

## RECUPERATION DE CALORIES SUR LES EFFLUENTS DE BLANCHISSERIE

**Cédric BOULAY**

ingénieur en chef responsable maintenance

1 place de l'hôpital  
67000 Strasbourg

Le process de blanchisserie est particulièrement énergivore et générateur d'effluents.

La blanchisserie hospitalière des Hôpitaux Universitaires de Strasbourg (HUS) traite quotidiennement 16 tonnes de linge et rejette 150 m<sup>3</sup> d'effluents. Profitant d'une obligation réglementaire de mise en conformité de ces effluents imposée par la collectivité, les HUS ont fait le choix d'investir dans la récupération des calories.

Retour sur une démarche « Développement Durable » appliquée à un process industriel au coeur de l'hôpital.

### 1. Qualité des effluents de blanchisserie

Le process de lavage nécessite la mise en œuvre de produits lessiviels détergents et biocides. Si la technologie et les produits utilisés évoluent en intégrant progressivement les exigences de « Développement Durable », il n'en reste pas moins que pour être efficaces ces produits gardent leur caractère « agressif ».

Globalement, les caractéristiques principales des eaux de lavage issues de blanchisseries sont :

- Volume important (entre 6 et 10 litres par Kg de linge lavé)
- PH très basique (supérieur à 10)

- Température élevée (entre 35°C et 45 °C selon la technologie)
- Matières en suspensions importantes

Les HUS ont mené au début de l'année 2012 en amont des travaux une campagne de mesures sur leurs effluents de blanchisserie. Les résultats (Figure I) confirment les températures et PH élevés bien au-dessus des seuils réglementaires.

### 2. Contexte réglementaire

Une des priorités de lutte contre la pollution de l'eau concerne les eaux usées non domestiques. Les blanchisseries entrent clairement dans cette catégorie.

Les collectivités, propriétaires du réseau de collecte et de traitement de ces effluents, sont donc particulièrement regardantes sur la qualité de ces eaux. Elles définissent des critères de recevabilité dans leur règlement d'assainissement et rappellent aux « industriels » l'obligation d'avoir une autorisation pour tout déversement d'eaux usées non domestiques dans le réseau public de collecte (*Code de la Santé publique article L.1331-10*).

Le code de la santé publique précise que « cette autorisation peut être subordonnée à la participation de l'auteur du déversement aux dépenses de premier établissement, d'entretien et d'exploitation entraînées par la réception des eaux ». En clair, le principe du pollueur payeur peut être appliqué et généralement les collectivités ne s'en privent pas et le rendent obligatoire. Ceci pour les nouvelles demandes de raccordement au réseau d'assainissement mais aussi pour les établissements en activité possédant un arrêté d'autorisation d'exploitation pourtant en bonne et due forme.

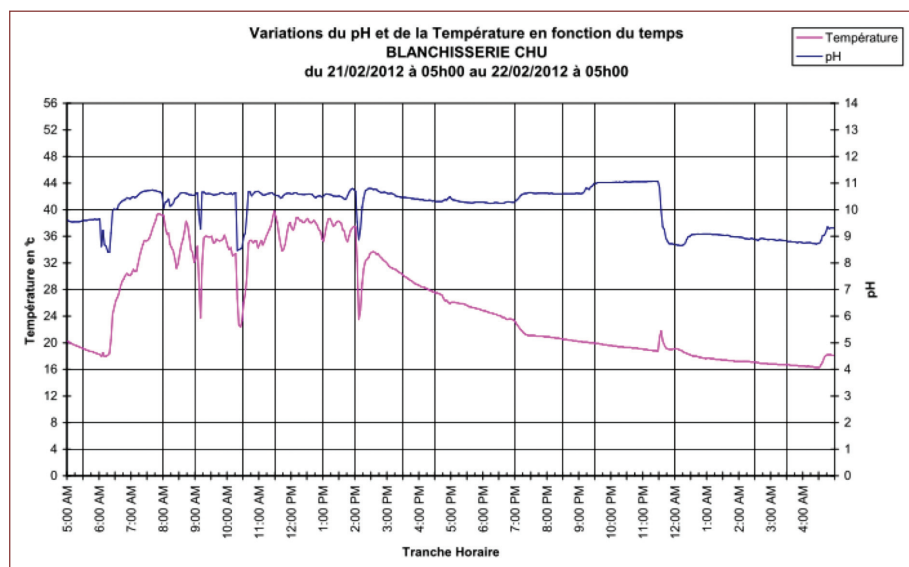
Dans le cas des HUS, la Communauté Urbaine de Strasbourg n'a accepté de délivrer l'autorisation (obligatoire) de déversement des effluents de la blanchisserie hospitalière qu'à condition qu'une convention spéciale de déversement soit signée.

La signature de cette convention et l'autorisation de déversement qui en découle fixent notamment :

- les charges polluantes maximale souscrites (tout en restant conforme aux limites de recevabilité définies au règlement d'assainissement)
- la taxe redevable par l'établissement (mode de calcul, pénalités, ..)
- les modalités d'autocontrôles (fréquence, paramètres, ...) et de contrôle par la collectivité

Dans le Tableau II on retrouve notamment les limites de température et de PH imposées par le règlement d'assainissement de la communauté urbaine de Strasbourg.

#### 1. Courbes du PH et de la Température sur 24H des rejets avant travaux



Paramètres	Minimum	maximum	Unités
Valeurs adaptées aux particularités du système d'assainissement de la CUS			
Hydrocarbures locaux		5,00	mg/l
Sulfures		10,00	mg/l
SEH		50	mg/l
Cl		750	mg/l
MEST		600	mg/l
Valeurs issues de l'arrêté du 02.02.1998 :			
DCO		2000	mg/l
Azote global		150	mg/l de N
Phosphore total		50	mg/l de P
pH	5,5	8,5	
Température		30	°C
DCO DBO <sub>5</sub>		2,5	

## 2. Valeurs limites extraites du règlement d'assainissement de la communauté urbaine de Strasbourg

Les blanchisseries ne peuvent pas répondre à ces limites qualitatives sans traitement de leurs effluents.

## 3. Problématiques spécifiques à la blanchisserie des HUS

Pour assurer la mise en conformité de leurs effluents de blanchisserie, les HUS ont dû traiter les 3 problématiques suivantes :

- Neutralisation (abaissement du PH)
- Récupération des matières en suspension
- Refroidissement

La mise en œuvre d'une neutralisation et de la récupération des matières en suspension sont techniquement peu complexes. Nous n'aborderons pas ces traitements dans le détail.

Le refroidissement des effluents est quant à lui un peu plus complexe. Dans le cas présent, la blanchisserie est alimentée en eau par un forage privé. La tentation était grande d'utiliser cette eau froide à moindre frais pour abaisser la température des effluents par dilution. D'un point de vue développement durable c'est peu glorieux et très logiquement le règlement d'assainissement de la communauté urbaine de Strasbourg l'interdit.

Globalement, la difficulté n'est pas de récupérer des calories mais de savoir quoi en faire. Les besoins potentiels en interne sont assez limités :

- Eau chaude sanitaire (peu de consommation et très ponctuel dans la journée)
- Chauffage (uniquement en hiver...)
- Préchauffage des eaux de lavage

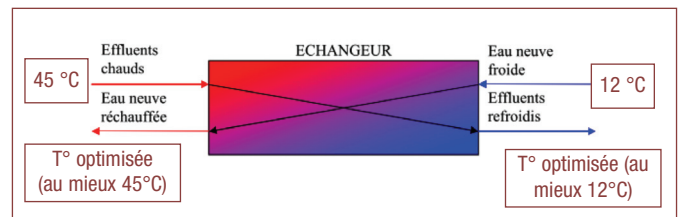
Le sujet est encore plus complexe en période estivale puisque les HUS récupèrent déjà des calories sur le refroidissement de leur climatisation et que les possibilités d'utilisation de l'énergie récupérée en été sont réduites.

Il en résulte 2 modes de fonctionnement distincts à traiter : le mode hiver et le mode été.

### 3.1. Fonctionnement en mode hiver

En hiver, la récupération de calories sur les effluents doit permettre de préchauffer l'eau de lavage. L'eau provenant directement du puits est à une température d'environ 12°C et l'effluent à environ 45°C.

En étant un peu simpliste (efficacité de l'échangeur de 100%) et à condition d'avoir un débit d'effluents identique au débit d'eau de lavage à préchauffer on peut espérer préchauffer l'eau de lavage à environ 45°C et abaisser la température de l'effluent à 12°C. Le schéma III illustre ce principe.



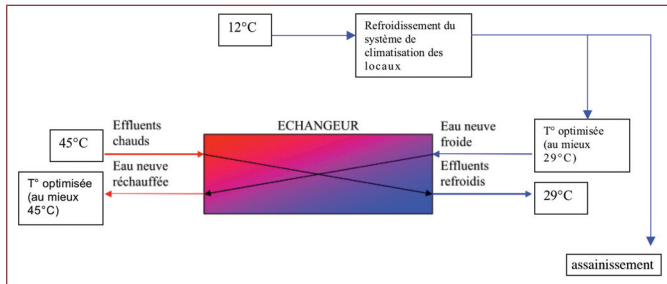
3. Schéma de principe en mode Hiver

Très clairement la mise en conformité de l'effluent est facile à atteindre (rappel : il faut être inférieur à 30°C) et on vise en mode hiver à optimiser la récupération de ces calories (et donc le gain énergétique pour l'établissement également).

### 3.2. Fonctionnement en mode été

En été, la récupération de calories sur les effluents doit permettre de mettre en conformité les rejets. L'eau provenant du puits à une température d'environ 12°C passe par le système de refroidissement de la climatisation. Une partie de l'eau ainsi préchauffée est réutilisée mais une partie est inutilisée et est déchargée au réseau d'assainissement à environ 29°C. Pour limiter cette eau perdue, un maximum est réutilisé pour le process de lavage, tout en régulant sur la température de sortie des effluents pour ne pas dépasser la limite réglementaire.

Très clairement dans le mode été, on vise l'économie d'eau et pas l'optimisation de la récupération de calories. Le schéma IV illustre le principe.



4. Schéma de principe en mode été

## 4. Retour d'expérience

### 4.1. Processus d'appel d'offres

La récupération de calories et la neutralisation chimique sur des effluents de blanchisserie est un sujet très commun et de nombreux prestataires sont à même de répondre à ce type de marché de travaux. Dans les faits on peut distinguer trois catégories de « prestataires » :

- Les spécialistes de la blanchisserie (notamment les lessiviers) qui ont développés plusieurs solutions. Ils sont souvent bien en amont des projets et jouent de leur parfaite connaissance du métier et des interlocuteurs. En revanche les produits sont très standardisés et pas toujours adaptables aux spécificités du site.
- Les grands groupes orientés « eau et énergie » qui ont développé des structures et produits axés « développement durable ». Ils maîtrisent mal les problématiques propres à la blanchisserie et tentent d'adapter au coup par coup leurs produits.
- Les installateurs dans le domaine « thermique / sanitaire », véritables assembleurs d'équipements. Dans ce cas, l'aspect ingénierie est très important. L'installateur doit s'appuyer sur un bureau d'études chevronné.

Dans les faits, les HUS ont souhaité laisser la porte ouverte à toutes les solutions techniques en proposant un cahier des charges fonctionnel précisant :

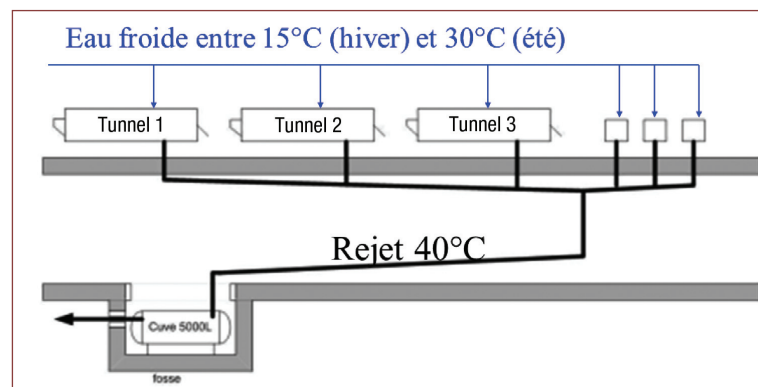
- les résultats attendus ( $T^\circ$ , PH, matières en suspension)
- les contraintes du site (débit max, volume journalier,  $T^\circ$  des rejets,

$T^\circ$  de l'eau « froide » selon la saison, fluctuations de PH, configuration des locaux et des réseaux existants,...)

En outre un bilan d'exploitation sur 6 mois devait permettre de valider l'atteinte des performances attendues (et le paiement final de la prestation).

### 4.2. Aspects techniques

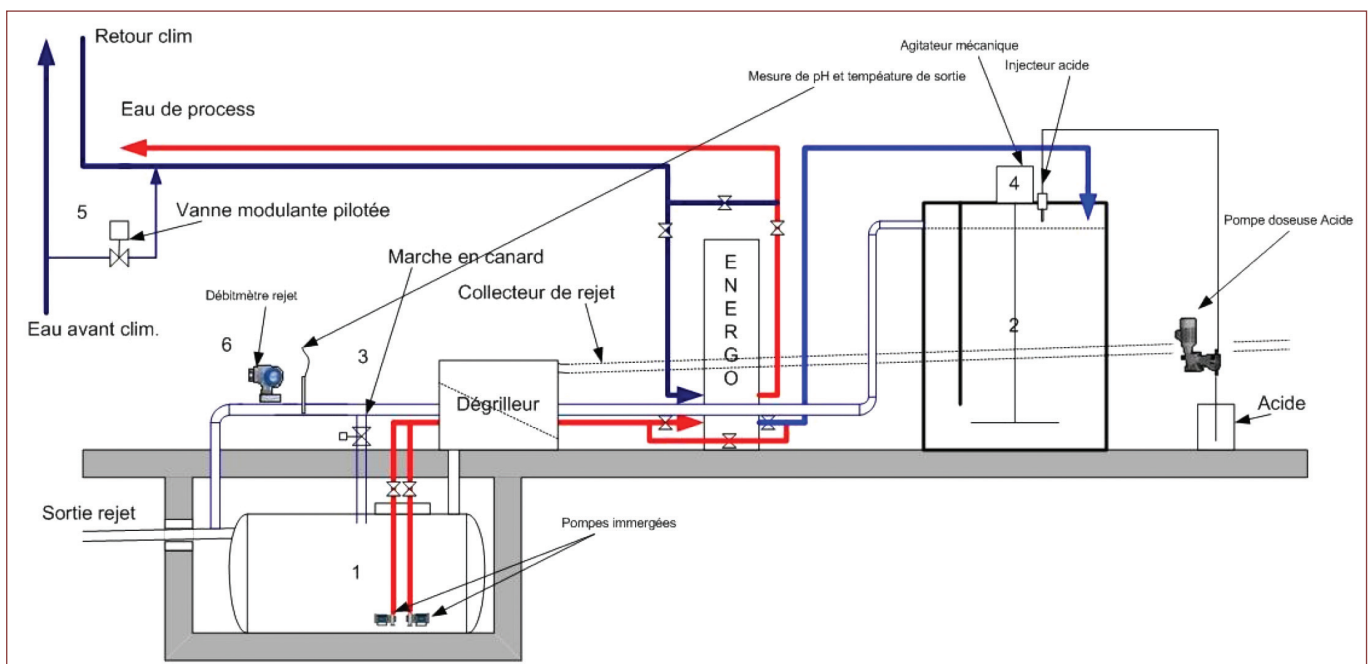
L'installation à l'origine est relativement simple (schéma V).



5. Schéma de principe avant travaux

La récupération de calories passe forcément par l'utilisation d'un échangeur. Ce dernier peut être gravitaire (écoulement libre) ou en charge.

La solution retenue dans le cadre de l'appel d'offres est un échangeur en charge de type tubulaire. Dans ce type d'échangeur il faut veiller aux risques d'encrassement. La présence d'un dégrilleur en amont s'impose assez logiquement.



6. Schéma de principe après travaux

Un des aspects technique important est de réussir à équilibrer le débit de traitement des effluents avec la demande en eau neuve. En effet, pour un tunnel de lavage les séquences de rejet d'effluents et de tirage d'eau neuve ne sont pas forcément synchrones.

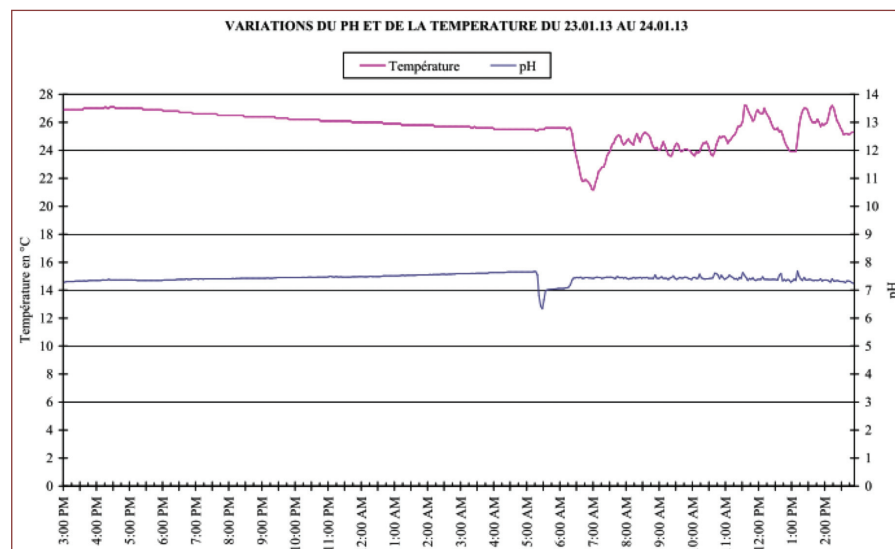
Inévitablement cela nécessite à minima le stockage :

- soit d'eau neuve préchauffée par la récupération de calories en attente de consommation
- soit d'effluents en attente d'un appel d'eau neuve à préchauffer.

Dans le cas de la blanchisserie des HUS, la cuve de décantation existante sert de cuve de stockage d'effluents chauds avant utilisation. Des pompes immergées sur variateur asservies au débit d'eau neuve permettent d'équilibrer les débits dans l'échangeur et ainsi d'optimiser la récupération. En aval la cuve de neutralisation permet de réguler le PH des effluents rejetés à l'assainissement public par injection d'acide sulfurique asservie au PH (la neutralisation ne doit surtout pas être asservie au volume d'effluents produits !). Cette cuve a été dimensionnée pour assurer un temps de passage de l'effluent dans la cuve de l'ordre de 15 minutes afin de garantir un bon mélange et une stabilisation du PH.

Après quelques mois d'exploitation les performances attendues sont globalement atteintes. La partie délicate reste la maîtrise de l'instrumentation et notamment de la mesure de débit et de volume rejeté. La régulation de la température d'entrée de l'échangeur en mode été afin d'optimiser la température de rejet juste en-dessous de la réglementation opposable est également sensible et doit faire l'objet d'ajustements.

Les courbes (graphique VII) de PH et de température obtenues suite à une nouvelle campagne de mesures sur 24H démontrent l'atteinte des objectifs réglementaires. Elles sont à comparer avec celles du graphique I avant travaux.



7. Courbes du PH et de la Température sur 24H des rejets après travaux

### 4.3. Aspects économiques

L'investissement global est d'environ 160 KEuro y compris la partie instrumentation nécessaire aux contrôles exigés par la communauté urbaine de Strasbourg. Cette partie instrumentation seule associée à une chambre de mesure externe initialement demandées par la communauté urbaine de Strasbourg avait été estimée à 60 KEuro.

On peut donc estimer la part technique liée à la « mise en conformité » des effluents à environ 100 KEuro.

La récupération de calories a été estimée par les soumissionnaires à l'appel d'offres à environ 100 à 130 KEuro annuels. Les calculs initiaux des HUS (toujours plus pessimistes du point de vue du client...) étaient de l'ordre de 60 KEuro. Sur les 6 premiers d'exploitations (octobre à mars) on constate une économie de l'ordre de 40 KEuro. Compte-tenu des spécificités de l'installation, la période hivernale est évidemment beaucoup plus favorable à la récupération de calories. Au final l'estimation semble être correcte et conduit à un retour sur investissement de l'ordre de 3 ans maximum (y compris le financement de la partie instrumentation nécessaire aux contrôles exigés par la communauté urbaine de Strasbourg).

En conclusion, la réglementation a poussé les HUS à s'engager dans une démarche d'économie d'énergie qui a permis à la fois de financer la mise en conformité de leurs effluents et également d'absorber les coûts engendrés par les exigences de contrôles et de surveillance mentionnées dans la convention de déversement signée avec la Communauté Urbaine de Strasbourg.

### Bibliographie

*Code de la Santé publique Nouvelle Partie Législative Chapitre 1er: Salubrité des immeubles et des agglomérations articles L1331-1 à L1331-15*

*Règlement d'assainissement collectif de la communauté Urbaine de Strasbourg édition 2011*

# SUIVI ET TRAITEMENT DE LA QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR : APPROCHE VAICTEUR'AIR

**Pierre-Jean VIALLE**

Responsable du Laboratoire Qualité des ambiances intérieures /  
Centre Recherches et Innovations CIAT

700 avenue Jean Falconnier BP14  
01350 CULOZ

## 1. Introduction

Le confort thermique et la qualité de l'air intérieur, associés à l'efficacité énergétique, sont les raisons d'être des équipements de traitement d'air développés par la société CIAT. Afin de répondre au mieux à ces enjeux, CIAT a initié le projet Vaicteur Air2, soutenu par l'Ademe et OSEO, qui fédère plusieurs partenaires industriels et des organismes de recherche. Une des idées directrices de ce projet est d'adapter le traitement des ambiances au besoin. Pour l'élimination des pollutions intérieures, cela suppose de disposer d'indications suffisamment fiables et interprétables par les systèmes de contrôle des équipements CVC. Cet article présente les éléments développés pour le suivi et le traitement local de la pollution particulaire.

## 2. Suivi de la pollution particulaire

Afin de pouvoir réaliser un suivi de la pollution particulaire des environnements intérieurs, il apparaît nécessaire de disposer d'une offre commerciale de capteurs ou d'indicateurs bas coûts adaptés aux besoins du marché du bâtiment. La notion d'indicateur correspond plus à un dispositif capable de détecter si un palier critique de pollution particulaire a été franchi ou pas. Quatre ans en arrière, lors de la mise en place du projet vaicteurAir2, aucun produit de ce type n'était présent sur le marché. Avec la société Cairpol, le consortium VaicteurAir2 a donc décidé de travailler à la conception d'un indicateur permettant de suivre le niveau de particules fines  $PM^{2.5}$ .

Le prototype réalisé s'appelle CairsolVif. Il est basé sur un principe de détection optique des particules grâce à un néphélomètre, associé à un dispositif innovant de séparation des particules afin de ne



prendre en compte que les particules de taille inférieure à  $2,5 \mu m$ . Une vue du prototype est donnée ci-après (Figure I).

Figure I : Cairsol Vif



Figure II : Banc d'essai CairsolVif

Les essais de caractérisation ont été menés en laboratoire en utilisant différents types d'aérosols et différents types de compteurs de référence. Un des bancs d'essais utilisé est présenté sur la Figure II. Il s'agit d'une boucle de section carrée avec des parois en verre. Des particules sont générées dans la boucle au moyen d'un générateur piézoélectrique. Un ventilateur assure la circulation de l'air dans la boucle. Le compteur de référence est ici un compteur MetOne, relié à l'intérieur de la boucle.

Une comparaison des données fournies par le Cairsol Vif et par le compteur MetOne est présentée sur la Figure III. Globalement, il apparaît que les concentrations mesurées sont assez similaires, même si certains pics sont un peu décalés, à cause notamment des temps de réponse et des modes de traitement des signaux qui diffèrent entre les deux systèmes. Ces premières caractérisations du Cairsol Vif sont néanmoins encourageantes quant à la précision que peut permettre d'atteindre ce type d'indicateur.

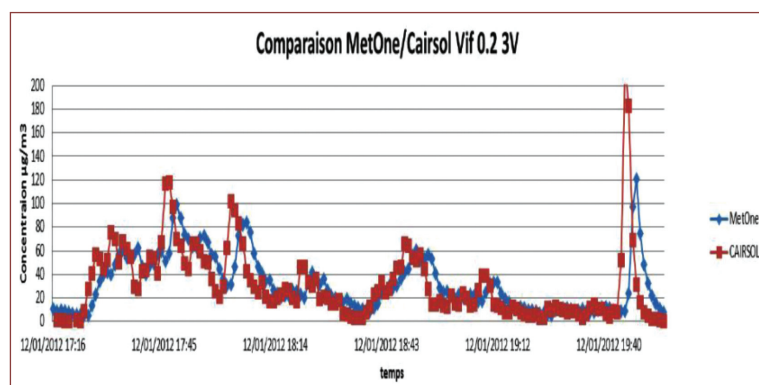


Figure III : Essai du capteur en laboratoire

## I ATELIER 2

Des essais complémentaires en ambiance réelle ont aussi été réalisés pour déterminer l'aptitude du Cairsol Vif à suivre des concentrations particulières plus représentatives des environnements intérieurs, autant par la nature des particules (poussières naturelles) que par les niveaux de concentration rencontrés (de l'ordre de quelques dizaines de  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Ces résultats sont présentés sur la Figure IV. Là encore, il y a une bonne cohérence entre l'information délivrée par le Cairsol Vif et par le compteur de référence Grimm 1.108 qui peut prendre en compte les particules sur différentes gammes entre  $0,3 \mu\text{m}$  et  $20 \mu\text{m}$ .

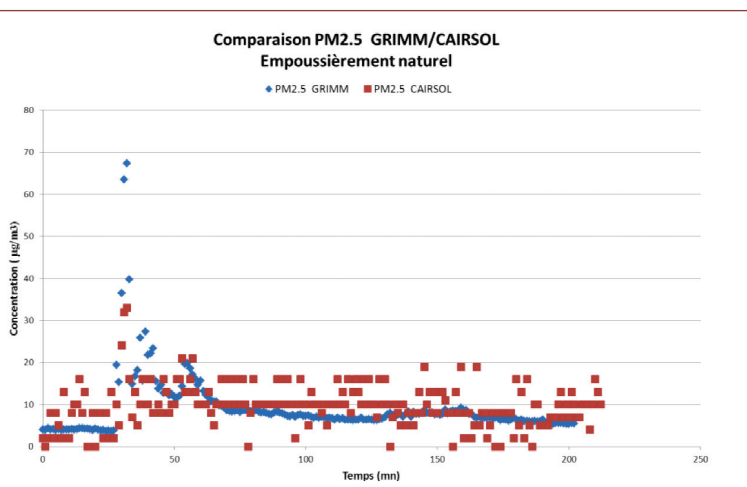


Figure IV : Essai du capteur sur site réel

Le niveau de précision dans le suivi de la concentration particulaire s'avère suffisant pour :

- Evaluer l'exposition moyenne des occupants d'un espace intérieur aux particules  $\text{PM}^{2,5}$ , par exemple sur des périodes de 8 heures correspondant à la durée d'une journée de travail, ou sur des périodes plus longues, afin de déterminer les niveaux chroniques.
- Signaler un dépassement ponctuel d'un seuil critique, nécessitant le déclenchement d'une action d'abattement des pollutions parti-

Figure V : Fonction Epure



culaires. Dans ce cas, l'indicateur Cairsol Vif doit être interfacé avec le système de contrôle et gestion d'un équipement de traitement d'air capable de traiter l'espace intérieur.

### 3. Présentation de la fonction Epure

Afin de pouvoir adresser les pollutions particulières produites à l'intérieur des locaux, CIAT a développé la fonction Epure. Elle résulte de la combinaison d'un élément de filtration à faible perte de charge et d'une unité de confort de type ventilo-convecteur capable d'assurer un brassage de plusieurs volumes heure d'un local de type bureau ou chambre d'hôpital.

La figure V donne une illustration du principe de la fonction Epure. La figure VI montre l'intégration de l'élément filtrant.

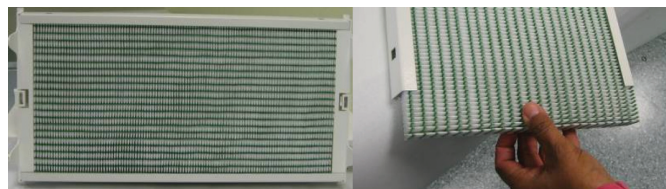


Figure VI : Intégration de l'élément filtrant

Grâce à l'efficacité renforcée de l'élément de filtration comparée à celle d'un filtre standard G3, et à l'efficacité de diffusion de l'unité de confort, c'est l'ensemble du local qui peut bénéficier d'une épuration particulaire. De plus, la conception innovante du média du filtre permet de ne pas impacter la perte de charge et donc de rester à un même niveau de consommation d'énergie du groupe moto-ventilateur. Ainsi, la fonction Epure permet d'abattre efficacement les pollutions particulières de type  $\text{PM}^{2,5}$  et  $\text{PM}^{10}$ , sans surcoût énergétique, et sans affecter le niveau sonore de la machine.

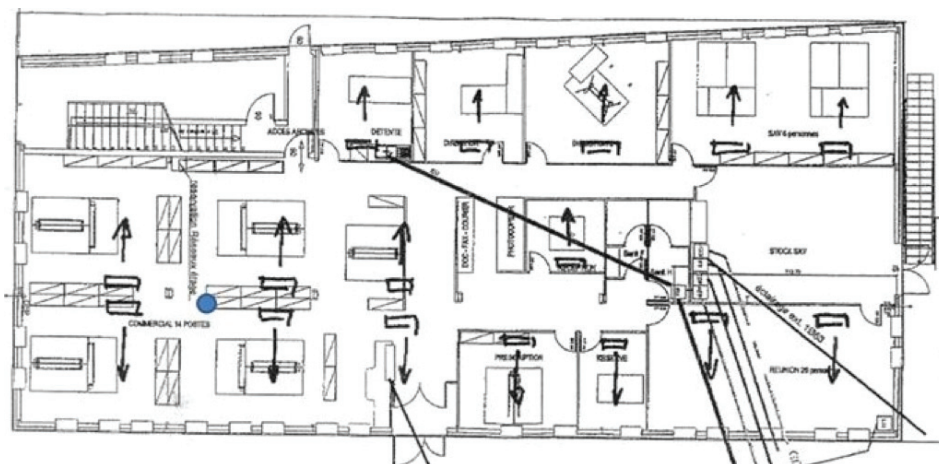
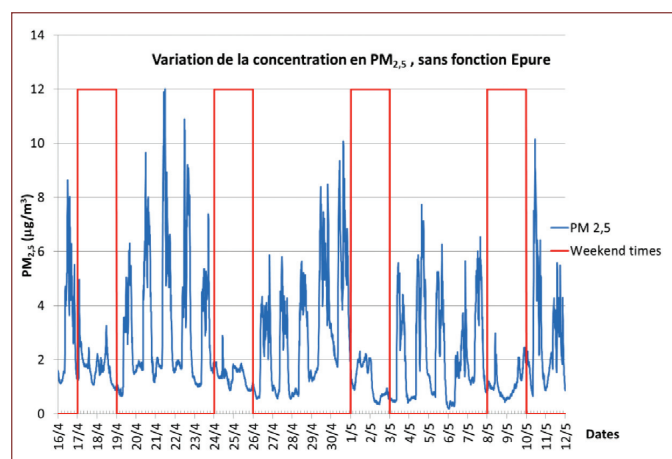
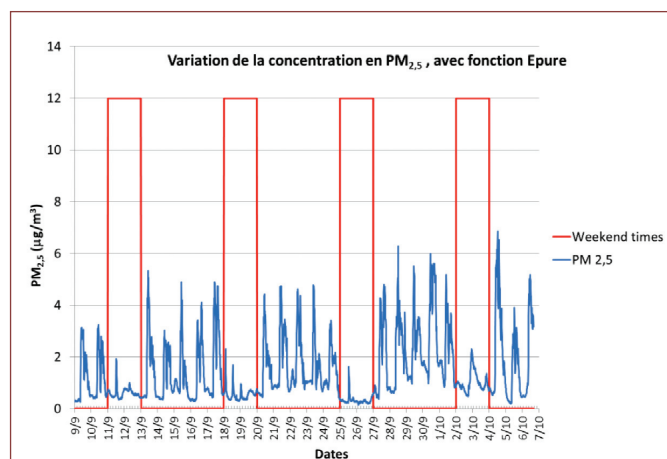


Figure VII : Plan du plateau de bureaux

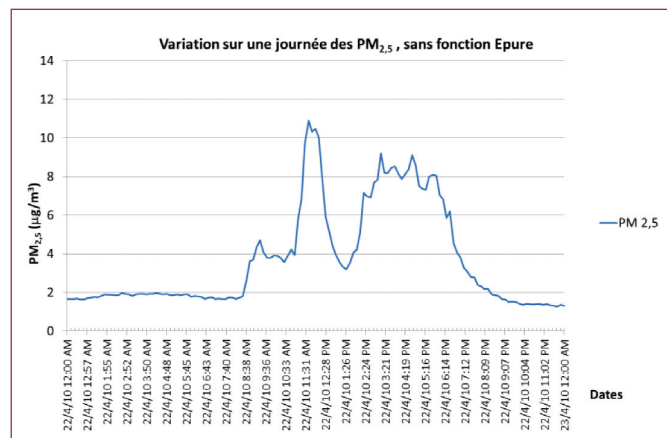
#### 4. Evaluation de la Fonction Epure sur site

Afin d'évaluer le niveau de pollution particulaire intérieure et l'efficacité de l'abattement particulaire de la fonction Epure, une campagne a été menée au sein d'un plateau de bureaux paysagé, situé en Région Lyonnaise, voir Figure VII.

Le plateau est équipé de plusieurs unités de confort CIAT (représentées par les rectangles avec les flèches sur la Figure VII). L'air neuf, soufflé par une centrale double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait est amené à chaque unité de confort. Le niveau d'efficacité du filtre sur l'air neuf est F7. Des relevés de la concentration en  $PM_{2.5}$  ont été réalisés sur des périodes de plusieurs semaines, avec une acquisition toutes les 15 mn. La position du point de sondage est représentée par le point bleu sur la Figure VII. Ces relevés ont été réalisés avec et sans fonction Epure dans les unités de confort. Les résultats sont présentés sur les Figures 8 et 9. La comparaison des deux graphes met clairement en évidence l'apport de la fonction Epure, qui permet d'abaisser d'un facteur 1,5 à 2 les niveaux de concentrations en  $PM_{2.5}$ . Avec la fonction Epure, les concentrations en  $PM_{2.5}$  demeurent nettement en deçà du seuil d'exposition permanente de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  préconisé par l'OMS.

Figure VIII : Concentration en  $PM_{2.5}$  sans fonction EpureFigure IX : Concentration en  $PM_{2.5}$  avec fonction Epure

L'analyse de ces relevés et de la Figure X, montre l'influence de l'occupation et de l'activité humaine sur la concentration interne des  $PM_{2.5}$ . On remarque l'augmentation des concentrations lors de l'arrivée des occupants et leur diminution lors de leur départ, même sur la coupure réduite de la pause déjeuner. Il est utile de préciser que dans le cas traité ici, le débit d'air neuf demeure constant au cours du temps, avec ou sans occupation. La filtration de l'air neuf entrant dans le bâtiment ne suffit pas à garantir un niveau intérieur de  $PM_{2.5}$  suffisamment bas. Un abattement complémentaire des particules au sein des locaux est aussi nécessaire

Figure X : Variation de la concentration en  $PM_{2.5}$  sur une journée

### 5. Conclusion et perspectives

Dans le contexte actuel où l'exposition des personnes aux particules fines apparaît comme de plus en plus fréquente et aiguë, et où une surveillance de la qualité de l'air intérieur se met en place dans les ERP, il est nécessaire de pouvoir gérer la pollution particulaire au sein des bâtiments.

La solution issue du projet VaicteurAir2 qui associe l'indicateur de  $PM^{2.5}$  Cairsol Vif à la fonction Epure, apporte une réponse concrète pour la prise en charge de cette problématique. Elle permet de compléter la filtration de l'air neuf utilisé pour la ventilation du bâtiment en traitant selon le besoin, les effets des sources internes liées à l'activité humaine, et ainsi garantir le respect de la concentration limite de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en  $PM^{2.5}$  préconisée par l'Organisation Mondiale de la Santé. Une régulation multicritères intégrée dans le système de contrôle des unités de confort CIAT permettra prochainement de pouvoir piloter le fonctionnement en fonction du besoin thermique et du besoin d'abattement particulaire.



# CENTRE DE TRAITEMENT DES BRÛLÉS DE L'HÔPITAL SAINT-LOUIS (AP-HP)

*Apport de la simulation numérique  
dans la maîtrise de la contamination aéroportée*

## **Christian BEAUCHÊNE**

*Ingénieur Chercheur - Expert aéronautique*

*EDF - Recherche et Développement*

*6, quai Watier*

*78400 Chatou*

## **Maurice MIMOUN**

*Chef du service des brûlés, du service de Chirurgie Plastique,  
Reconstructrice et Esthétique de l'hôpital Saint-Louis (AP-HP)*

*1, avenue Claude Vellefaux*

*75010 Paris*

## 1. Introduction :

La prévention des contaminations aéroportées est un enjeu majeur et permanent dans la lutte contre les infections nosocomiales en particulier dans les unités de soins accueillant des patients particulièrement immunodéprimés et infectés tels que les grands brûlés. L'auto-infection ou pour le moins l'auto-contamination du brûlé est pratiquement obligatoire à partir des germes cutanés ou digestifs du fait du milieu très favorable dû à la nécrose cutanée de la peau brûlée. Le risque de contamination fongique exogène est également important [1]. Il est impératif d'empêcher le transport de ces germes parfois très virulents et antibio-résistants notamment par la maîtrise de la contamination aéroportée.

Le nouveau Centre de Traitement des brûlés de l'hôpital Saint-Louis (AP-HP) inauguré le 12 septembre 2012 répond à la volonté du professeur Maurice Mimoun de penser l'hôpital autrement : que ce soit l'hôpital qui s'adapte au patient et non pas le patient qui s'adapte à l'hôpital. C'est pourquoi la structure de soins recevant le grand brûlé est basée sur un concept novateur, le « presque tout dans la chambre » qui permet au patient de ne jamais changer d'environnement pendant toute la phase aiguë de la brûlure.

La particularité de ce concept réside dans le fait que l'instrumentation et l'équipement nécessaires aux différents traitements se trouvent dans la chambre où le patient est contraint de résider en permanence sous la protection du plafond soufflant. La structure de soins regroupe donc dans un même lieu : une chambre, une salle de réanimation et une salle d'intervention chirurgicale et de soins. En outre, l'un des vecteurs de contamination important étant le risque

croisé entre patients, le professeur Mimoun a souhaité disposer pour chaque chambre d'une véritable barrière à la fois contre la contamination entrante et contre la contamination sortante. Pour ce faire, les chambres disposent de deux sas en dépression : un sas d'entrée/sortie et un sas de décontamination du matériel.

Dans ces conditions, il s'est avéré fondamental de valider voire d'améliorer le fonctionnement aéronautique de cet ensemble architectural novateur. C'est précisément pour répondre à ce besoin qu'une collaboration a été mise en place entre l'AP-HP Hôpital Saint-Louis, les équipes du professeur Mimoun et EDF-Recherche et Développement. Dès 2004 bien avant le début de la construction du Centre de Traitement des Brûlés, EDF-R&D est devenue, à la demande de l'AP-HP, partenaire de recherche de l'hôpital Saint-Louis. Son rôle : modéliser les écoulements d'air pour comprendre et améliorer la maîtrise du risque d'aérocontamination. Pour y parvenir, l'équipe de recherche d'EDF a apporté à l'hôpital son expertise aéronautique qui s'appuie principalement sur l'outil de modélisation numérique Code\_Saturne [2] développé et enrichi depuis plus de 30 ans par EDF pour répondre aux besoins de ses industries.

A travers la création d'un ensemble architectural virtuel, composé d'une chambre pour grand brûlé, de deux sas et d'un couloir ont été reproduits les écoulements d'air soumis à des phénomènes physiques complexes qui ne laissent pas place à l'intuition. De nombreuses configurations physiques et comportementales du patient et des équipes soignantes ont été simulées. [3]

## 2. Matériel et méthode

### 2.1. Etude préliminaire

La première étude avait pour objectif l'optimisation du schéma aéronautique du plafond soufflant de la chambre. En l'occurrence, il s'agissait de trouver le meilleur profil de vitesse, pour assurer une protection optimale du patient et la meilleure géométrie de plafond soufflant. Trois profils ont été testés : profil uniforme (même vitesse sur tout le plafond), profil convexe (survitesse au centre) et profil concave (survitesse sur les bords) et deux géométries de plafond : rectangulaire et octogonale.

Si cette première étude a permis de répondre au besoin de dimensionnement du plafond soufflant et son intégration virtuelle dans la chambre, elle a également permis de soulever un certain nombre de questions fondamentales concernant le fonctionnement global de l'ensemble architectural chambre/sas/couloir et notamment les interactions thermo-aéronautiques entre ces différents compartiments.

### 2.2 Le Programme Hospitalier de Recherche Clinique AOR-06-059

#### 2.2.1. Première étude du PHRC

Les modélisations qui ont été conduites pendant la première étude dans le cadre du partenariat entre l'Hôpital Saint-Louis et EDF-R&D, ont apporté des éléments conceptuels et des pratiques novateurs, performants et évolutifs du traitement de l'air. Les résultats encourageants issus de cette étude ont conduit les équipes de l'hôpital Saint-Louis à construire une chambre pilote, de taille réelle, équipée de dispositifs médicaux et dans laquelle peuvent évoluer des soignants, comme en situation réelle permettant ainsi de valider et compléter les résultats de simulations réalisées lors de l'étude préliminaire (Figure I).

Un Programme Hospitalier de Recherche Clinique a alors été soumis et accepté par le Département de la Recherche Clinique et du Développement de l'AP-HP en 2006. L'objectif de ce PHRC était au premier titre, l'élaboration du projet architectural d'un service de grands brûlés apte à minimiser la contamination aéroportée, validé sur des données de modélisation et de contrôles microbiologiques. Au-delà du projet architectural, cette recherche visait la compréhension plus fine des mouvements particuliers aéroportés afin d'améliorer la sécurité des patients, les pratiques et les conditions de soin.

Le PHRC a comporté deux études. La première a fait l'objet de plusieurs modélisations concernant principalement la compréhension des écoulements d'air de la chambre et de son environnement. Il s'agissait plus précisément de tester l'efficacité du plafond soufflant en tant que protection du patient et de l'équipe contre un risque de contamination ainsi que l'efficacité des sas en tant que barrière contre la contamination entrante et sortante. La seconde visait à palier les risques de dysfonctionnements aérauliques mis en évidence lors de la première étude.

##### 2.2.1.1. Modélisation de référence

Pour cette modélisation, ont été représentés dans la chambre numérique :

- le patient sur le lit,
- le personnel en situation d'intervention,
- le matériel en position d'intervention,
- les ouvertures successives des portes des deux sas,
- une partie du couloir.

Le scénario de la modélisation est le suivant :

- porte d'accès au sas N°1 ouverte pendant 5 s.
- habillage : 60 s.
- porte d'accès à la chambre ouverte pendant 5 s.
- soins au patient : 600 s.
- porte d'accès au sas N°2 ouverte pendant 5 s.
- déshabillage : 60 s.
- porte d'accès vers le couloir ouverte pendant 5 s.

#### 2.1.2.2. Validation des résultats de la première étude du PHRC

En matière de traitement des brûlés, patients particulièrement fragiles, tout changement tant au niveau de la structure d'accueil que des soins doit faire l'objet de protocoles de validation stricts. A ce titre, la validation des performances aérauliques dans la chambre expérimentale a été jugée incontournable. Cette chambre pilote (figure I) a donc été utilisée pour valider qualitativement les résultats de la modélisation numérique en les confrontant à des mesures expérimentales réalisées dans des conditions de fonctionnement proches de celles utilisées pour la modélisation.

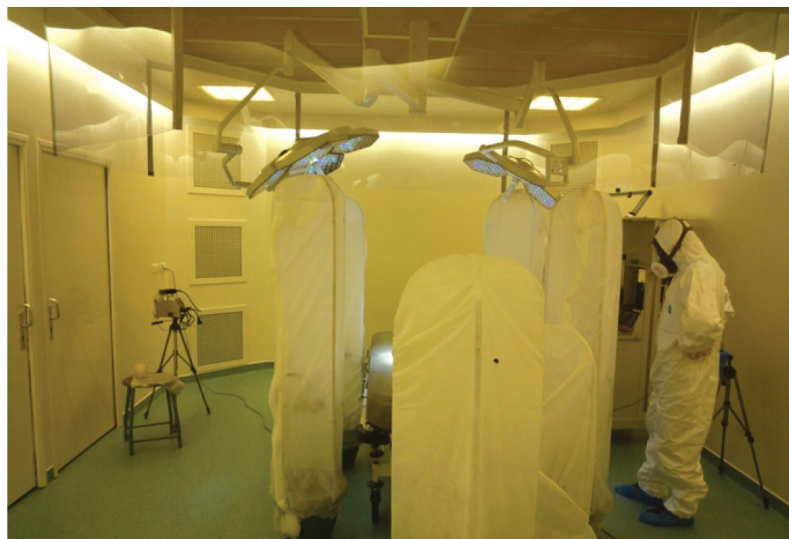


Figure I : Chambre pilote - Hôpital Saint-Louis (AP-HP)

Les principales caractéristiques de la chambre pilote sont les suivantes :

- sas d'entrée et sas de sortie,
- table d'opération en position centrale,
- éclairage opératoire,
- équipement de soins,
- plafond soufflant octogonal avec profil de vitesses convexe,
- mannequins en textile dotés chacun d'une puissance thermique simulant la présence de personnel soignant.

Les validations ont porté sur les principaux résultats des modélisations :

- choix du profil convexe, (mesures de vitesse)
- risque d'accumulation de contaminant en partie haute de la chambre entre la jupe et la paroi, (mesures microbiologiques)
- comportement aéraulique de l'ensemble chambre / sas / couloir. (mesures particulières)

#### 2.2.2. Seconde étude du PHRC

Cette étude, complémentaire des études précédentes avait pour objet une modélisation du comportement aéraulique de l'ensemble architectural composé du couloir, des deux sas et de la chambre dans le cas d'une contamination du couloir. En effet, bien que considéré comme propre, ce couloir ne dispose pas de système de traitement d'air aussi performant que la chambre et les sas.

Les deux objectifs principaux étaient d'observer le comportement aéroulque des différents compartiments lorsqu'il n'existe pas de gradient de température entre la chambre et les sas et de vérifier l'efficacité des sas en tant que barrière physique contre le risque d'aérocontamination du patient.

### 3. Résultats

L'étude préliminaire a permis de prouver que la géométrie octogonale du plafond soufflant et le profil de soufflage convexe répondent aux objectifs fixés : disposer d'un schéma aéroulque efficace qui minimise les perturbations de l'air tout en obtenant le débit le plus faible possible et en assurant le confort et la sécurité du patient et de l'équipe dans la zone protégée. En effet, la modélisation des trois profils de vitesses d'air (uniforme, convexe, concave) met en évidence qu'en présence de contamination simulée dans la chambre le profil convexe assure la concentration de contaminant la plus basse dans la zone de la table d'opération. (Figure II). S'agissant de la géométrie du plafond, le principal reproche que l'on puisse faire au plafond rectangulaire concerne le risque de re-circulation dans les angles, d'où l'idée de modifier la géométrie du plafond en supprimant ces angles. La modélisation a mis en évidence que cette modification supprime le risque de remontée de contaminant dans les angles droit du plafond (Figure III, Figure IV). Cette géométrie présente également l'avantage de diminuer la surface du plafond et donc la quantité d'air soufflée ce qui engendre une économie d'énergie substantielle car outre le débit de l'air, il faut rappeler que sa température en sortie est de l'ordre de 30°C.

La première étude du Programme Hospitalier de Recherche Clinique a confirmé l'efficacité du plafond soufflant dans la zone protégée. Cependant, elle a mis en évidence un risque de re-circulation de contaminant entre la jupe et le haut de la chambre au niveau des portes des sas (Figure V). En outre, elle a également permis de mettre en évidence le rôle critique de la température dans les échanges entre compartiments lorsqu'il existe un gradient au moment de l'ouverture des portes : la bascule thermo-aéroulque (Figure VI), ce risque poten-

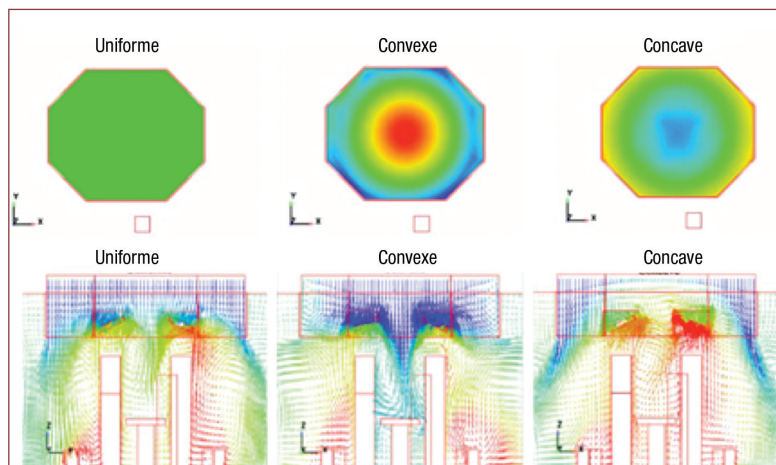


Figure II : Modélisation des trois profils de vitesse d'air

tiel de voir des contaminants remonter en quelque sorte à contre courant depuis le sas vers la chambre à cause d'une simple différence usuelle de température entre ces deux compartiments [4].

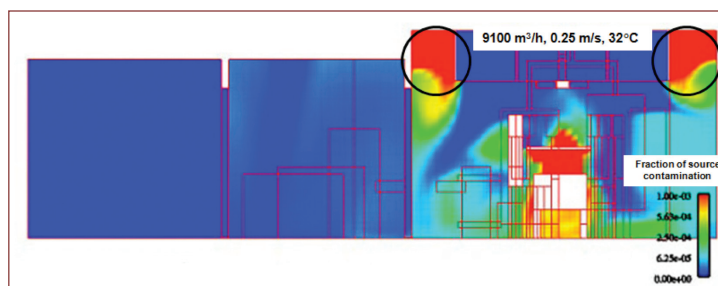


Figure V : Concentration de contaminant émis par le patient dans la chambre

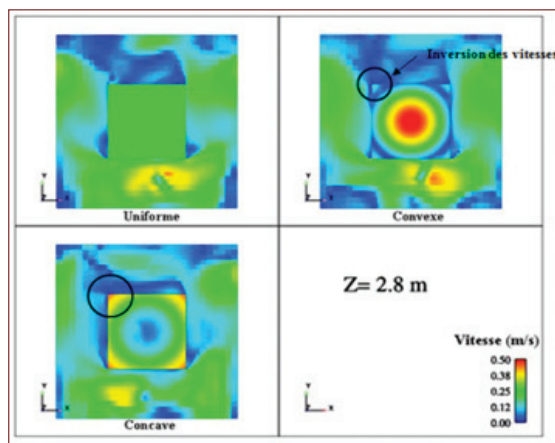


Figure III : Plafond soufflant rectangulaire

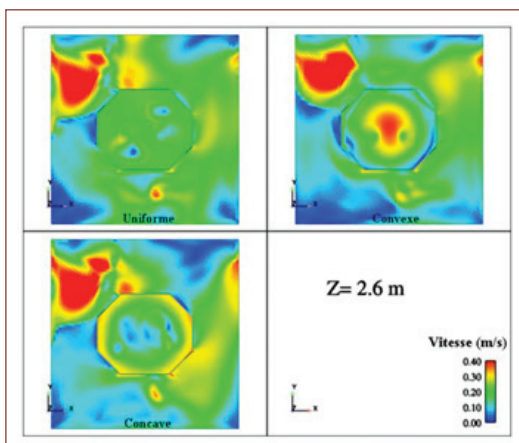


Figure IV : Plafond soufflant octogonal

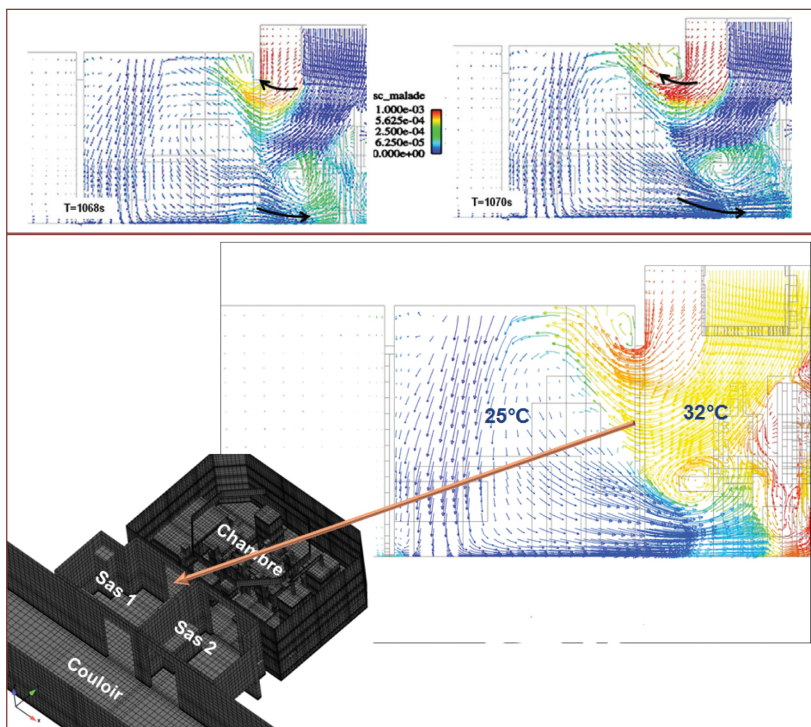


Figure VI : Bascule thermo-aéraulique entre la chambre et le sas

Les modélisations de cette première étude mettent également en évidence que la proximité du soufflage et de l'extraction des sas crée un pont aéraulique entre ces deux composants qui risque de nuire à leur cinétique de décontamination (Figure VII).

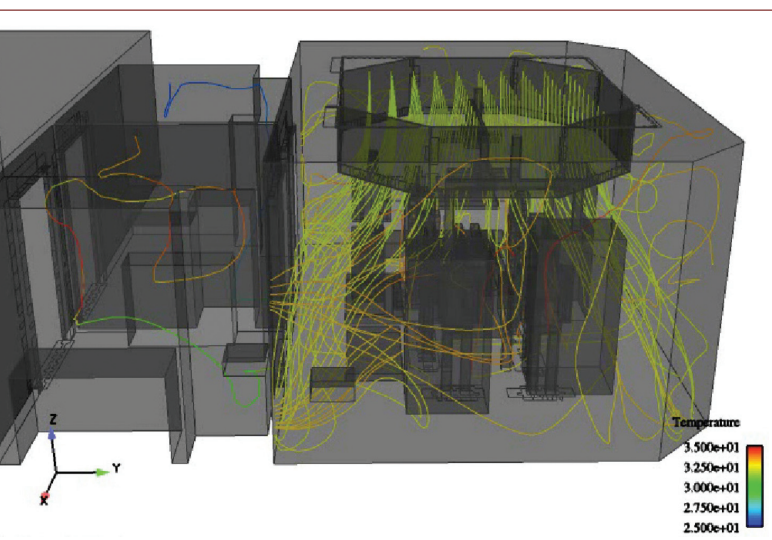


Figure VII : Simulation de fuite depuis la chambre vers le sas

Des modélisations complémentaires, réalisées à la demande du professeur Mimoun, ont permis d'une part de prouver l'efficacité de la jupe qui empêche le contaminant stocké en partie haute de revenir dans la zone de soufflage et d'autre part de montrer que l'équipe soignante a très peu d'influence sur l'écoulement d'air dans la partie la plus sensible. Enfin, le changement d'emplacement des extractions a très peu changé le risque d'accumulation haute et ne casse pas le rouleau de convection au voisinage du plafond.

Les résultats de la seconde étude du PHRC ont mis en évidence l'absence de bascule thermo-aéraulique lorsque le gradient de température entre les compartiments est faible ou inexistant (Figure VIII). Dans ces conditions, les sas présentent une grande efficacité en tant que barrière contre l'entrée et/ou la sortie de contaminants (Figure IX). De surcroît, ces résultats confirment que la bascule progresse ou diminue selon que le gradient de température est plus ou moins important.

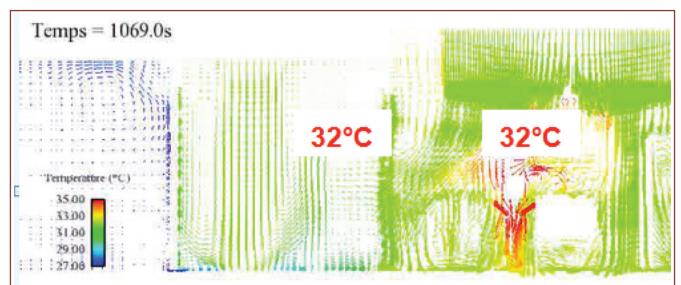


Figure VIII : Ouverture de la porte entre le sas et la chambre  
Champs de vecteurs vitesse coloré par la température

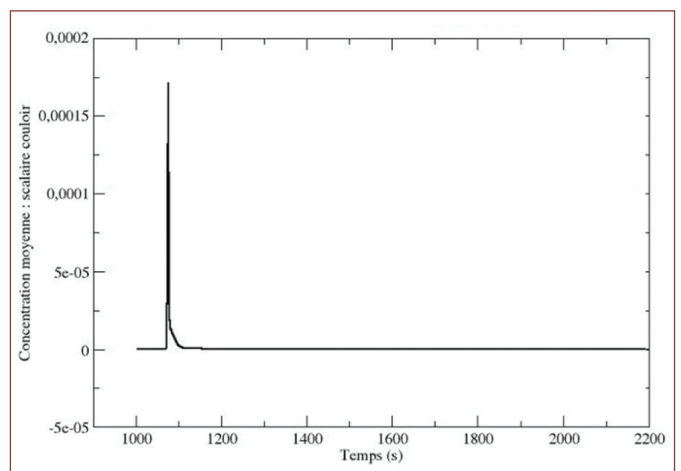


Figure IX : Evolution du scalaire couloir dans la chambre

## 4. Conclusion

La prévention des contaminations aéroportées est un enjeu majeur et permanent dans la lutte contre les infections nosocomiales en particulier dans les unités de soins accueillant des patients particulièrement immunodéprimés et infectés tels que les grands brûlés. L'importance de la maîtrise du risque de contamination aéroportée progresse au rythme de la compréhension des phénomènes physiques complexes qui la caractérise et qui ne laissent pas place à l'intuition qui est systématiquement trompeuse lorsqu'il s'agit d'étudier des mouvements d'air soumis à ces interactions physiques.

La Simulation Numérique en Mécanique des Fluides ou CFD pour « Computational Fluid Dynamics » est une méthode développée depuis plus de 80 ans et ce sont les progrès de l'informatique qui permettent depuis quelques années d'en faire un outil puissant et accessible. Elle est aujourd'hui utilisée intensivement dans les milieux de la recherche, de l'ingénierie et de l'industrie. La CFD permet de donner accès à des informations difficiles voire impossibles à envisager sur un plan expérimental.

Dans le cadre de la construction du Centre de traitement des brûlés de l'hôpital Saint Louis, la modélisation numérique a incontestablement été un outil d'aide à la conception mais elle s'est également révélée être un formidable outil d'investigation scientifique [5] permettant de multiplier à l'envie des modifications de géométries et de conditions de fonctionnement aéraulique de l'ensemble « couloir/sas/chambre » voire de comportements humains.

La CFD a permis de dimensionner mais aussi de comprendre car il est à noter qu'au-delà des aspects techniques, en rendant visible l'invisible, cet outil permet aux équipes intervenant dans la chambre de mieux comprendre ou se trouvent les risques de contamination et donc de mieux les maîtriser. Pour le professeur Mimoun, il était fondamental que l'équipe médicale et paramédicale puisse moduler en toute sécurité certains paramètres aérauliques en fonction de l'état du patient pour apporter de l'efficacité aux soins sans nuire à sa sécurité. Des modélisations ont permis de visualiser le comportement aéraulique de la chambre en cas de changement de ces paramètres et d'apporter des réponses.

Enfin la modélisation numérique a permis de mettre à jour le rôle critique de la thermique générant un phénomène de bascule thermo-aéraulique. C'est un bon exemple de phénomène contre-intuitif puisqu'il s'agit de la remontée d'un flux d'air apparemment à contre-courant depuis une zone en dépression vers une zone en surpression. Il est clair que la compréhension de ce phénomène inattendu et majeur n'aurait pu être détectée sans la modélisation numérique.

Nous tenons à préciser que la bascule thermo-aéraulique a pu être confirmée expérimentalement dans la chambre pilote de l'hôpital Saint-Louis. De même l'expérimentation physique a confirmé qu'au-delà d'un écart de quelques degrés ce phénomène est proportionnel à la différence de température entre les deux pièces contiguës.

La CFD s'est donc révélé être un outil précieux en mettant en évidence des risques de dysfonctionnement des flux d'air tels que les zones mortes, les zones de re-circulation, les zones de déposition ré-envoi et plus

encore la bascule thermo-aéraulique. Tous ces dysfonctionnements potentiels sont autant de risques d'aérocontamination. La modélisation a donc l'immense intérêt d'aider à comprendre ce qui est capital dans le domaine de la maîtrise des risques de contamination aéroportée car pour maîtriser ces risques, il faut d'abord les comprendre.

Nous sommes convaincus que l'apport de la modélisation numérique dans la maîtrise de la contamination aéroportée va progresser au sein de l'hôpital dans les années à venir et contribuer au souhait de Louis Pasteur : « Au lieu de s'ingénier à tuer les microbes dans les plaies, ne serait-il pas plus raisonnable de ne pas en introduire ».

## Bibliographie

1. BECKER WK, CIOFFI WG JR, MCMANUS AT, KIM SH, MCMANUS WF, MASON AD, PRUITT BA JR. Fungal burn wound infection. A 10-year experience. Arch Surg. 1991 Jan;126(1):44-8.
2. ARCHAMBEAU F, MECHITOUA N., SAKIZ M. Code\_Saturne : a Finite Volume Code for the Computation of Turbulent Incompressible Flows - Industrial Applications, International Journal on Finite Volumes, 2004.
3. BEAUCHENE C., MIMOUN M. : Service des brûlés de l'hôpital Saint-Louis (AP-HP): Modélisation des écoulements d'air pour la maîtrise du risque de contamination aéroportée. H-I83-2010-02414-FR ; juin 2010
4. Beauchêne C., Laudinet N., Choukri F., Rousset J-L., Larbre J., Chaouat M., Benbunan M., Mimoun M., Lajonchère J-P., Bergeron V., Derouin F. : Accumulation and Transport of Microbial-Size Particles in a Pressure Protected Intensive Care Room: CFD Modelization and Experimental Evidence ; PHRC AOR-06-059 ; 2010 apr
5. METANI A., BERGERON V., BEAUCHENE C., BENHAMADOUCHE S., DEROUIN F., MIMOUN M. Apport de la simulation numérique à la maîtrise de l'aérocontamination chez le grand brûlé. Etude de la déposition et du ré-envoi de spores d'Aspergillus ; SFETB Brulures ; mars 2013

## Congrès

1. MIMOUN M., BEAUCHENE C. Apport de la simulation numérique dans la maîtrise de la contamination aéroportée - Application aux centres de grands brûlés. 29ème congrès de la Société Française d'Etude et de Traitement des Brûlures ; juin 2009 ; Arcachon
2. BEAUCHENE C. & coll. Airflow modelization by computational Fluid Dynamics for optimizing control for airborne microbial contamination in a intensive care room for severely burned patients. European Congress of clinical microbiology and infectious diseases; Avril 2010; Vienne (Autriche)
3. METANI A., BERGERON V., BEAUCHENE C., BENHAMADOUCHE S., DEROUIN F., MIMOUN M. Maîtrise du risque aspergillaire. 32ème congrès de la Société Française d'Etude et de Traitement des Brûlures ; juin 2012 Nantes