saumon fumé est complexe et varie selon les usines. De plus, le processus de transformation est long et comprend de fréquentes manipulations, au cours desquelles le produit peut être recontaminé. Elle est en général constituée de bactéries marines à gram négatif mais également de germes comme des bactéries lactiques, des entérobactéries (*Serratia*), des *Brochothrix thermosphacta*, et parfois des levures. Le risque majeur dans le cas du saumon fumé est la présence de *Listeria monocytogenes*, germe pathogène. En effet, cette bactérie est capable de se développer à basse température (proche de 0°C) et en présence de fortes concentrations en sel (jusqu'à 10% en phase aqueuse). La présence de *Listeria* peut être due à une contamination du poisson lors du procédé de transformation, mais peut également provenir d'une contamination de la matière première elle-même. *Listeria monocytogenes* est un bacille saprophyte à gram positif, mobile à 22°C, non capsulé et non sporulé, largement répandu dans la nature. Ce germe est responsable d'infections sévères chez l'homme. En effet, il s'agit d'une bactérie invasive, capable de traverser le placenta, de pénétrer le système nerveux central et de croître à l'intérieur de la plupart des cellules de l'hôte infecté. Elle est responsable d'une infection appelée listériose, qui est d'origine digestive et se traduit par une septicémie. Les cas de listériose restent cependant rares : en France, le nombre annuel de cas déclarés est inférieur à 4 cas par million d'habitants. A l'heure actuelle, aucun cas n'a été recensé comme étant dû à la consommation de saumon fumé. Bien qu'il existe un traitement antibiotique, l'infection conduit à la mort du sujet dans 25 à 30% des cas.

- **expérience 1**

Effet de différents procédés de fumage sur la croissance des flores microbiennes du saumon
Des poissons pesant entre 3 et 4 kg (calibre 3-4) étêtés, parés et filetés à la main, et non pelés ont été salés par répartition à leur surface d'une couche de sel fin d'environ 1 cm d'épaisseur, pendant une durée de 3 heures. Enfin, le dessalage s'est effectué par un rinçage au jet d'eau,

l'eau utilisée étant l'eau courante froide. Toutes ces étapes ont été réalisées dans une salle réfrigérée à 6°C. Après le dessalage, les filets de saumon ont été séchés dans l'enceinte de fumage traditionnel (sans arrivée de fumée), à une température de 24°C et une humidité relative de 65%, pendant une durée de 1h30.

La phase suivante a été le fumage. Pour cette étape, les saumons ont été répartis en 3 lots (5 filets par lot) afin de pouvoir tester les 3 procédés de fumage :

- **Le fumage traditionnel (générateur de fumée à autocombustion et fumage en enceinte climatisée) :** Le fumage est effectué à 24°C, 65% d'humidité pour une durée de 2h15.
- **Le fumage électrostatique en tunnel** pendant 15 minutes avec générateur à plaque thermostatée. Un pré-séchage (= passage sans fumée) est effectué dans le tunnel (EHD drying) afin d'obtenir une teneur en eau finale comparable entre les deux procédés. Les conditions opératoires étaient donc les suivantes :
 - Passage sans fumée : 20 minutes ; 45 kV ; 1 mA
 - Passage avec fumée : 15 minutes ; 25 kV ; 0,08 à 0,09 mA.
- **Le fumage électrostatique discontinu en cellule :** ce procédé consiste en un compromis des deux techniques précédentes. Le fumage a été réalisé dans l'enceinte de fumage traditionnel, avec une arrivée de fumée en continu. Des électrodes avaient été installées de part et d'autre des filets, de façon à instaurer un champ électrique pendant des cycles de 10 secondes, à intervalles réguliers (ici, toutes les 3 minutes). La durée globale de traitement était de 45 minutes. Pendant les cycles, la tension était réglée à 15 kV et nous avons mesuré une intensité de 0,35 mA. Les conditions opératoires (température de 24°C et une humidité relative de 65%) étaient bien entendu les mêmes que pour le fumage traditionnel puisque les produits étaient fumés en même temps dans la même enceinte climatisée.

Les temps de fumage ont été déterminés d'après les résultats d'une série de pré-essais, non décrits ici. Le but de ces manipulations préliminaires était d'obtenir des poissons présentant à peu près les mêmes taux de phénols totaux, ce critère étant, un indicateur de l'intensité du fumage. Après le fumage, nous avons préparé des échantillons de saumon de façon à pouvoir mener des analyses microbiologiques pendant 7 semaines, à raison de deux analyses par semaine. Afin de vérifier la répétabilité, nous avons décidé de prévoir 3 échantillons par lot. Au total, 42 (2×3×7) sachets de 30g saumon fumé pour chaque type de fumage ainsi que 5 autres échantillons de 60g étaient nécessaires en vue d'effectuer des analyses chimiques. Pour chaque lot, nous avons prélevé un morceau au milieu de chacun des cinq filets de façon à obtenir au total environ 1,5 g de chair. Nous avons ensuite découpé le tout en petits dés d'environ 1 cm³, de façon à optimiser l'homogénéité des échantillons. Ce travail devant s'effectuer en atmosphère stérile, les manipulations ont été effectuées sous la hotte à flux laminaire.

Les sachets de 30g ont ensuite été inoculés par *Listeria monocytogenes*. Ils ont par la suite été scellés sous vide puis conservés à 4°C, température de conservation préconisée par les industriels. Les sachets de 60g ont quant à eux également été scellés sous vide, puis congelés à -80°C afin que les dés de saumon fumés ne subissent aucune altération avant d'être analysés.

- expérience 2

Effet direct de l'étape de fumage sur *Listeria monocytogenes* et sur la flore totale de saumon inoculé avant fumage.

Comme il pourrait s'avérer dangereux d'introduire des *Listeria monocytogenes* dans les équipements de transformation du saumon, nous avons choisi de ne pas fumer des filets de saumon, mais de travailler plutôt sur des galettes de saumon déposées dans des fonds de boîtes de Pétri, afin d'éviter tout contact entre la chair de saumon et le matériel. Nous avons également choisi une souche de *Listeria* non pathogène.

Le but de cette manipulation était de dénombrer les germes présents dans les galettes de saumon avant et après fumage, puis de suivre leur croissance pendant 3 semaines après le fumage. Il nous fallait donc suffisamment de galettes pour mener :

- une analyse chimique par lot, à raison de 3 échantillons par lot, soit 9 galettes (non inoculées pour ne pas souiller le matériel du laboratoire de biochimie).
- une vérification du taux d'inoculation sur 3 galettes inoculées mais non fumées.
- une analyse microbiologique juste après le fumage, soit 9 galettes (3 pour chaque fumage).
- des analyses microbiologiques pendant 3 semaines, à raison d'une analyse par semaine, soit 27 galettes.

Nous arrivions ainsi à un total de 48 galettes de saumon. Quatre saumons de calibre ¾ ont été préparés comme indiqué dans expérience 1. Le découpage des galettes s'est effectué à l'aide d'un fond de boîte de Pétri servant ainsi d'emporte-pièce. Après avoir obtenu ces galettes, il nous a fallu ajuster leur masse autour de 55g, plus ou moins 3g. Nous avons donc éliminé celles dont la masse était inférieure à 52g, et recoupé celles dont la masse était supérieure à 58g. Enfin, les galettes ont été disposées dans des fonds de boîtes de Pétri afin de les isoler du matériel de fumage. Nous avons ensuite appliqué à ces galettes les traitements suivants :

Procédé traditionnel	Procédé électrostatique en tunnel	Procédé électrostatique en cellule
Salage sel sec: 1h15min, température : 6 °C		
Séchage : 1h30 min ; T = 24°C ; HR = 65%		
Inoculation par <i>Listeria</i> (sauf pour les galettes destinées aux analyses chimiques)		
Fumage : 2h15min ; 24°C; HR = 65%	Séchage en tunnel : 20min; 45kV ; 1,02mA Fumage : 12min ; 25kV ; 0,05mA	Fumage : 45min ; T = 24°C; HR = 65% Cycles électrostatiques : 10s toutes les 180s ; 15kV ; 0,02mA
Mise sous vide et réfrigération à 4°C		

Comme précédemment, les temps de fumage et de salage ont été choisis suite à des pré-essais non décrits ici.

Inoculation par *Listeria*

Cas de l'expérience 1 : inoculation par L. monocytogenes

En vue d'étudier la croissance de *Listeria monocytogenes* dans du saumon fumé par les trois procédés, nous avons inoculé des dés de saumon par une préculture. La souche que nous avons utilisée est la souche EU 2167. Nous l'avons choisie parmi 33 souches de *Listeria monocytogenes* isolées du saumon fumé et constituant la collection européenne HURDLETECH, classées selon leur sensibilité aux composés phénoliques (et particulièrement à l'isoeugénol à raison de 0,5mg/l). Six souches ont été retenues comme représentatives de la collection ; parmi celles-ci, la souche EU 2167 que nous avons sélectionnée est considérée comme assez sensible. Nous espérons par ce choix pouvoir détecter un maximum de

différences entre les trois lots de saumon fumés par les trois procédés. Nous souhaitons inoculer les dés de saumon à raison de 100 *Listeria*/g environ. Cette valeur correspond à la valeur maximum autorisée par la législation dans du saumon en fin de DLC. Il fallait pour cela diluer 10⁵ fois la préculture. Après inoculation, les sachets de dés ont été conditionnés sous vide puis réfrigérés à 4°C.

Nous souhaitons suivre la croissance de plusieurs flores sur les échantillons de dés de saumon inoculés par *Listeria monocytogenes*. Pour cela, nous avons effectué desensemencements 2 fois par semaine afin de dénombrer ensuite les différentes flores. Nous avons travaillé sur les 3 lots de saumon, à raison de 3 échantillons par lot, soit 9 échantillons à chaque fois. Un dénombrement par semaine de la flore lactique, les *Lactobacillus*, les levures/moisissures, les entérobactéries et enfin les *Brochothrix thermosphacta* était effectué. Pour la flore totale et les *Listeria*, deux dénombrements étaient réalisés par semaine, ces deux critères étant ceux qui nous intéressaient le plus. Tous lesensemencements se déroulaient sous flux laminaire.

Cas de l'expérience 2 : inoculation par L. innocua

Afin d'inoculer les galettes de saumon avant fumage, nous devions par sécurité choisir une souche de *Listeria* non pathogène, afin de ne pas risquer de contaminer les équipements de fumage. L'inoculation par la même souche que dans l'expérience 1 était donc proscrite. Nous avons alors choisi une *Listeria innocua*. La souche RF 2175 nous a paru la plus appropriée car il s'agit de celle dont la sensibilité aux composés phénoliques de la fumée se rapproche le plus de celle de *L. monocytogenes* EU 2167. Nous espérions ainsi pouvoir plus facilement établir des comparaisons entre les deux expériences. Nous avons préparé une préculture de la même façon que dans le cas de l'expérience 1. Nous souhaitons inoculer les galettes de saumon à raison de 10⁴ *Listeria*/g. En effet, nous prévoyions que l'étape de fumage allait réduire la charge bactérienne. Etant donné que nous devions inoculer en surface, il nous a paru plus judicieux de prévoir une inoculation à 1% en volume par rapport à la masse. Nous avons ensuite procédé à l'inoculation de 39 galettes de saumon. Pour cela, nous avons réparti les fonds de boîtes de Pétri contenant les galettes sous hotte à flux laminaire. Puis nous avons utilisé un appareil appelé aérographe qui permet de pulvériser la suspension bactérienne sur le produit à inoculer. L'intérêt de cette technique ici résidait dans le fait qu'elle permettait une répartition homogène de l'inoculum à la surface des galettes. Pour terminer, les fonds de boîtes de Pétri contenant les galettes de saumon ont été conditionnés sous vide puis réfrigérés à 4°C. Lors de cette deuxième expérience, nous souhaitons étudier l'effet direct du fumage sur les bactéries puis suivre leur croissance durant les trois semaines suivant le fumage. Nous avons donc effectué des dénombrements sur 3 galettes inoculées mais n'ayant pas subi de fumage, afin de vérifier le taux d'inoculation ; puis nous avons réalisé un dénombrement par semaine au cours des trois semaines suivantes. Seules la flore totale et les *Listeria* ont été dénombrées.

Inoculation après fumage (expérience 1) - résultats

Composition chimique des échantillons analysés

Après avoir effectué les différentes analyses sur les sachets de 60g de dés de saumon fumé prévus à cet effet, nous avons obtenu les résultats moyens suivants :

	Fumage traditionnel	Fumage électrostatique en tunnel	Fumage électrostatique en cellule
Teneur en phénols (mg pour 100g)	0,98 ± 0,07	0,66 ± 0,06	1,43 ± 0,16

Teneur en NaCl (g pour 100g)	2,5 ± 0,09	2,3 ± 0,12	2,2 ± 0,06
Teneur en eau (g pour 100g)	65,5 ± 0,44	66,7 ± 0,17	64,6 ± 0,97
Teneur en lipides (g pour 100g)	10,0 ± 0,37	9,6 ± 0,32	10,9 ± 0,53

Analyses chimiques pour l'expérience 1 : chaque valeur correspond à la moyenne de 5 essais ± IC (intervalle de confiance)

La répétabilité d'un lot à l'autre est moyenne pour ce qui est de la teneur en phénols totaux. Par contre, elle est convenable pour les autres critères étudiés.

Cinétique de croissance de différentes flores du saumon après fumage par les trois procédés

La croissance des différentes flores a été suivie pendant 35 jours (cf. figure 104).

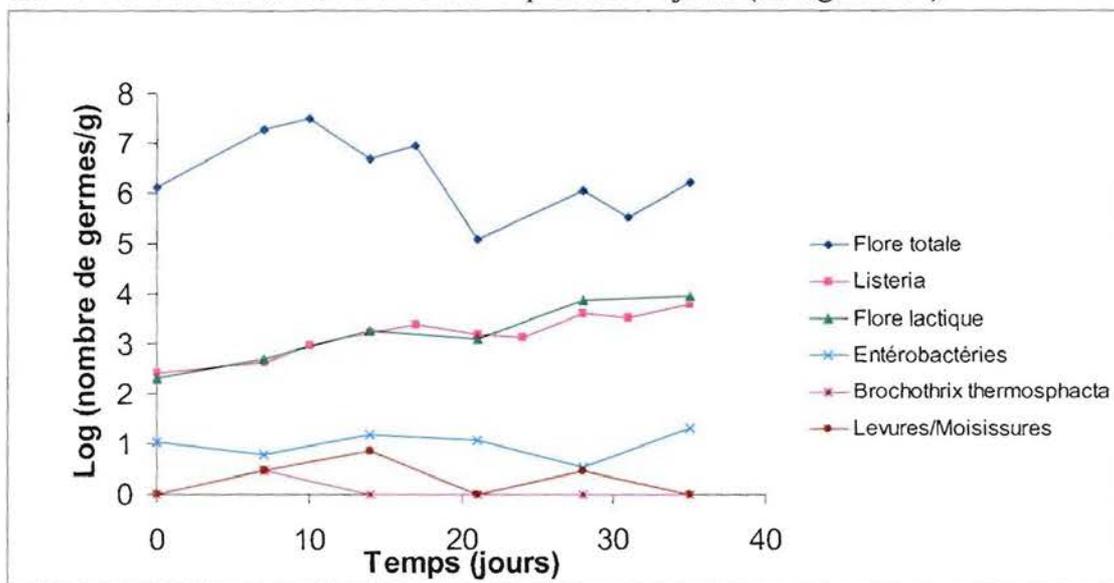


Figure 104 : croissance de différentes flores sur du saumon fumé traditionnellement.

Cette figure permet de visualiser le profil microbiologique du produit étudié. Ainsi, on s'aperçoit que la flore totale initiale est très importante (environ 10^6 germes/g). A titre de comparaison, la contamination initiale de saumon fumé industriellement (d'après une étude sur des produits français et européens) peut varier de 10^2 germes/g pour les usines les plus propres, à 10^6 pour les lots les plus contaminés. Cette contamination est forte par rapport aux précédentes observations effectuées sur nos installations. La procédure habituelle de nettoyage/désinfection des équipements a pourtant été respectée. Une décontamination plus poussée devra être menée pour poursuivre des investigations de ce type. Cette contamination initiale forte nous oblige à un devoir de réserve sur l'analyse des résultats.

Nous pouvons remarquer que la phase exponentielle est très courte (environ 7 jours), ce qui indique que les germes présents se multiplient aisément même à 4°C ; la phase stationnaire est ainsi atteinte très rapidement. On observe trois flores, présentes en très faibles quantités (moins de 10^2 à 10^3 germes/g) : les entérobactéries, les levures/moisissures, et les *Brochothrix thermosphacta*. L'exactitude des données concernant ces trois flores est discutable, car le nombre de colonies était en général inférieur au seuil de détection. Il est à noter que la présence de *Brochothrix thermosphacta* sur le milieu STAA a été confirmée par la réalisation de tests d'orientation classiques (gram +, catalase +, oxydase -). Cette vérification était importante car la sélectivité de ce milieu n'est pas toujours totale. Nous pouvons par ailleurs préciser que la

majorité des colonies ayant poussé sur milieu OGA étaient des levures, pour seulement très peu de moisissures. L'identification des levures a de plus été confirmée par la réalisation d'états frais sur quelques colonies. La flore lactique totale semble plus présente avec un taux atteignant presque 10^5 germes/g. Cependant, la courbe de cette flore est confondue avec celle des *Listeria* ; nous avons donc supposé que les colonies ayant poussé sur milieu Elliker étaient en réalité des *Listeria*. Pour vérifier cela, nous avons réalisé des tests complémentaires qui ont confirmé cette hypothèse. La flore lactique effective était donc présente en quantité bien inférieure à celle des *Listeria*. Par ailleurs, aucun *Lactobacillus* n'a jamais été relevé sur milieu Rogosa. On peut ainsi remarquer qu'outre la flore totale, aucune des autres flores étudiées ici n'est présente en quantité très importante, bien qu'il s'agisse de flores classiquement retrouvées sur le saumon ; cela laisse supposer que la flore totale est constituée en majorité de bactéries à gram négatif, probablement d'origine marine comme les *Vibrionaceae*, pour lesquels aucun milieu sélectif adéquat n'était disponible. Des tests effectués sur plusieurs colonies ayant poussé sur Long and Hammer ont effectivement révélé la présence d'une majorité de gram -.

Quant aux *Listeria*, leur présence est bien sûr due à l'inoculation effectuée en début d'expérience ; on remarque que le taux d'inoculation est proche de ce que l'on présumait : en effet, nous voulions inoculer le saumon à raison de 100 germes/g. Or, les dénombrements ont révélé un taux de 200 germes/g environ, soit une valeur légèrement supérieure.

- Influence des 3 procédés de fumage sur la croissance de *Listeria* :

La figure 105 présente la croissance des *Listeria* dans du saumon fumé par les trois procédés.

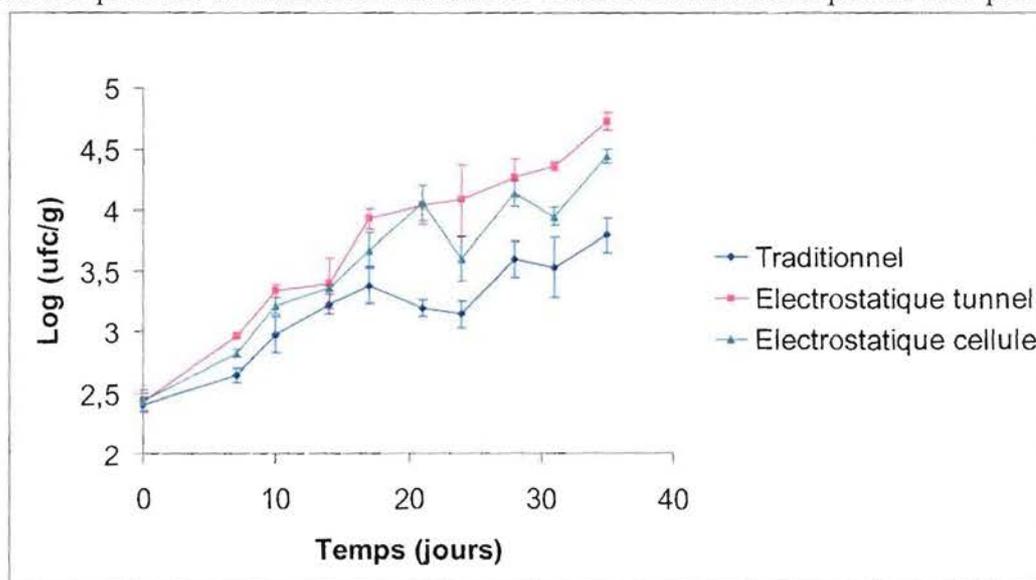


Figure 105 : croissances des *Listeria* sur du saumon fumé par les trois procédés.

On peut tout d'abord remarquer que le taux d'inoculation est proche d'un procédé à l'autre ce qui confirme la qualité de notre inoculation. Les courbes semblent adopter une tendance relativement linéaire, ce qui laisse penser que l'intégralité de l'expérience a été menée durant la phase exponentielle. Ceci confirme la capacité des *Listeria* à se développer à des basses températures (ici, à 4°C). On observe qu'il y a peu de différences entre les saumons fumés par les deux procédés électrostatiques. En fin d'expérience, le taux de *Listeria* sur ces deux produits a dépassé 5.10^4 germes/g. On peut cependant noter que la croissance semble légèrement plus importante dans le cas du fumage en tunnel. Cette différence, bien que faible (0,3 log), est statistiquement significative au seuil de 95%. Par contre, la croissance de cette flore a été plus faible sur le saumon fumé traditionnellement. En effet, en fin d'expérience, le taux de *Listeria* n'a atteint que 5.10^3 germes/g. Par ailleurs, les intervalles de confiance sont assez restreints, ce qui permet d'appuyer les tendances observées. On peut donc dire que le

fumage traditionnel semble, sur cette expérience, avoir une action inhibitrice sur *Listeria* plus forte que les deux procédés de fumage électrostatique.

- Influence des 3 procédés de fumage sur la croissance de la flore totale :

La figure 106 présente la croissance de la flore totale dans du saumon fumé par les trois procédés. Comme nous l'avons vu précédemment, la contamination initiale est très importante et la phase exponentielle est très courte.

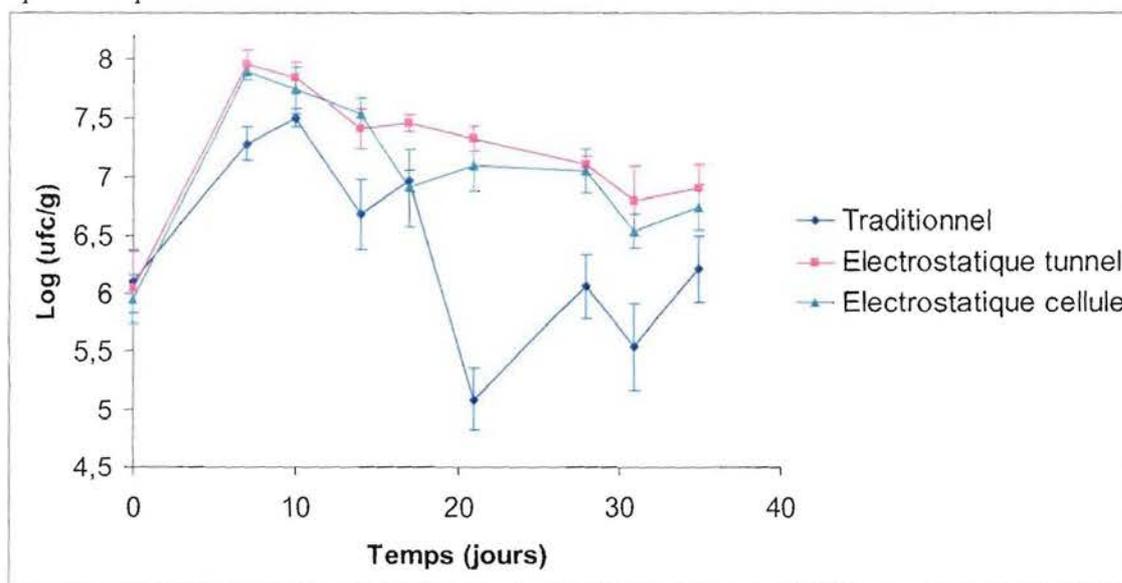


Figure 106 : croissance de la flore totale sur du saumon fumé par les trois procédés.

On observe peu de différences entre les deux fumages électrostatiques, ce qui indique que l'environnement (cellule ou tunnel) influence peu les résultats. Par contre, on observe que le saumon fumé traditionnellement est, sur cette expérience, globalement moins contaminé. De plus, cette différence est significative au seuil de 95%. L'influence des trois procédés de fumage remarquée sur la croissance des *Listeria* semble donc également s'appliquer à la flore totale.

Les résultats de cette expérience laissent donc présumer que le fumage traditionnel est le procédé le plus inhibiteur, et notamment sur *Listeria monocytogenes*. En fin d'expérience, on observe en effet que ces bactéries ont subi un développement 10 fois moins important sur du saumon fumé en tunnel électrostatique que sur du saumon fumé traditionnellement. Ceci est très important car le saumon fumé destiné à la vente a en général une DLC de 4 semaines. Or, notre expérience révèle des différences bien avant d'avoir atteint cette durée.

La différence entre les deux fumages électrostatiques est statistiquement légèrement significative : on observe une croissance de la flore totale et des *Listeria* légèrement supérieure dans le cas du tunnel. A l'inverse, les flores minoritaires, et en particulier *Brochothrix thermosphacta*, semblent se développer plus rapidement dans le cas du fumage électrostatique en cellule. Si l'on met en relation ces résultats microbiologiques avec les taux de phénols mesurés, on se rend compte que le développement plus important dans le cas du tunnel électrostatique pourrait s'expliquer par une teneur en composés phénoliques plus faible (0,66mg/100g), et par conséquent une inhibition moindre. Par contre, la teneur en phénols totaux est plus élevée sur le saumon fumé en cellule par cycles électrostatiques (1,43mg/100g) que sur le saumon fumé traditionnellement (0,98mg/100g). Or, l'inhibition est pourtant plus

importante dans ce dernier cas. De plus, les taux de NaCl sont relativement constants d'un fumage à l'autre, et ne peuvent donc pas expliquer les différences observées

Ces résultats laissent penser que l'inhibition n'est pas uniquement due à la teneur globale en phénols mais plutôt à la nature des phénols déposés par chaque type de fumage. Ceci pourrait être mis en évidence par la réalisation de chromatographies en phase gazeuse sur des composés phénoliques extraits de saumon fumé par les trois procédés. Par ailleurs, l'inhibition induite par le fumage est probablement aussi due au dépôt d'autres composés que les phénols, bien que ceci n'est pas encore été nettement mis en évidence aujourd'hui.

Inoculation avant fumage (expérience 2)

Composition chimique des échantillons analysés

Après avoir effectué les analyses des taux de phénols et de NaCl sur les galettes non inoculées, nous avons obtenu les résultats moyens suivants :

	Fumage traditionnel	Fumage électrostatique en tunnel	Fumage électrostatique en cellule
Teneur en phénols (mg pour 100g)	2,06 ± 0,15	1,42 ± 0,23	1,85 ± 0,05
Teneur en NaCl (g pour 100g)	3,6 ± 0,20		

Analyses chimiques pour l'expérience 2 : chaque valeur correspond à la moyenne de 3 essais ± IC (intervalle de confiance)

On observe que le taux de phénols déposés est légèrement supérieur aux autres dans le cas du fumage traditionnel (2,06mg/100g contre 1,42mg/100g et 1,85mg/100g, valeurs correspondant respectivement aux fumages électrostatiques en tunnel et en cellule) ; néanmoins, la teneur en composés phénoliques est plus élevée dans les trois cas que lors de l'expérience 1. De même, la teneur en NaCl est ici assez importante par rapport aux taux habituellement observés sur du saumon fumé.

Influence de l'étape de fumage sur la flore totale et Listeria

- Influence des trois procédés de fumage sur *Listeria* :

La figure 107 représente l'évolution des *Listeria* au cours de l'expérience 2. On peut noter que la répétabilité du taux d'inoculation est très bonne ($7,6.10^3 \pm 3.10^3$ ufc/g).

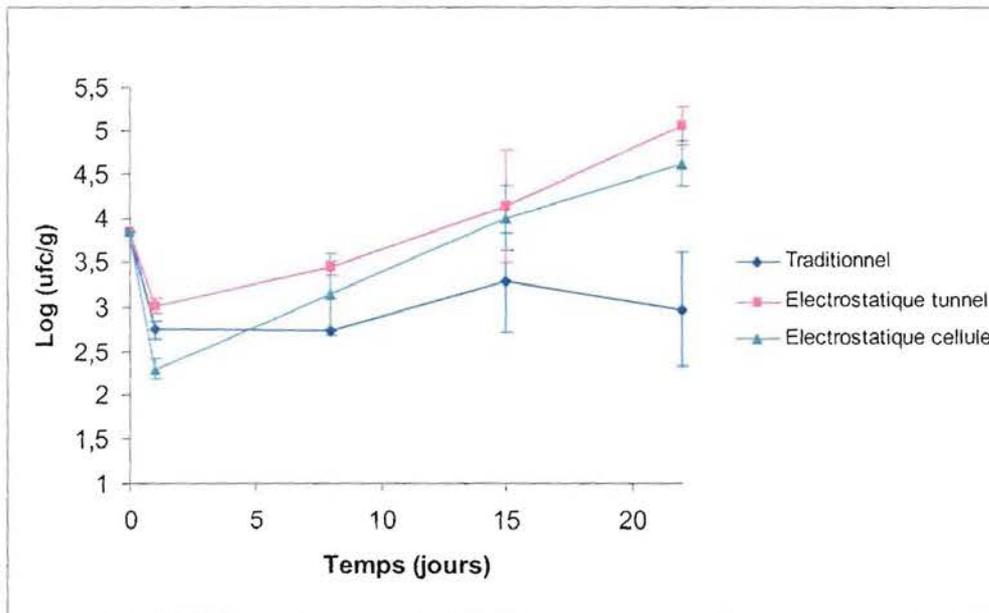


Figure 107 : évolution des Listeria

L'étape de fumage qui intervient 24 heures après l'ensemencement provoque dans les trois cas de fumage une diminution brutale de la population bactérienne. On peut cependant remarquer que cette réduction n'est pas équivalente pour les trois procédés : en effet, elle semble être plus efficace pour le fumage électrostatique en cellule (réduction de 1,5 log) et pour le fumage traditionnel (réduction de 1 log) que pour le fumage électrostatique en tunnel (réduction de 0,8 log). Après le fumage, on observe également des comportements différents dans les croissances des flores : en effet, alors que la croissance des *Listeria* reprend immédiatement sur les saumons fumés par voie électrostatique, on observe un temps de latence sur le saumon fumé traditionnellement.

- Influence des trois procédés de fumage sur la flore totale :

La figure 108 ci-dessous présente l'évolution de la flore totale au cours de l'expérience 2.

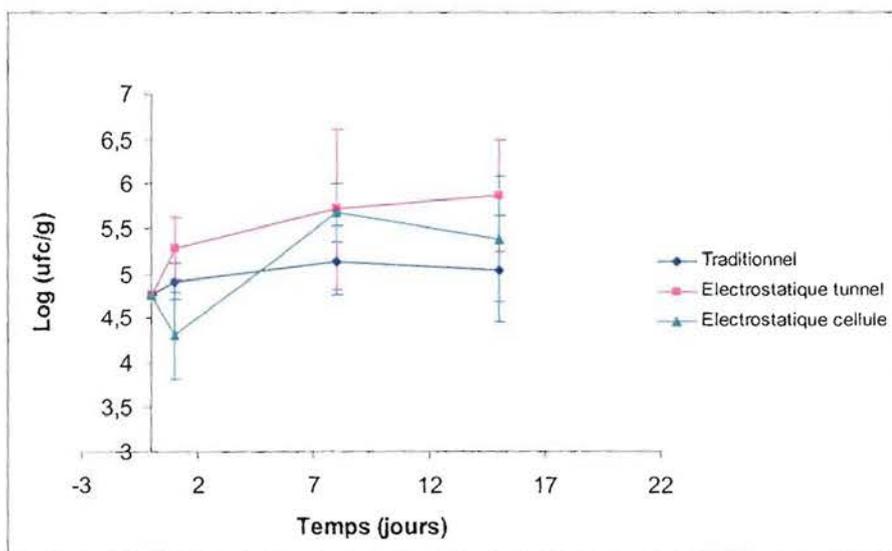


Figure 108 : évolution de la flore totale

On peut constater que l'effet bactéricide de l'étape de fumage est beaucoup moins marqué que dans le cas des *Listeria*. En effet, seul le fumage électrostatique en cellule permet une réduction de la charge bactérienne (réduction de 0,7 log). En ce qui concerne les fumages traditionnel et électrostatique en tunnel, la légère augmentation de la flore totale peut s'expliquer par une contamination lors du fumage. En effet, les structures de fumage ne sont pas stériles et les produits sont balayés par un fort courant de fumée et d'air. Par contre, on observe après le fumage le même phénomène que sur les *Listeria* : la croissance de la flore totale reprend immédiatement sur les saumons ayant subi un fumage électrostatique, alors qu'on peut noter une durée de latence après un fumage traditionnel.

L'effet bactéricide immédiat du fumage sur les *Listeria*, et dans une moindre mesure sur la flore totale, est plus important dans le cas du fumage électrostatique en cellule. En revanche, cet effet ne perdure pas dans le temps puisque la croissance bactérienne reprend plus rapidement que dans le cas du fumage traditionnel. Le fumage électrostatique en tunnel et dans les conditions de l'expérience est le procédé qui a le moins d'effet (immédiat et dans le temps) sur les deux flores analysées. Ceci s'explique peut-être en partie par la concentration plus faible en phénols totaux. Cependant, la nature de ces composés semble jouer puisque l'effet immédiat du fumage sur la réduction des *Listeria* est plus important dans le cas du fumage électrostatique en cellule, pour lequel les filets sont pourtant moins fumés, selon l'indicateur des phénols totaux par dosage colorimétrique, qu'après le fumage traditionnel.

Interprétation globale et réponse à la problématique

Les expériences que nous avons réalisées nous ont permis d'extraire un certain nombre d'informations notables quant à l'influence des procédés de fumage électrostatique, pour les conditions testées, en comparaison avec un fumage traditionnel. Nous avons en effet mis en évidence plusieurs phénomènes :

- 1) L'effet bactéricide de l'étape de fumage : cet effet était déjà bien connu mais nous avons montré que son efficacité diffère selon les procédés de fumage. En effet, la précipitation électrostatique des particules de fumée semble efficace pour ce critère lorsqu'elle s'accompagne d'un dépôt suffisant des composés phénoliques de la fumée.
- 2) Les variations de sensibilité à cet effet bactéricide selon les bactéries : alors que *Listeria* semble subir une réduction conséquente dans les trois cas, seul le procédé électrostatique en cellule permet une légère baisse de la charge microbienne totale. Cette observation nécessiterait cependant une confirmation, car l'augmentation de la flore totale au cours du fumage peut être due à un dépôt de germes au cours du procédé.
- 3) L'effet bactériostatique induit par l'étape de fumage : cet effet est particulièrement marqué dans le cas du fumage traditionnel, mais beaucoup moins après un fumage électrostatique. Cette constatation s'applique à toutes les flores étudiées et est corroborée par les résultats des deux expériences. En effet, l'inhibition de la croissance pour une même charge bactérienne initiale est beaucoup plus marquée sur du saumon fumé traditionnellement que sur du saumon fumé par un procédé électrostatique.

Des études complémentaires, notamment sur la nature des composés déposés, seraient indispensables pour confirmer ces résultats et poursuivre la démarche de validation microbiologique du procédé. Rappelons également que les expérimentations réalisées n'incluaient pas les dernières modifications proposées, comme par exemple une hauteur inter-électrodes de 8 cm et une quantité de fumée plus importante.

Aucun dénombrement de flores sur les essais effectués au sein de la société Chancerelle n'a été réalisé en raison de nombreuses difficultés techniques.

15 / Résultats des essais sur le plan sensoriel

1. Essai préliminaire à l'expérience 1 section 14

Objectif : Comparaison des caractéristiques sensorielles de saumon fumé en enceinte climatisée et de saumon fumé par voie électrostatique en enceinte climatisée ou en tunnel. La comparaison de ces deux derniers échantillons permet d'étudier la possibilité de réduire le temps de fumage en cellule classique grâce à l'action simultanée de la voie électrostatique.

8 saumons calibre ¾ ont été filetés et salés 3h à 6°C, puis entreposés 18 heures à +4°C

Les filets ont été fumés selon les 3 procédés suivants :

- Saumon « Traditionnel cellule » **TC** (générateur à autocombustion):
 - o fumage : 2h15 à 24°C HR= 65% (humidification sciure 20%)

- Electrostatique cellule **EC** (générateur à autocombustion) :
 - o fumage : 45 min à 24°C HR= 65% (humidification sciure 20%)
 - o sous électrodes à 2 ou 3cm ; tension = 15kV, courant = 0.15mA pendant 45min 10s toutes les 3 minutes (soit 2.5 min d'application électrostatique)

- Electrostatique tunnel **ET** (génération de fumée plaques thermostatées):
 - o séchage 20min dans tunnel à 45kV, 0.96mA
 - o fumage : 25kV, 0.08mA – 15 minutes -

Remarques : Les produits ont été tranchés avant conditionnement sous vide et analyses après 2 semaines d'entreposage à +4°C.

Principales conclusions (Tableau 109 et figure 110): Les produits, quel que soit leur traitement, sont légèrement aminés ce qui est sans doute dû aux conditions d'hygiène mal maîtrisées lors du tranchage avant conditionnement. De plus, une intensité de fumage faible, comme le laissent penser les moyennes des critères sensoriels liés à la fumée mais qui n'est pas vraiment confirmé par les résultats de chimie, n'a pas favorisé la conservation.

Les deux échantillons fumés en enceinte climatisée, avec ou sans le procédé électrostatique ont des caractéristiques communes au niveau de l'odeur et de la flaveur. On peut observer en particulier qu'un fumage de 45 minutes en cellule climatisée avec traitement électrostatique conduit à une intensité et des caractéristiques d'odeur et de flaveur fumées similaires à celles obtenues par un fumage traditionnel de 2h15. Bien que cela ne soit pas significativement différent, le produit EC a un aspect plus rose et plus gras et une texture plus fondante et plus grasse que le produit TC.

Le produit ET présente une flaveur significativement moins fumée que le produit traditionnel TC, une texture plus fondante et plus grasse. L'odeur aminée est davantage perçue sur le produit ET. Les deux produits pour lesquels le procédé électrostatique a été utilisé ont en commun un aspect et une texture plus grasses que le produit fumé de façon traditionnelle.

Descripteurs	Traditionnel cellule TC	Electrostatique cellule EC	Electrostatique tunnel ET	probabilité effet produit
od. intensité globale	5.38	4.88	5.04	0.59
od. fumée feu bois	2.48	2.75	2.76	0.88
od. fumée froide	1.49	1.30	0.41	0.16
od. beurre/caramel	1.33	0.84	1.11	0.62
od.végétale (herbe)	0.71	0.63	0.69	0.95
od. saumon/poisson	2.45	3.18	2.76	0.33
od. hareng	0.52	0.46	0.86	0.68
od. aminée/urine	1.18	1.45	2.39	0.09
od. caoutch/plastique	0.74	0.40	0.69	0.50
couleur orange	4.85 ab	4.54 b	5.42 a	0.036 *
couleur rose	3.77 ab	4.39 a	3.56 b	0.039 *
homogénéité de la couleur	5.08	5.26	5.09	0.84
aspect gras	3.49 b	4.46 ab	5.06 a	0.028 *
fermeté	4.89	5.12	4.34	0.12
texture croquante	3.91	4.01	3.61	0.73
texture fondante	3.66	4.23	4.64	0.056
texture grasse	4.56 b	5.04 ab	5.91 a	0.049*
texture pâteuse	2.74	2.02	2.07	0.29
fl. intensité globale	5.44 a	5.73 a	4.36 b	0.016*
fl. fumée feu bois	3.26	3.83	2.16	0.07
fl. fumée froide	1.16	0.82	0.49	0.07
fl. beurre/caramel	0.77	1.22	1.67	t 0.055
fl. végétale (herbe)	0.36	0.81	0.84	0.16
fl.saumon/poisson	3.65	3.94	3.16	t 0.09
fl. hareng	0.78	0.71	0.84	0.88
s. salée	4.04	4.00	3.24	0.28
s. acide/piquante	1.09	1.34	1.25	0.86
fl. aminée/urine	1.33	1.27	1.61	0.73
fl. caoutch/plastique	0.66	0.79	0.71	0.86

Tableau 109. Evaluation sensorielle (14 juges) – 2 semaines d'entreposage -
Moyennes des notes du groupe et résultat de l'analyse de variance à 2 facteurs (juges, produits (seule la probabilité pour l'effet produit est indiquée))

t: tendance, *: significatif à 5 %, **: significatif à 1 %, ***: significatif à 0,1 %
Les moyennes suivies par une même lettre ne sont pas significativement différents

L'analyse en composante principale (ACP) permet de visualiser les caractéristiques essentielles d'un tableau de façon graphique sur des plans de projection. Les différents plans obtenus permettent de maximiser les distances entre les produits. Les deux premiers plans de l'ACP traduisent, dans notre cas, la totalité des variations. Le produit ET est associé aux caractéristiques aminées et à une texture grasse. A l'opposé sur l'axe 1, les produits EC et TC ont une intensité fumée plus forte, la différenciation entre ces deux produits est surtout réalisée par la projection sur le second axe sur des critères de type odeur beurre/caramel, homogénéité de la couleur ... (cf. figure 110).

préliminaire. On observe pour le produit ET une caractéristique d'odeur particulière, une odeur végétale. En ce qui concerne la texture, les différences sont moins nettes. La saveur salée différencie significativement les trois produits et semble corrélée positivement à l'intensité du fumage.

Descripteurs	Traditionnel cellule TC	Electrostatique cellule EC	Electrostatique tunnel ET	probabilité effet produit
od. intensité globale	6.10 a	5.38 ab	4.97 b	0.037 *
od. fumée feu bois	5.07 a	4.41 a	2.91 b	0.0005 ***
od. fumée froide	2.13	1.82	1.18	0.17
od. beurre/caramel	1.68 a	0.80 b	0.72 b	0.040*
od.végétale (herbe)	0.46	0.84	1.32	t 0.08
od. saumon/poisson	3.60	3.09	2.73	t 0.06
od. hareng	0.78	1.04	0.65	0.37
od. aminée/urine	0.53 b	0.52 b	1.55 a	0.003 **
od. caoutch/plastique	0.86	0.70	0.81	0.85
couleur orange	5.62	5.29	5.70	0.50
couleur rose	2.67	2.55	2.13	0.28
homogénéité de la couleur	6.35 a	5.47 b	5.83 ab	0.006 **
aspect gras	4.08	4.80	4.55	0.19
fermeté	6.28 a	5.14 b	5.73 ab	0.004 **
texture croquante	5.58	4.57	5.48	t 0.0505
texture fondante	3.54	4.41	4.04	0.13
texture grasse	4.70 b	5.72 a	5.35 ab	0.045 *
texture pâteuse	1.36	1.98	1.74	0.11
fl. intensité globale	6.47 a	5.72 b	4.82 c	<0.0001 ***
fl. fumée feu bois	5.29 a	4.12 b	3.38 b	<0.0001 ***
fl. fumée froide	2.24 a	1.90 a	0.80 b	0.003 **
fl. beurre/caramel	0.81	0.87	0.62	0.54
fl. végétale (herbe)	0.34	0.37	0.72	0.18
fl. saumon/poisson	4.30	4.24	3.93	0.44
fl. hareng	0.96 a	1.08 a	0.43 b	0.015 *
s. salée	5.27 a	4.43 b	3.68 c	0.0001 ***
s. acide/piquante	0.57	0.71	0.70	0.75
fl. aminée/urine	0.47 b	0.58 b	0.98 a	0.028 *
fl. caoutch/plastique	0.82	0.55	0.58	0.45

Tableau 111. Evaluation sensorielle (26 juges) – 2 semaines d'entreposage à +4°C
Moyennes des notes du groupe et résultat de l'analyse de variance à 2 facteurs
(juge – produit = seule la probabilité pour l'effet produit est indiquée)

t: tendance, *: significatif à 5 %, **: significatif à 1 %, ***: significatif à 0,1 %

Les moyennes suivies par une même lettre ne sont pas significativement différents

3. Essais à l'échelle industrielle (Société Chancerelle)

Objectif : Valider à l'échelle industrielle les modifications apportées au procédé de fumage électrostatique

3.1. Premier essai

Conditions opératoires :

Trois lots de saumon (5 filets par lot) de calibre $\frac{3}{4}$ ont été filetés et salés à l'IFREMER pendant 3 h, séchés à 24°C en enceinte pendant 1h30, puis fumés le jour suivant selon trois traitements différents :

- Fumage traditionnel réalisé à l'IFREMER en cellule climatisée avec génération de fumée par autocombustion; temps de fumage = 2h30 et température de fumage = 24°C
- Fumage électrostatique chez Chancerelle avec générateur de fumée à friction avec une tension appliquée de **30kV pendant 10 minutes** (courant observé 0.2 mA)
- Fumage électrostatique chez Chancerelle avec générateur de fumée à friction avec une tension appliquée de **45kV pendant 10 minutes** (courant observé 0.8 mA)

Pour le test sensoriel, un lot supplémentaire de saumon fumé acheté dans le commerce (Saumon de Norvège – Marché U) a été évalué de façon à élargir la gamme de comparaison. Les 4 produits ont été testés 2 semaines après leur fabrication.

Principales conclusions :

Les résultats sensoriels (Tableau 113 et Figure 114) permettent de mettre en évidence de nombreuses différences significatives entre les produits testés. Trois groupes se distinguent :

- Le produit traditionnel (fumage en enceinte climatisée) a une intensité moyenne en odeur et flaveur fumée, il présente une odeur de beurre/caramel qui le différencie des autres produits. Il apparaît comme le moins gras en aspect et en texture (au même niveau que la produit du commerce pour la texture grasse) ; c'est également le produit le plus ferme en texture.
- Le produit du commerce présente le même niveau d'intensité en odeur et flaveur fumée que le produit issu d'un fumage traditionnel par contre il est caractérisé par une odeur de hareng qui n'est pas perçue dans les autres produits. De plus il a une couleur rose et un aspect très homogène ; c'est le plus salé des produits testés, le moins croquant et le plus pâteux en texture.
- Les deux produits fumés par voie électrostatique ont des notes fumées très intenses (dosage de phénols de l'ordre de 3 et 4mg/100g), que ce soit en odeur ou en flaveur et la principale caractéristique mise en évidence est le côté « fumée froide ». Les tranches présentent une couleur globalement moins homogène que les deux autres lots ainsi qu'un aspect gras marqué en particulier pour le traitement à 45kV. Leur fermeté est équivalente à celle du produit du commerce mais la texture est jugée plus grasse que dans le cas des autres produits, en particulier lorsque la tension de 45kV est appliquée.

Dans les conditions industrielles de fumage mises en œuvre lors de cet essai, on observe que par rapport aux résultats obtenus jusqu'à présent qui montraient des produits « électrostatiques » généralement moins fumés que ceux obtenus par le procédé traditionnel, il est possible de moduler et d'augmenter l'intensité des caractéristiques

fumées mais cela conduit au développement d'une spécificité plutôt « fumée froide ». Les observations faites à l'échelle pilote concernant les caractéristiques de texture se confirment au niveau industriel, ces produits restent plus gras en aspect et en texture.

Descripteurs	Traditionnel	Electrostat. 30kV 10min	Electrostat. 45kV 10min	Norvégien commerce	Probabilité effet produit
od. intensité globale	4.87 b	6.51 a	7.16 a	4.72 b	<0.0001 ***
od. fumée feu bois	3.72	4.30	4.04	3.11	0.38
od. fumée froide	0.39 c	4.00 b	5.69 a	0.63 c	<0.0001 ***
od. beurre/caramel	2.19 a	1.03 b	0.78 b	0.62 b	0.005 **
od. végétale (herbe)	0.50	0.62	0.32	0.90	0.29
od. saumon/poisson	3.37 a	2.16 b	1.77 b	3.13 a	0.0003 ***
od. hareng	0.19 b	0.48 b	0.59 b	1.49 a	0.007 **
od. aminée/urine	0.51	0.30	0.13	0.85	t 0.058
od. caoutch/plastique	0.54	0.57	1.27	0.47	0.10
couleur orange	5.36	5.78	5.81	5.22	0.58
couleur rose	1.59 b	2.34 b	2.00 b	3.83 a	0.0002 ***
homogénéité de la couleur	5.56 b	4.68 bc	4.03 c	6.82 a	<0.0001 ***
aspect gras	4.16 c	5.20 b	6.54 a	5.50 b	<0.0001 ***
fermeté	4.40 a	3.21 b	3.41 b	3.05 b	0.009 **
texture croquante	2.93	2.65	2.52	1.80	t 0.09
texture fondante	4.29	5.60	5.18	5.38	t 0.08
texture grasse	4.41 b	5.08 ab	5.70 a	4.48 b	0.006 **
texture pâteuse	1.80 b	1.60 b	2.39 ab	3.08 a	0.018 *
Fl. intensité globale	5.55 b	6.28 b	7.58 a	5.75 b	<0.0001 ***
fl. fumée feu bois	4.27	4.56	4.51	3.64	0.34
fl. fumée froide	1.16 c	3.22 b	5.82 a	0.76 c	<0.0001 ***
fl. beurre/caramel	1.29	0.95	1.25	0.86	0.36
fl. végétale (herbe)	0.50	0.42	0.32	0.47	0.82
fl. saumon/poisson	3.80 ab	3.04 bc	2.77 c	4.55 a	0.0005 ***
fl. hareng	0.67	0.71	0.70	1.57	0.10
s. salée	4.66 b	4.22 b	4.42 b	5.47 a	0.014 *
s. acide/piquante	0.82	0.70	0.64	0.97	0.69
fl. aminée/urine	0.40 b	0.33 b	0.26 b	0.87 a	0.005 **
fl. caoutch/plastique	0.59	0.88	1.37	0.65	0.17

Tableau 113. Evaluation sensorielle (21 juges) – 2 semaines d'entreposage à +4°C
Moyennes des notes du groupe et résultat de l'analyse de variance à 2 facteurs
(probabilité pour l'effet produit)

t: tendance, *: significatif à 5 %, **: significatif à 1 %, ***: significatif à 0,1 %

Les moyennes suivies par une même lettre ne sont pas significativement différents

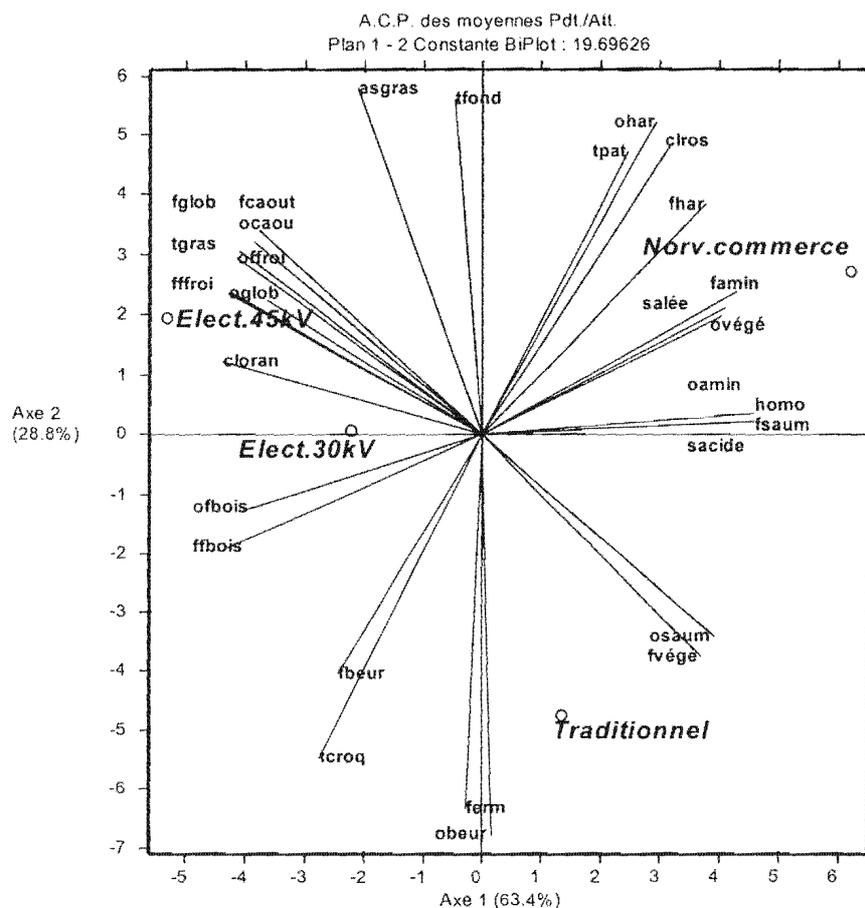


Figure 114 – ACP caractéristiques sensorielles Essai 1 Chancerelle

	Traditionnel cellule	Electrostatique Tunnel industriel 30kV	Electrostatique Tunnel industriel 45kV	Produit du commerce
Teneur en phénols	0.84 (0.29)	3.0 (0.28)	4.9 (1.4)	0.52

Moyenne et écart type sur 5 filets

3.2. Deuxième essai

Un second essai a été réalisé en conditions industrielles après avoir modifié certains paramètres en particulier en sélectionnant la tension la plus faible et faisant varier le temps de passage en tunnel

Conditions opératoires :

Trois lots de saumon (5 filets par lot) de calibre ¼ ont été filetés et salés 3h à +6°C à l'IFREMER et fumés le jour suivant selon trois traitements différents :

- Fumage traditionnel réalisé à l'IFREMER en cellule climatisée avec génération de fumée par autocombustion; temps de fumage = 2h30 et température de fumage = 24°C
- Fumage électrostatique chez Chancerelle avec générateur de fumée à friction avec une tension appliquée de **30kV pendant 3minutes et 20 secondes**
- Fumage électrostatique chez Chancerelle avec générateur de fumée à friction avec une tension appliquée de **30kV pendant 6minutes et 40 secondes**

Pour cet essai, un échantillon supplémentaire provenant du commerce a également été proposé lors des évaluations sensorielles (même origine que lors du premier test).

Principales conclusions :

Les résultats sensoriels (Tableau 115 et Figure 116) mettent en évidence le même type de différences entre les produits que celles observées lors du premier essai industriel mais avec des intensités plus faibles.

- Le produit fumé de façon traditionnelle a des caractéristiques relativement proches de celles obtenues au cours du premier essai,
- Le produit du commerce a comme la première fois une saveur de « hareng » assez nette et une couleur rose plus marquée que dans les autres échantillons. C'est encore le plus salé des produits testés, un des moins croquants et parmi les plus pâteux en texture.
- Les produits fumés de façon électrostatique conservent une odeur et une saveur fumée froide assez fortes par rapport aux autres échantillons, mais la réduction du temps de passage en tunnel et de la tension a permis d'en diminuer l'intensité. En ce qui concerne les critères d'aspect et de texture, on observe que l'aspect gras et la texture grasse qui étaient systématiquement notés plus forts pour les produits électrostatiques, ne permettent plus de les distinguer des autres produits.

Descripteurs Sensoriels	Traditionnel	Electrostat. 30kV 3mn20	Electrostat. 30kV 6mn40	Norvégien commerce	Probabilité effet produit
od. intensité globale	4.68 b	5.58 ab	6.35 a	4.94 b	0.002 **
od. fumée feu bois	3.73 ab	4.74 a	4.26 a	2.61 b	0.004 **
od. fumée froide	0.96 c	2.76 b	4.33 a	0.85 c	<0.0001 ***
od. beurre/caramel	0.91	0.87	0.95	1.16	0.90
od.végétale (herbe)	0.76	0.35	0.69	1.04	t 0.09
od. saumon/poisson	4.15 a	2.53 b	2.68 b	3.76 a	0.0006 ***
od. Hareng	0.64	0.96	0.54	1.25	0.22
od. aminée/urine	0.40	0.47	0.32	0.84	t 0.09
od. caoutch/plastique	0.61	1.23	1.20	1.03	0.31
couleur orange	5.89 b	5.64 b	6.92 a	3.66 c	<0.0001 ***
couleur rose	2.29 b	2.14 b	2.05 b	4.58 a	<0.0001 ***
homogénéité de la couleur	6.17 ab	5.56 bc	6.53 a	5.28 c	0.005 **
aspect gras	5.66 ab	5.19 bc	4.82 c	5.91 a	0.005 **
Fermeté	4.36	4.49	4.14	3.34	t 0.07
texture croquante	3.37 a	3.52 a	2.89 ab	2.13 b	0.012*
texture fondante	5.18	4.94	5.10	5.04	0.92
texture grasse	5.84 a	5.59 a	4.78 b	4.66 b	0.002 **
texture pâteuse	1.87 b	1.92 b	2.44 ab	3.17 a	0.03 *
fl. intensité globale	5.41 b	5.79 ab	5.99 ab	6.47 a	0.04 *
fl. fumée feu bois	4.16	4.42	3.71	3.93	0.41
fl. fumée froide	1.33 b	2.04 b	3.87 a	0.92 b	0.0001 ***
fl. beurre/caramel	1.24	0.98	1.02	0.68	0.23
fl. végétale (herbe)	0.68	0.72	0.55	0.59	0.84
fl.saumon/poisson	4.67 a	3.91 bc	3.57 c	4.44 ab	0.012 *
fl. Hareng	0.65 b	0.56 b	0.75 b	2.15 a	0.003 **
s. salée	3.56 b	3.53 b	3.68 b	5.83 a	<0.0001 ***
s. acide/piquante	0.49 b	0.37 b	0.42 b	1.01 a	0.011 *
fl. aminée/urine	0.26 b	0.24 b	0.37 b	0.65 a	0.011 *
fl. caoutch/plastique	0.39 b	0.80 ab	1.14 a	0.47 b	0.03 *

Les moyennes suivies par une même lettre ne sont pas significativement différentes

Tableau 115. Evaluation sensorielle (19 juges) – 2 semaines d'entreposage
Moyennes des notes du groupe et résultat de l'analyse de variance à 2 facteurs
(probabilité pour l'effet produit)

t: tendance, *: significatif à 5 %, **: significatif à 1 %, ***: significatif à 0,1 %

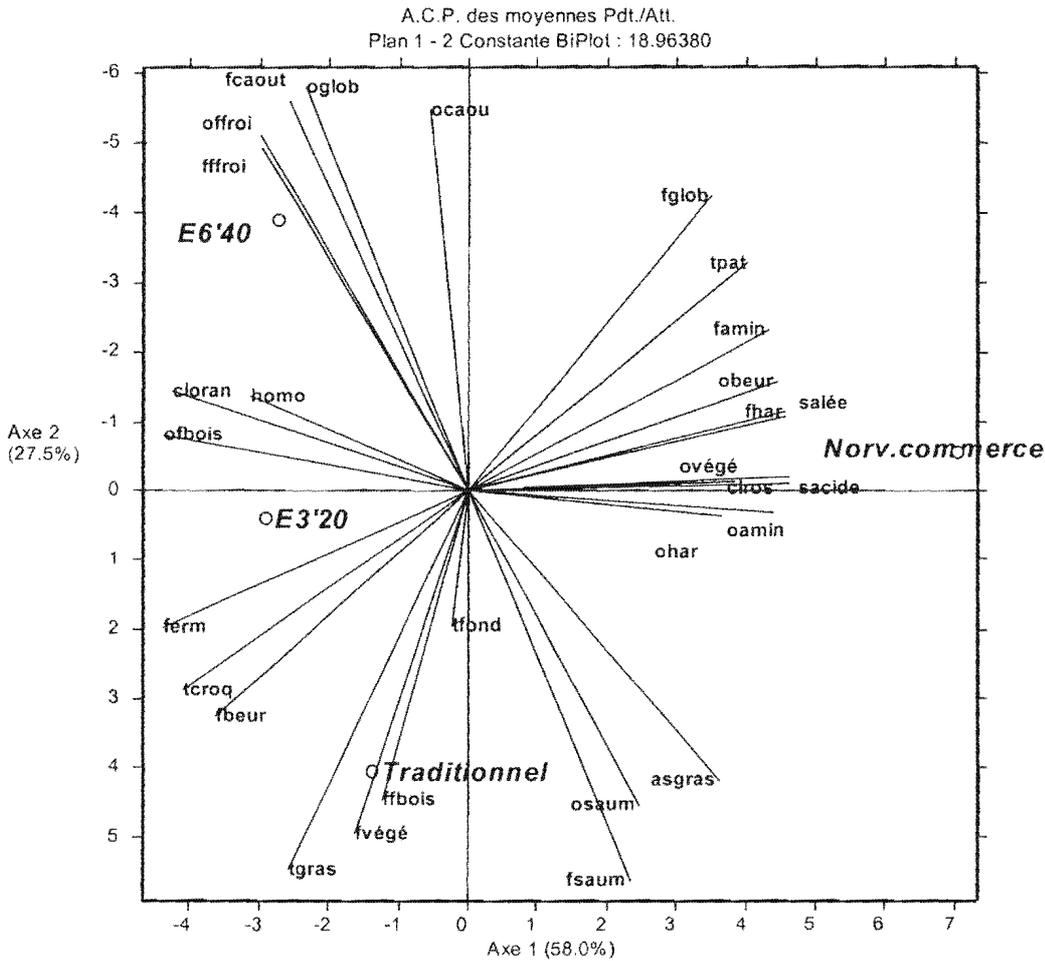


Figure 116 – ACP deuxième essai

	Traditionnel cellule	Electrostatique Tunnel industriel 30kV-3min20-	Electrostatique Tunnel industriel 30kV-6min40-	Produit du commerce
Teneur en phénols	0.81 (0.16)	2.04 (0.20)	2.30 (0.1)	0.27

Moyenne et écart type sur 5 filets

Conclusion générale :

Les modifications apportées au procédé de fumage électrostatique montrent que dans les conditions industrielles testées, il est possible d'obtenir des produits assez fortement fumés qui associent des notes « feu de bois » et « fumée froide », avec un rapport « feu de bois »/ « fumée froide » plus en accord avec le produit fumé traditionnellement, ce qui était difficile à réaliser jusqu'à présent à l'échelle du pilote IFREMER. De plus, l'aspect gras et la texture grasse ne sont plus systématique. On peut penser qu'il est encore possible de moduler, en fonction du type de produit souhaité, les caractéristiques finales du produit.

4/ Essais complémentaires sur le tunnel IFREMER

Afin de tester, l'influence de la quantité de fumée entrante et des vitesses de circulation de la fumée sur les caractéristiques des produits obtenus, une expérience supplémentaire a été réalisée. Elle comporte la réalisation de 6 fumages différents de saumons dans nos locaux accompagnés, pour permettre de situer nos produits par rapport aux produits du commerce, d'un échantillon commercial. Tous les poissons de calibre ¾ ont été salés 3 h après la mise en filets, puis stockés en chambre froide à +4°C pendant 16 h. Ils ont ensuite subi un séchage en enceinte climatisée à 24°C et 65 % d'hygrométrie pendant 1 h. Les 18 filets ont ensuite divisés en 6 groupes de 3 afin de subir les traitements suivants :

- Produit A : mises en série des générateurs de fumée à friction et plaque thermostatée (495 °C), temps de passage sous électrode de 7 min., vitesse entrante de l'ordre de 0.35 m/s.
- Produit B : mises en série des générateurs de fumée à friction et plaque thermostatée (495 °C), temps de passage sous électrode de 7 min., vitesse entrante de l'ordre de 0.75 m/s.
- Produit C : générateur de fumée à friction, temps de passage sous électrode de 7 min., vitesse entrante de l'ordre de 0.35 m/s.
- Produit D : générateur de fumée à plaque thermostatée (450 °C), temps de passage sous électrode de 7 min., vitesse entrante de l'ordre de 0.35 m/s.
- Produit E : générateur de fumée à plaque thermostatée (495 °C), temps de passage sous électrode de 7 min., vitesse entrante de l'ordre de 0.35 m/s.
- Produit F : Fumage en enceinte climatisée pendant 2h15 à 24 °C et 65 %d'hygrométrie avec un générateur à autocombustion.

Tous les valeurs des phénols totaux ne sont pas encore disponible à ce jour mais nous pouvons dire que tous les produits obtenus se situent dans la gamme allant de 0.75 à 1.35 µg/100 g. L'analyse sensorielle des produits a été effectuée 15 jours après la fabrication et stockage sous-vide à +4 °C.

Le tableau 117 suivant récapitule les résultats de cette analyse. La figure 118 propose la représentation des produits et des critères sur les deux premières composantes principales.

	Tradit.	D	E	C	A	B	Comm.	Proba.
od. intensité globale	6.65 a	3.78 c	4.34 bc	4.65 b	5.83 a	4.97 b	5.93 a	<0.0001 ***
od. fumée feu bois	5.07 a	2.89 c	2.98 c	3.15 c	3.61 bc	3.01 c	4.44 ab	<0.0001 ***
od. fumée froide	0.98 bc	0.59 bc	0.34 c	1.10 bc	2.97 a	1.46 b	1.02 bc	<0.0001 ***
od. beurre/caramel	1.12	0.51	0.39	0.65	0.57	0.58	0.58	0.16
od.végétale (herbe)	0.51	0.67	0.76	0.76	1.13	0.97	0.35	0.14
od. saumon/poisson	3.77 a	2.58 c	3.38 ab	2.54 c	2.62 bc	2.65 bc	3.09 abc	0.002 **
od. hareng	0.73 a	0.24 b	0.36 b	0.17 b	0.33 b	0.24 b	0.37 b	0.024 *
od. aminée/urine	0.37	0.26	0.28	0.33	0.15	0.27	0.62	0.29
od. caoutch/plast.	0.46 bc	0.25 c	0.42 bc	0.61 abc	1.08 a	0.58 abc	0.84 ab	0.034*
couleur orange	6.36 ab	6.24 ab	5.16 c	6.37 ab	5.57 bc	6.48 a	4.91 c	<0.0001 ***
couleur rose	2.80 bc	2.40 bc	2.60 bc	2.43 bc	2.91 b	2.00 c	4.25 a	<0.0001 ***
homogénéité couleur	5.95 ab	6.58 a	6.20 a	5.96 ab	6.07 a	6.55 a	5.27 b	0.007 **
aspect gras	4.39 b	4.42 b	5.00 ab	5.36 a	5.19 a	5.43 a	5.61 a	<0.0001 ***
fermeté	4.53	4.91	3.55	4.51	4.42	4.23	4.20	t 0.06
texture croquante	3.63 bc	4.95 a	2.99 c	4.04 ab	4.10 ab	3.69 bc	2.87 c	0.0001 ***
texture fondante	4.01	4.54	4.97	4.53	4.73	4.60	3.86	0.13
texture grasse	4.32 c	5.53 a	4.50 bc	5.40 a	5.46 a	5.11 ab	4.53 bc	0.0003 ***
texture pâteuse	1.31 b	1.03 b	1.55 ab	1.31 b	0.96 b	1.22 b	2.06 a	0.013 *
fl. intensité globale	6.43 ab	4.80 d	4.75 d	5.33 cd	5.78 bc	5.03 d	6.76 a	<0.0001 ***
fl. fumée feu bois	5.28 a	2.98 c	3.28 bc	3.54 bc	3.56 bc	3.91 b	4.67 a	<0.0001 ***

fl. fumée froide	0.72 c	0.66 c	0.59 c	0.87 bc	2.86 a	1.61 b	1.44 bc	<0.0001 ***
fl. beurre/caramel	0.76	0.97	0.68	1.04	0.67	0.83	0.61	0.50
fl. végétale (herbe)	0.33 b	0.90 ab	0.77 ab	0.72 ab	1.18 a	1.36 a	0.33 b	0.003 **
fl.saumon/poisson	4.38 a	3.77 abc	4.15 ab	3.60 bc	3.14 c	3.38 c	3.55 bc	0.004 **
fl. hareng	0.43 b	0.23 b	0.21 b	0.19 b	0.28 b	0.25 b	0.79 a	0.0006 ***
s. salée	4.58 b	2.70 d	3.72 c	3.46 c	3.61 c	3.46 c	5.88 a	<0.0001 ***
s. acide/piquante	0.22 b	0.21 b	0.23 b	0.22 b	0.16 b	0.21 b	0.68 a	0.02 *
fl. aminée/urine	0.23	0.29	0.43	0.42	0.21	0.26	0.43	0.54
fl. caoutch/plast.	0.55 ab	0.30 b	0.39 b	0.40 b	0.95 a	0.53 ab	0.73 ab	0.019 *

Tableau 117 - Moyennes des notes du groupe (24 juges) et résultat de l'analyse de variance à 2 facteurs (juges, produits)

(seule la probabilité pour l'effet produit est indiquée)

t: tendance, *: significatif à 5 %, **: significatif à 1 %, ***: significatif à 0,1 %

Les moyennes suivies par une même lettre ne sont pas significativement différents

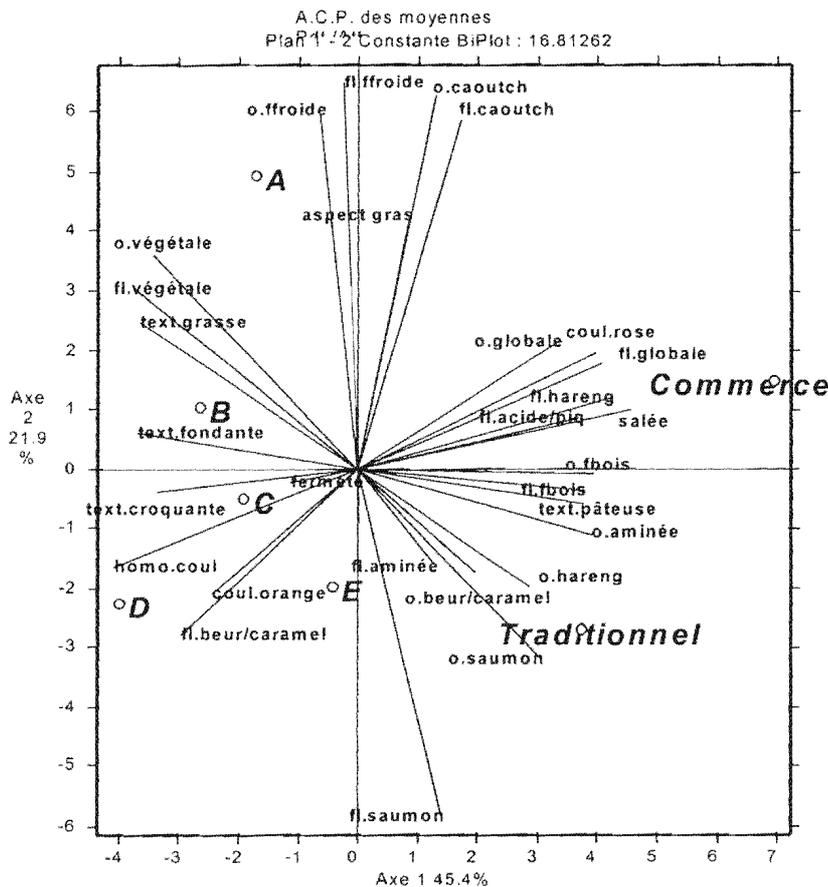


Figure 118 - ACP

L'apport de particules de fumée supplémentaire entraîne un produit au goût plus fumée mais qui conserve le même rapport fumée feu de bois / fumée froide. Ce rapport semble toutefois très légèrement amplifié avec l'augmentation de la vitesse entrante, par contre l'intensité globale de fumage diminue légèrement.

Le produit qui apparaît comme le plus proche du produit F, qui nous sert généralement de référence, est le produit E obtenu avec un générateur à plaque thermostatée avec une température de plaque de 495 °C. Des études complémentaires devront encore menées pour mieux comprendre le rôle des paramètres de génération de la fumée (température, nature du bois, oxygénation...).

16/ Résultats physiques et chimiques

Les valeurs des différents dosages en phénols totaux (méthode colorimétrique), des teneurs en sel et des teneurs en eau pour les essais réalisés entre Avril et Juillet 2005 sont présentés pour des raisons de commodité dans les sections 14 et 15.

Nous pouvons résumer les résultats de la façon suivante :

- la teneur en phénols des produits fumés électrostatiquement avec le tunnel de l'IFREMER et pour la géométrie et les conditions opératoires testées s'avère légèrement moins forte qu'avec le fumoir traditionnel mais nettement plus importante que les essais avec les anciennes géométries.
- Les essais effectués sur le fumoir de la société Chancerelle donnent un produit ayant des teneurs en phénols élevées (2 mg/100g) Le dernier produit obtenu à 30kV pour 3mn20 de temps de passage est un produit présentant de caractéristiques sensorielles sensiblement plus proche des produits fumés traditionnellement que les produits précédents.

Pour le pilote IFREMER, les résultats des dosages de phénols par CPG montrent que, comme lors des deux premières années mais avec une intensité plus forte pour des temps de traitement identiques, le syringol est déposé proportionnellement de façon plus importante (il constitue le deuxième composé phénolique en fumage électrostatique et le 3ou 4 ième en fumage traditionnel).

Dans le cas du fumage Chancerelle, le syringol ne représente que 2% (contre autour de 20 % pour le pilote IFREMER) des composés phénoliques alors que le 4-éthylguaïacol qui ne représente habituellement qu'autour de 10 % des composés phénoliques est le premier composé phénolique (autour de 30 %). Les conditions de génération de fumée sont donc probablement très différentes par rapport aux conditions IFREMER.

La couleur, mesurée par le spectrocolorimètre à main Minolta, fournit le même type d'indication, à savoir une coloration légèrement moins marquée avec le fumoir électrostatique IFREMER dans les conditions testées qu'en enceinte climatisée traditionnelle, et une coloration plus marquée avec les essais Chancerelle.

Nous avons, comme précédemment, utilisé des feuilles de papier blanc pour servir d'indicateur de fumage, évaluer la stabilité du traitement au cours du temps, et pour pouvoir détecter l'apparition de goutte (sous la forme de tâche) sur le papier.

La stabilité du fumage semble bien meilleure (écart entre couleur moyenne et couleur extrême) sous la réserve d'une arrivée de fumée stable. Les variations de signal de notre photodiode en entrée fumée sont fortement corrélées avec les variations de couleur des feuilles de papier. Il est donc évident que pour des fumages très courts, la maîtrise de la génération de fumée est particulièrement importante.

Lors des essais sur le pilote IFREMER la durée maximale d'expérimentation, pour une même journée, a été de 8 heures consécutives. Aucune goutte n'est apparue sur une semaine entière de production au niveau des électrodes (soit environ 6+8+6+5+5 = 30 heures de production en fumée). Par contre, il a été nécessaire lors de la deuxième journée de production de modifier l'arrivée de la fumée pour y incorporer un système collecteur des gouttes apparaissant le long de l'arête finale de la jaquette entrante.

La société Chancerelle a doublé la durée de ses temps de production avant de procéder à un nettoyage complet de l'installation. Aucune goutte n'est apparue pendant cette phase de production.

La société Chancerelle nous a fourni des boîtes de sardines fumées à l'aide de leur fumoir modifié lors de fabrications étalées dans le temps (soit au sein d'une même production d'une journée, en début, milieu et fin de production, soit lors de journées de production différente). L'analyse des phénols totaux nous indique qu'un gain sur la quantité de phénols déposé accompagné d'une diminution de la variabilité au cours du temps et de l'espace est observée par rapport à l'ancienne installation. Toutefois ces variations restent encore un peu trop importante et nous confirme dans notre choix futur de porter une attention plus grande sur la maîtrise de la génération de fumée.

Nous avons également effectué quelques essais sur feuilles pour observer l'influence de la polarisation du plafond.

Deux types de montage ont été réalisés en association avec une électrode à petits fils avec une hauteur inter-électrodes de 14 cm. Un premier en fixant une plaque au plafond et en joignant par un fil conducteur le plafond et l'électrode de décharge. Puis un second en collant des bandes adhésives conductrices de 5 mm de large espacées tous les 3 cm, et relier au même potentiel que les électrodes de décharge.

Les résultats sur feuille de papier n'ont pas montré de gain significatif sur l'intensité ou l'homogénéité des dépôts. La consommation en courant est légèrement plus forte dans ce cas. La polarisation par fils conducteurs collés au plafond n'a pas non plus apporté le moindre bénéfice. Dans ces deux cas, la fragilité de l'électrode et les risques de décharge électrique avec le personnel sont augmentés ainsi que la consommation électrique. Nous n'avons pas jugé utile de poursuivre des investigations dans ce sens.

Sur le plan énergétique, il n'y a pas de changement réel des performances. Ceci veut donc dire que le coût énergétique par kg de produit fini reste nettement plus faible dans le cas électrostatique tout en diminuant considérablement la quantité de particules émises dans l'atmosphère.

17/ Bilan des actions de la dernière année

- Action 5 – Optimisation

Dans cette phase, nous avons cherché à exploiter l'ensemble des informations obtenues lors des actions précédentes pour mener à bien une phase d'optimisation du procédé. L'optimisation numérique initialement prévue en début de programme n'a pu être menée à son terme en raison de problèmes de convergence. L'outil numérique reste à perfectionner pour permettre de répondre totalement à cet objectif, mais nous pouvons affirmer que le modèle proposé semble cohérent et conforme pour décrire les tendances observées lors de nos différentes investigations. La validation sur une 3^{ième} campagne de visualisation est programmée pour 2006.

- Action 6 – Adaptation d'un prototype - démonstrateur

Toutes les propositions effectuées dans la section 9 n'ont pas pu être mises en œuvre dans les délais courts de réalisation de ce programme, mais des campagnes complémentaires qui débiteront courant Octobre 2005 devraient combler ces lacunes. Toutefois, nous pouvons affirmer que la principale modification sur les électrodes que nous souhaitions tester a pu être évaluée lors de la phase 2 du programme.

- Action 7 – campagne expérimentale sur prototype (démonstrateur et industriel)

Cette campagne expérimentale a été menée d'Avril à Juillet 2005 sur du saumon. L'analyse des caractéristiques physiques, microbiologiques et sensorielles des produits a été menée à partir du pilote IFREMER. Ces essais se sont avérés encourageants sur le plan sensoriel et méritent d'être approfondis sur le plan microbiologique. Les résultats des mesures physiques et des tests sensoriels des essais menés avec le fumoir de la société Chancerelle sont très intéressants et relancent fortement l'intérêt du procédé.

Des caractéristiques spécifiques à ce mode de fumage semblent apparaître sur certains points. Tous ces résultats devront être confirmés ou complétés.

- Action 8 – Finition de l'outil logiciel

Comme indiqué dans le bilan de l'action 5, l'outil logiciel n'est pas encore totalement abouti. Un travail sur les algorithmes de résolution doit encore être réalisé pour permettre le calcul, dans un temps raisonnable, de géométries réelles.

- Action 9 – Valorisation des résultats

La liste des publications des deux premières années est disponible à la section 10.

Une publication dans un journal scientifique a été réalisée sur cette troisième année.

* M. Cardinal, J. Cornet, T. Sérot and R. Baron Effects of the smoking process on odour characteristics of smoked herring (*Clupea harengus*) and relationships with phenolic compound content *Food Chemistry*, 96(1), 137- 146, 2006.

Deux autres papiers sont en cours de finition avant soumission. Deux communications seront également proposées pour la conférence IUFOST XIII (World congress of Food science and Technology) qui se déroulera à Nantes en septembre 2006, et pour le congrès Electrostatic Applications qui se déroulera à Berkeley en Juin 2006.

La stratégie de valorisation industrielle sera déterminée en fin de programme. Un brevet d'amélioration de procédé pourrait être déposé (sous réserve de la confidentialité de ce rapport). Les discussions initiées avec la société EST reprendront. Cette société ayant fait le choix d'attendre la fin de ce programme avant de définir une éventuelle collaboration.

18/ Conclusions

Des avancées considérables dans le domaine de la précipitation électrostatique de particules de fumée, tant sur le plan de la modélisation des phénomènes, de leurs simulations, que des axes d'optimisation du procédé ont été obtenues lors de cette étude.

Des investigations complémentaires sur les interactions procédé-produit semblent nécessaire pour mieux appréhender dans sa globalité la problématique. De même, les «composés indésirables» pour la santé (type HAP, dioxine...) déposés lors des fumages mériteraient d'être intégrés à cette approche. Ce dernier point pourrait en effet inciter dans le futur à utiliser de la fumée liquide atomisée car il est alors possible de mieux maîtriser les composés générés. Des essais pour tester un couplage entre fumage électrostatique et génération de fumée par atomisation seront prochainement effectués. Si le couplage des deux technologies semblait impossible avec les anciennes géométries, il apparaît comme faisable au regard des phénomènes observés avec l'utilisation des petits fils.

Le potentiel industriel et technique du fumage par précipitation électrostatique des particules de fumée a été clairement augmenté lors de cette étude. Le temps de fonctionnement avant nettoyage, la productivité ont été significativement améliorés. Simultanément, les

caractéristiques sensorielles des produits ainsi fumés se sont significativement rapprochés des produits fumés traditionnellement, et considéré ici comme des produits de référence, tout en préservant la faible consommation énergétique du procédé et la diminution drastique du nombre de particules rejetées dans l'atmosphère.

19/ Avis de la société Chancerelle



Conserverie Chancerelle SAS
1, boulevard Richepin
29177 DOUARNENEZ Cedex

Douarnenez le 5/10/2005

Monsieur,

Suite au modification de la grille du fumoir électrostatique, remplacement de la grille treillis soudé par un fil inox, je vous confirme l'amélioration très sensible des paramètres suivants :

- 1) Diminution importante de l'encrassement de la « grille » et donc augmentation du temps d'utilisation (temps d'utilisation presque doublé passant de 2 à 3,5 heures)
- 2) Augmentation de la capacité du fumoir, pour nos productions, temps de passage diminué par 2,5 pour un résultat plus fumé et plus régulier.
- 3) Très nette amélioration de la régularité du fumage.

Je reste à votre disposition pour tout renseignement complémentaire.

Bien cordialement

GUY BRAUN

Directeur de production