



HAL
open science

Déposition et réenvol de spores fongiques : contribution à la compréhension du risque nosocomial aérotransmis

Amine Metahni

► To cite this version:

Amine Metahni. Déposition et réenvol de spores fongiques : contribution à la compréhension du risque nosocomial aérotransmis. Autre [cond-mat.other]. Ecole normale supérieure de lyon - ENS LYON, 2012. Français. NNT : 2012ENSL0795 . tel-00833993

HAL Id: tel-00833993

<https://theses.hal.science/tel-00833993>

Submitted on 13 Jun 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Déposition et Réenvol de Spores Fongiques

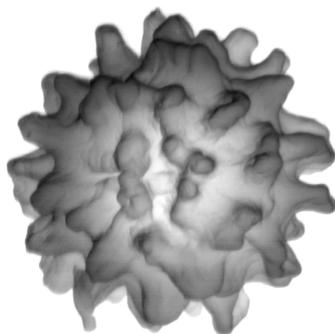
Contribution à la Compréhension
du Risque Nosocomial Aérotransmis

-
Thèse de Doctorat présentée par :

M. Amine METAHNI

Pour obtenir le titre de :

Docteur de l'École Normale Supérieure de Lyon - Université de Lyon



Dirigée par : Dr. Vance BERGERON

École doctorale : Physique et Astrophysique (PHAST)

Laboratoire : Laboratoire de Physique de l'ENSL - UMR CNRS 5672

	Emmanuel LÉVÊQUE	<i>ENS, Lyon</i>	Président
	Vance BERGERON	<i>ENS, Lyon</i>	Directeur
	Denis BOULAUD	<i>IRSN, Paris</i>	Rapporteur
<i>Jury :</i>	Jacques VAN DER DONCK	<i>TNO, Delft</i>	Rapporteur
	Christian BEAUCHÊNE	<i>EDF R&D, Paris</i>	Membre
	Sofiane BENHAMADOUCHE	<i>EDF R&D, Paris</i>	Membre
	Francis DEROUIN	<i>APHP, Paris</i>	Invité
	Maurice MIMOUN	<i>APHP, Paris</i>	Invité

-
Soutenue publiquement le 21 Décembre 2012

Table des matières

Historique	7
Prologue	9
Notations	11
I Contexte	15
1 L'infection nosocomiale	17
1.1 Définition de l'infection nosocomiale	17
1.2 Prévalence des infections nosocomiales en France	18
1.3 La transmission aéroportée des agents infectieux	19
1.4 Les patients immunodéprimés	23
1.5 Cas particulier du grand brûlé	24
2 <i>Aspergillus</i> et le règne fongique	29
2.1 Le règne fongique	29
2.2 <i>Aspergillus</i>	30
2.3 Pouvoir pathogène des <i>Aspergillus</i>	33
2.4 Le risque aspergillaire chez les patients immunodéprimés	34
2.5 Relation entre exposition et infection aspergillaire	36
II Études Expérimentales	39
Avant-propos	41
3 Aérosolisation et sédimentation	43
3.1 Le nébuliseur Collison	43
3.2 Aérosolisation de spores par voie sèche	45
3.3 Sédimentation de particules	48
4 Fongicides et surfaces	55
4.1 Objectifs	55
4.2 Matériel et méthodes	56
4.3 Résultats	57
4.4 Conclusion	62

5 Réenvol de particules	63
5.1 Éléments de théorie	63
5.2 Montage expérimental	65
5.3 Observations	67
6 Spores fongiques et ventilateurs	73
6.1 Introduction	73
6.2 Mise en évidence expérimentale	74
6.3 Prélèvements en milieu hospitalier	78
6.4 Conclusion	78
III Simulation numérique	81
Avant-propos	83
7 Écoulement autour de sphères	85
7.1 Introduction	85
7.2 Sphère libre	88
7.3 Sphère posée	91
7.4 Deux sphères	97
7.5 Quadrillage périodique de sphères	102
8 Résultats théoriques et applications pratiques	105
8.1 Critère de détachement	105
8.2 Application numérique	110
8.3 Comparaison avec l'expérience de réenvol	111
Épilogue	115
Bibliographie	121
Annexes	131
A Introduction au calcul numérique	133
A.1 Modélisation mathématique et mécanique des fluides	133
A.2 La simulation numérique en mécanique des fluides	135
A.3 Le maillage	139
A.4 <i>Code_Saturne</i>	140
B Profil de Blasius	141
C Sources	149
C.1 Calcul du profil de Blasius	149
C.2 Calcul des coefficient de traînée et de portance	153
C.3 Maillage de sphères en script Python	157
D Protocoles Expérimentaux	171
D.1 Préparation de solutions de spores d' <i>Aspergillus niger</i>	171
D.2 Évaluation de traitements fongicides	172

E Publications et communications	175
E.1 Société des Experts Chimistes de France	175
E.2 32 ^e congrès de la SFETB	175
E.3 Revue Brûlures	175
E.4 Articles soumis	175

Historique

Avant de commencer, je souhaiterais évoquer brièvement l'histoire de cette thèse. Elle a commencé il y a quelques années, bien avant que l'on ne me propose de travailler sur le sujet. Il y a au départ la collaboration entre EDF R&D, Airinspace et l'hôpital Saint Louis. EDF R&D possède une compétence en simulation numérique en mécanique des fluides ainsi qu'une expertise aéronautique, tandis qu'Airinspace fabrique des modules de décontamination de l'air à usage médical. Ensemble, ils essaient de répondre à une question pour laquelle il n'y a pas de réponse univoque : quelle est l'aérodynamique de décontamination d'une pièce lorsqu'un module y est placé, et comment en maîtriser la cinétique.

Grâce à cette collaboration, une première rencontre a lieu : celle de Christian Beauchêne, qui fut mon encadrant à Chatou, et du professeur Maurice Mimoun, spécialiste en chirurgie des brûlés esthétiques et réparatrices. Ensemble, ils adoptent pour la première fois une approche physique numérique afin de trouver la meilleure façon de protéger le brûlé, particulièrement sensible aux germes aéropartés. La problématique des infections nosocomiales aéropartées est extrêmement critique car le grand brûlé, durant la phase aigüe, est un patient immunodéprimé sujet à de nombreux soins, entraînant près d'une centaine de passages de personnel soignant chaque jour. Ensemble ils cherchent à maintenir le patient dans un environnement protégé en évitant toute sortie et en créant une chambre inédite contenant tout ce qui est nécessaire aux soins et qui devient tour à tour salle d'opération, salle de réanimation ou salle de soin. C'est le concept du presque tout dans la chambre. Ils souhaitent alors créer un centre de référence de traitement des grands brûlés.

Cette idée se concrétise grâce à un Programme Hospitalier de Recherche Clinique (PHRC) conclu entre EDF R&D, Airinspace et l'Assistance Publique – Hôpitaux de Paris (APHP), grâce à un financement de la Délégation à la Recherche Clinique (DRC) du Ministère de la Santé. Ce programme a pour objectif la maîtrise de la contamination aéropartée dans un environnement protégé grâce à la modélisation numérique dans un espace virtuel et à l'étude expérimentale dans une chambre pilote de grand brûlé. Débuté en 2006, le PHRC vise également l'application à d'autres unités protégées.

C'est vers la fin du PHRC, précisément dans cette chambre pilote, à l'Hôpital Saint-Louis l'été 2008, que je rencontre pour la première fois Christian Beauchêne lors d'une campagne de mesures. Il évoque alors un projet de thèse sur la déposition et le réenvol de spores fongiques, tandis que j'effectuais mon travail de fin d'études en collaboration avec Airinspace, et sous la direction de Vance Bergeron. À ce titre, la rencontre avec mon futur directeur fut décisive car il m'a convaincu de faire une thèse, ce qui n'était pas dans mes projets, et m'a donné le goût de la recherche.

C'est ainsi qu'en Novembre 2009, dans le prolongement du PHRC, j'ai commencé ma thèse avec pour objectif le développement d'un modèle numérique d'aérocontamination en milieu hospitalier, basé sur des expérimentations menées au laboratoire de physique de l'ENS de Lyon. Cette thèse fut une première car financée en partie par la Fondation EDF, dans le cadre d'un mécénat de compétences, et aussi car elle réussit à accorder des acteurs différents et complémentaires : le CNRS, EDF R&D, l'hôpital Saint-Louis, mélangeant ainsi les milieux de la recherche académique, industrielle et médicale.

Le nouveau Centre de Brûlés de l'Hôpital Saint-Louis a été inauguré le 13 Septembre 2012 par la Ministre de la santé Marisol Touraine.



Chambre de brûlés expérimentale de l'hôpital Saint-Louis, Paris. Été 2008



Chambre du centre de brûlés de l'Hôpital Saint Louis, Paris. Été 2012

Prologue

Étant donné la diversité des sujets abordés au cours de cette thèse, il est très probable que le lecteur se retrouve à un moment face à un domaine dont il n'est pas familier. C'est pour cette raison que j'ai essayé d'introduire toutes les notions et outils utilisés de la façon la plus simple possible, de manière à rendre la lecture aussi fluide que possible, quelque soit le bagage du lecteur. Il est évidemment impossible de tout vulgariser et je prie le lecteur de me pardonner s'il se retrouve face à des passages obscurs : si c'est le cas, c'est sans doute qu'ils le sont encore pour moi aussi. De la même façon, que le lecteur érudit veuille bien m'excuser s'il se retrouve en face de parties lui semblant triviales.

Au delà de l'accessibilité de mon travail, je me suis efforcé de transmettre les informations que j'ai récolté pendant quatre ans de la façon la plus opérationnelle et exhaustive possible. Dans la mesure où mes travaux auront potentiellement une suite, il est important de se poser la question de la transmission du savoir. J'ai ainsi tenté de penser ce manuscrit comme un manuel de l'utilisateur, un guide qui permettra aux personnes souhaitant poursuivre le travail commencé de le faire le plus efficacement possible en évitant les écueils dans lesquels je suis déjà tombé. J'espère donc d'une part que la lecture de ce qui suit sera suffisamment intéressante pour donner envie de travailler sur le sujet, et d'autre part qu'elle sera suffisamment intelligible pour permettre de rapidement reprendre le gouvernail et prendre le vent.

La première partie peut-être considérée comme une vaste introduction. Sa compréhension ne nécessite aucun prérequis ni bagage scientifique quelconque. Elle traite des maladies nosocomiales, de l'immunodépression, et des moisissures pathogènes. Les deux parties suivantes sont plus techniques, mais sont cependant introduites de façon à être accessibles à des non-spécialistes. Elle décrivent respectivement les expérimentations que j'ai effectué au laboratoire de Physique de l'ENS de Lyon, et les simulations réalisées à Chatou avec EDF R&D. Je finis par montrer comment ces deux parties se nourrissent mutuellement.

Gambatte !

Notations

Symboles latins

C_C	Facteur de correction de Cunningham	adimensionnel
C_d	Coefficient de traînée	adimensionnel
C_l	Coefficient de portance	adimensionnel
Co	Nombre de Courant	adimensionnel
C_s	Coefficient latéral	adimensionnel
CADR	Débit d'air propre	$m^3 \cdot s^{-1}$
d_m	Diamètre de collision	m
d_p	Diamètre de la particule	m
d_p^+	Diamètre adimensionnel	adimensionnel
D	Débit volumique	$l \cdot min^{-1}$
e	Énergie totale par unité de masse	$J \cdot kg^{-1}$
f	Fonction de courant réduite	adimensionnel
\vec{f}	Résultante des forces massiques	N
F_a	Force d'adhésion	N
F_d	Force de traînée	N
F_G	Force d'attraction gravitationnelle	N
F_l	Force de portance	N
g	accélération de la pesanteur	$m \cdot s^{-2}$

H	Hauteur	m
k_s	Coefficient de frottement statique	adimensionnel
m	Masse	kg
M_a	Moment d'adhésion	$N \cdot m$
M_{ae}	Moment d'adhésion à l'équilibre	$N \cdot m$
M_{ae}^*	Moment d'adhésion à l'équilibre adimensionnel	adimensionnel
M_A	Moment maximal d'adhésion	$N \cdot m$
M_A^*	Moment maximal d'adhésion adimensionnel	adimensionnel
M_d	Moment de détachement	$N \cdot m$
n	Nombre de molécules par unité de volume	m^{-3}
N	Force arbitraire	N
N^*	Force arbitraire adimensionnelle	N
$N_a r r^*$	Force d'arrachement adimensionnelle	adimensionnel
p	Pression	Pa
\vec{q}	Flux de chaleur par conduction thermique	$J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
Q	Débit	$m^3 \cdot s^{-1}$
r	Perte de chaleur volumique due au rayonnement	$J \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$
r_a	Rayon du disque de contact	m
r_a^*	Rayon adimensionnel du disque de contact	adimensionnel
r_{ae}	Rayon du disque de contact à l'équilibre	m
r_{ae}^*	Rayon adimensionnel du disque de contact à l'équilibre	adimensionnel
r_p	Rayon de la particule	m
Re	Nombre de Reynolds	adimensionnel
Re_G	Nombre de Reynolds global	adimensionnel
Re_L	Nombre de Reynolds local	adimensionnel

s	Variable réduite	adimensionnel
S	Surface de référence	m^2
t	Temps	s
u_*	Vitesse de cisaillement	$m \cdot s^{-1}$
U_∞	Vitesse de l'écoulement non perturbé	$m \cdot s^{-1}$
$U_{1/2}$	Vitesse à mi-hauteur	$m \cdot s^{-1}$
U_δ	Vitesse moyenne dans la couche limite	$m \cdot s^{-1}$
$\vec{U}(u, v, w)$	Composantes orthonormales de la vitesse	$m \cdot s^{-1}$
V	Volume de la cuve	m^3
V_S	Vitesse de sédimentation	$m \cdot s^{-1}$
W_a	Énergie d'adhésion	J
y^+	Distance adimensionnelle	adimensionnel

Symboles grecs

δ	Épaisseur de la couche limite	m
Δ	Coefficient de diminution	s^{-1}
Δt	Pas de discrétisation temporelle	s
Δx	Pas de discrétisation spatiale	m
η	Efficacité	%
$\dot{\gamma}$	Taux de cisaillement	s^{-1}
κ	Module d'élasticité	Pa
λ	Libre parcours moyen	m
Λ	Critère de réenvol	<i>adimensionnel</i>
μ	Viscosité dynamique	$Pa \cdot s$
ν	Viscosité cinématique	$m^2 \cdot s^{-1}$

ψ	Fonction de courant	adimensionnel
ρ_f	Masse volumique du fluide	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_p	Masse volumique de la particule	$kg \cdot m^{-3}$
σ	Énergie surfacique d'adhésion	$J \cdot m^{-2}$
τ	Contrainte de cisaillement	Pa
$\bar{\tau} = (\tau_{i,j})_{i,j}$	Tenseur des contraintes	Pa

Propriétés de l'air aux conditions standard

Température	$293 K \simeq 20^\circ C$
Pression	$101 kPa \simeq 758 mmHg$
Viscosité	$\rho = 1,81 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s$
Densité	$d = 1,20 kg \cdot m^{-3}$
Libre parcours moyen	$\lambda = 6,60 \cdot 10^{-8} m$

Première partie

Contexte

Chapitre 1

L'infection nosocomiale

1.1 Définition de l'infection nosocomiale

L'étymologie du terme « nosocomial » nous apprend qu'il est composé des termes grecs *nosous*, maladie, et *komein*, soigner, formant le mot *nosokomeion*, hôpital. Une infection nosocomiale (IN) est donc une infection que l'on contracte à l'hôpital. Lors du diagnostic d'une infection soupçonnée d'être d'origine nosocomiale, la difficulté consiste à déterminer si elle a effectivement été acquise du fait de l'hospitalisation. Une définition opérationnelle est donc nécessaire pour laisser le moins de place possible à une interprétation subjective, source potentielle d'erreurs.

La définition adoptée à ce jour par l'Institut de Veille Sanitaire (InVS) spécifie qu'une infection est dite associée aux soins si elle survient au cours de la prise en charge d'un patient, et si elle n'était ni présente, ni en incubation au début de la prise en charge [5]. Contractée dans un établissement de santé, toute infection associée aux soins est par conséquent une infection nosocomiale. La notion d'infection associée aux soins étend celle d'infection nosocomiale, auparavant limitée aux seuls établissements de santé, aux autres lieux de soins (hôpital, cabinet médical, établissement médico-social, *etc.*) et aux professionnels de santé, voire aux soins pratiqués par le patient ou sa famille sous couvert d'un professionnel de santé. L'infection nosocomiale est un cas particulier d'infection liée aux soins.

Lors d'une infection que l'on suspecte nosocomiale, il faut donc déterminer qu'elle n'était ni en incubation, ni présente lors de l'admission. Cependant, la situation précise d'un patient à l'admission n'est pas systématiquement connue. Dans ce cas, il est communément admis qu'un délai d'au moins 48 heures après l'admission, ou un délai supérieur à la période d'incubation lorsque celle-ci est connue, sépare une infection d'acquisition nosocomiale d'une infection communautaire. Ce délai est étendu à 30 jours pour une plaie opératoire et jusqu'à un an pour la pose d'une prothèse ou d'un implant. Dans les cas douteux, il faut savoir apprécier la plausibilité du lien causal entre hospitalisation et infection, ce qui dans certains cas peut s'avérer extrêmement difficile, avec une certaine marge d'erreur.

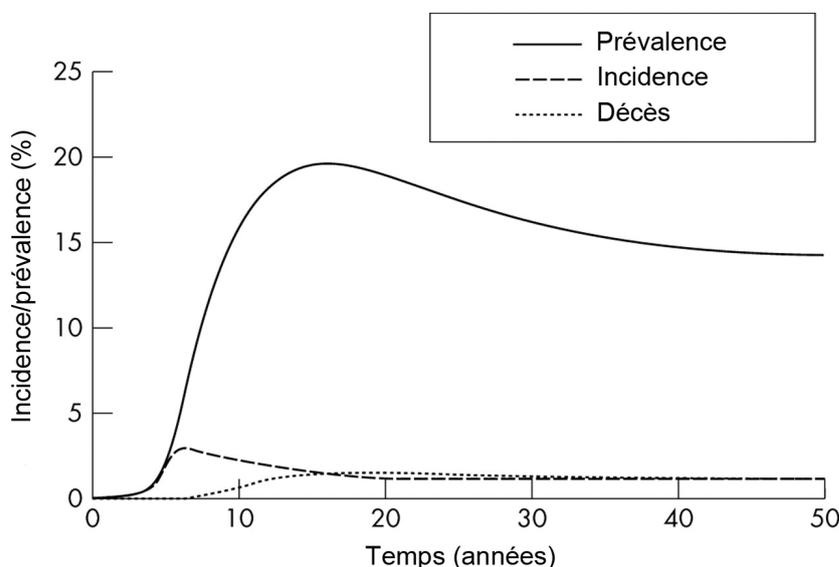
Être capable d'identifier les infections nosocomiales est un exercice ardu, et il est nécessaire de le systématiser pour plusieurs raisons. Il est tout d'abord impossible de comparer des études épidémiologiques avec rigueur, si ces dernières utilisent des protocoles différents. C'est pourtant le seul moyen d'évaluer quantitativement l'incidence des infections nosocomiales, ainsi que l'efficacité des mesures éventuelles de prévention mises en place. Il faut donc harmoniser ces protocoles

sur une échelle, sinon européenne, du moins nationale. Notons également qu'une infection sera indemnisée différemment selon son origine, et qu'un organisme est dédié aux infections nosocomiales : l'office national d'indemnisation des accidents médicaux, des affections iatrogènes et des infections nosocomiales (ONIAM).

1.2 Prévalence des infections nosocomiales en France

En France, depuis 1996 et tous les six ans, une enquête nationale de prévalence des infections nosocomiales est menée, produisant des estimations de la fréquence des infections nosocomiales dans les établissements de santé français. Cette enquête est menée par le réseau d'alerte, d'investigation et de surveillance des infections nosocomiales (Raisin), mise en œuvre par les établissements de santé et les centres de coordination de la lutte contre les infections nosocomiales (CClin), et coordonnée par l'InVS. L'enquête 2012 étant menée à l'heure où ces lignes sont écrites, nous nous reposerons dans ce qui suit sur les résultats de l'enquête menée en 2006 [31].

FIGURE 1.1: Exemple d'évolution de la prévalence, de l'incidence et de la mortalité d'une pathologie [52]



En épidémiologie, la *prévalence* d'une affection est le pourcentage de personnes malades à un instant donné. Il ne faut pas la confondre avec l'*incidence*, qui ne prend en compte que les nouveaux cas sur une période donnée et est utilisée pour évaluer la fréquence et la vitesse d'apparition d'une nouvelle pathologie. La figure (1.1) nous permet d'illustrer ces deux notions. Nous y constatons que l'incidence atteint un maximum à cinq ans, puis décroît. Cela signifie qu'il y a de moins en moins de nouvelles contaminations. La prévalence continue quand à elle de croître jusqu'à quinze ans puisque l'incidence n'est pas nulle, et qu'il continue d'y avoir de nouveaux cas. Cependant, l'incidence diminuant, l'augmentation de la prévalence se fait de moins en moins rapidement. La pente de la courbe décroît et à quinze ans, la prévalence diminue : ceci correspond à la fois à la stabilisation de l'incidence, qui devient constante, aux cas de guérison, et enfin aux décès. Prévalence et incidence sont ainsi deux mesures complémentaires.

La *morbidité* est le nombre de personnes souffrant d'une maladie donnée pendant un temps donné dans une population. L'incidence et la prévalence sont deux façons d'exprimer la morbidité d'une maladie. On parlera alors de morbidité prévalente (nombre de cas à un instant donné) ou de morbidité incidente (nombre de nouveaux cas pendant une période donnée). Il ne faut pas la confondre avec la *mortalité*, qui évalue le nombre de décès. On emploiera le terme *morbi-mortalité* pour parler du taux de mortalité pour une maladie donnée.

Le jour de l'enquête de prévalence des infections nosocomiales menée en 2006 [31], la prévalence des patients infectés était de 4,97 %, soit pratiquement un patient sur vingt (sur un total de 358 353 patients participant à l'enquête), toutes maladies confondues. Ce chiffre est une moyenne, puisque cette prévalence est variable et dépend de nombreux facteurs : l'établissement de santé (activité, taille, localisation, *etc.*), les caractéristiques du patient (âge, sexe, immunodépression, présence d'un dispositif invasif, *etc.*), nature de la pathologie, *etc.*

La survenance d'une infection nosocomiale est souvent liée à la pratique de soins invasifs comme notamment l'utilisation de cathéters, les intubations ou encore les trachéotomies. Par ailleurs, les gestes chirurgicaux les plus invasifs, par exemple la chirurgie orthopédique et en particulier la pose de prothèses, sont les plus fréquemment à l'origine d'une infection. Le risque peut également être lié au traitement lui-même lorsqu'il nécessite une transfusion, une ventilation artificielle ou la prise de médicaments immunosuppresseurs. La présence d'une immunodépression, un mauvais état général du patient, un âge avancé ou une pathologie menaçant le pronostic vital constituent des facteurs de risque majeurs [130]. Notons également que la gravité des infections peut être exacerbée par l'utilisation d'antibiotiques qui sélectionnent des bactéries résistantes aux traitements.

Différents agents pathogènes peuvent être à l'origine d'une infection nosocomiale : une bactérie endogène, lorsque le patient est contaminé par la flore dont il est lui-même porteur ; une bactérie exogène, provenant d'autres malades, du personnel soignant ou de l'environnement, et transmise de manière indirecte (aérosols, manuportage, matériels souillés) ; un virus ; une spore fongique, inhalée ou colonisant une plaie ; *etc.*

Les infections nosocomiales liées à une bactérie endogène sont de loin les plus fréquentes. Trois bactéries portent la responsabilité de plus de la moitié des infections, dans l'ordre : *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* et *Pseudomonas aeruginosa* [31]. Il est à noter que toutes les trois présentent des résistances préoccupantes aux antibiotiques. Les infections nosocomiales virales sont beaucoup moins étudiées que celles dues à des bactéries. On dispose de peu de traitements spécifiques, contrairement aux infections bactériennes pour lesquelles nous disposons d'antibiotiques. Elles sont la plupart du temps bénignes (sauf chez les patients immunodéprimés) et surviennent hors de tout acte médical.

1.3 La transmission aéroportée des agents infectieux

Parmi les mécanismes de transmission des infections nosocomiales, il est habituel d'opposer contaminations manuportées et aéroportées, ces dernières étant les plus difficiles à maîtriser [43]. Une telle distinction n'est cependant pas forcément nécessaire, car une contamination est rarement purement aéroportée ou manuportée, mais souvent mixte, car un contaminant peut être successivement aéroporté, manuporté ou matérioporté.

Sans présager de son importance relative, il est attesté que la voie aérienne joue un rôle non négligeable dans la contamination des patients, et l'aérocontamination de l'environnement hospitalier est aujourd'hui reconnue comme un facteur important dans la survenance des infections [15]. Celle-ci est soumise à de nombreux paramètres, liés notamment à la nature des contaminants, à leur géométrie, masse et granulométrie, qui déterminent le temps qu'un contaminant peut rester en suspension, comme schématisé sur la figure (1.2). Plus les particules sont petites et légères, et plus celles-ci resteront longtemps en suspension dans l'air, sédimenteront lentement, seront sensibles aux mouvements de l'air, et pourront se disséminer loin. De plus, la nature des contaminants et des surfaces qu'ils vont rencontrer aura une influence sur l'adhésion ou non sur ces surfaces, ainsi que sur la possibilité de réenvol depuis ces surfaces.

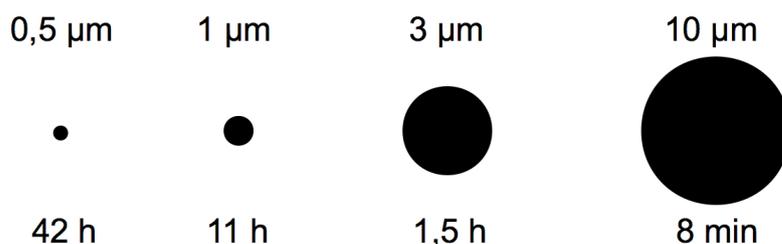


FIGURE 1.2: Vitesses de sédimentation de particules de masse volumique 1 g/cm^3 (comme l'eau) et tombant d'une hauteur de $1,5 \text{ m}$, en fonction de leur diamètre

La transmission aéroportée peut prendre deux formes principales : les microgouttelettes et les aérosols. Les microgouttelettes sont des gouttelettes de salive, appelées également gouttelettes de jaillissement ou *spatter droplets*, produites lors de la parole, de la toux ou de l'éternuement. Leur portée peut atteindre un mètre, distance relativement courte, mais suffisante pour qu'elles se répartissent sur des supports (surfaces, objets, aliments, *etc.*), qui se chargeront de leur dissémination. De nombreuses maladies utilisent ce mode de transmission, parmi lesquelles grippe, rougeole, coqueluche, tuberculose, varicelle, *etc.* Il est aisé de s'en prémunir par le port de masques. On peut évoquer également les gouttelettes de Pflügge, qui sont des gouttelettes liquides et allergènes expulsées de la bouche ou du nez du patient (et pouvant être ou non des gouttelettes de jaillissement) qui, lorsqu'elles s'assèchent, diminuent de volume, se mêlent à des molécules de la poussière aérienne environnante, et peuvent alors, comme les aérosols, rester en suspension dans l'air pendant de longues périodes pour atteindre les voies respiratoires et les poumons d'un sujet présent dans l'environnement.

Un aérosol est un ensemble de particules, solides ou liquides, en suspension dans un milieu gazeux. Les spores fongiques relâchées par des moisissures en sont un excellent exemple, mais on peut également citer les squames, petits morceaux de peau morte se détachant naturellement de l'épiderme. Afin de se prémunir des contaminations par les aérosols, plusieurs types de traitement de l'air peuvent être proposés, allant de la simple filtration à la décontamination, en passant par l'utilisation de flux laminaires et de sas en dépression pour l'accès aux chambres accueillant des patients à risque. Il a été démontré par exemple que la décontamination de l'air par des unités mobiles réduit les taux de concentration de spores fongiques dans l'air ainsi que les contaminations fongiques dans les services équipés [125].

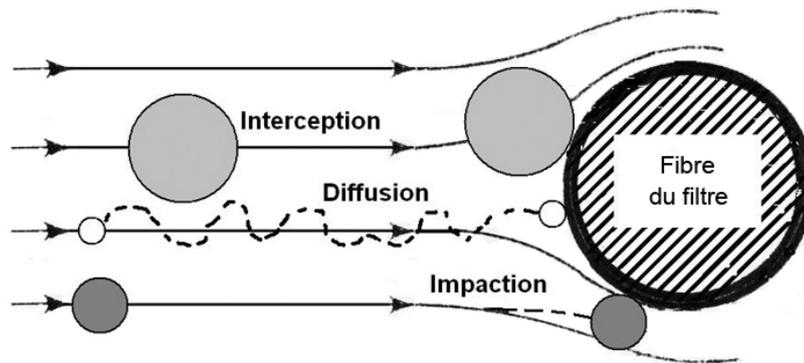


FIGURE 1.3: Trois des six mécanismes de capture d'une particule, ici par les fibres d'un filtre [97]

Les aérosols peuvent pénétrer à l'intérieur du corps humain à travers le nez, la bouche, les yeux (épithélium conjonctif) et l'épiderme. La profondeur de pénétration et le comportement des particules dans notre appareil respiratoire dépend de leurs taille, forme, densité, composition chimique et réactivité. Elles peuvent s'y déposer à la faveur de six mécanismes [53], dont trois sont schématisés sur la figure (1.3) :

- l'interception : la particule se déplace si près de la surface qu'une de ses extrémités entre en contact. Les particules longues et fines comme les fibres d'amiante sont particulièrement sujettes à ce mode de dépôt.
- l'impaction inertielle : les particules ont tendance à suivre les flux d'air, qui contournent les obstacles ; cependant lors d'une variation de trajectoire trop rapide ou d'une particule trop lourde, celles-ci peuvent continuer tout droit et frapper la surface placée sur leur trajectoire.
- la sédimentation gravitationnelle : les particules se déposent sur une surface sous l'effet de leur propre poids.
- la diffusion : le mouvement brownien des particules, dû à leur agitation thermique, engendre leur dépôt au hasard sur les parois des poumons. Les petites particules, d'une taille inférieure à $0,5 \mu\text{m}$, sont particulièrement sujettes à ce mécanisme de déposition, qui domine dans les voies aériennes fines et les alvéoles pulmonaires.
- la précipitation électrostatique : attraction entre les particules et les parois résultant de leur charges électrostatique respectives.
- le tamisage : il se produit lorsqu'une particule est trop grosse pour passer à travers les mailles d'un filtre et y reste bloquée.

L'appareil respiratoire peut être grossièrement divisé en deux parties : la partie supérieure ou nasopharyngale comporte le nez, les voies nasales, la bouche, la gorge et le pharynx ; la partie inférieure commence aux cordes vocales et suit la trachée-artère jusqu'aux alvéoles pulmonaires, en passant par les bronches et les bronchioles. L'appareil respiratoire, ainsi que la profondeur de pénétration des particules en fonction de leur diamètre aérodynamique est schématisé figure (1.4). Le terme *diamètre aérodynamique* n'indique pas que la particule est sphérique, c'est une grandeur équivalente définie comme le diamètre d'une sphère de densité unitaire qui aurait la même vitesse de sédimentation dans l'air que la particule considérée.

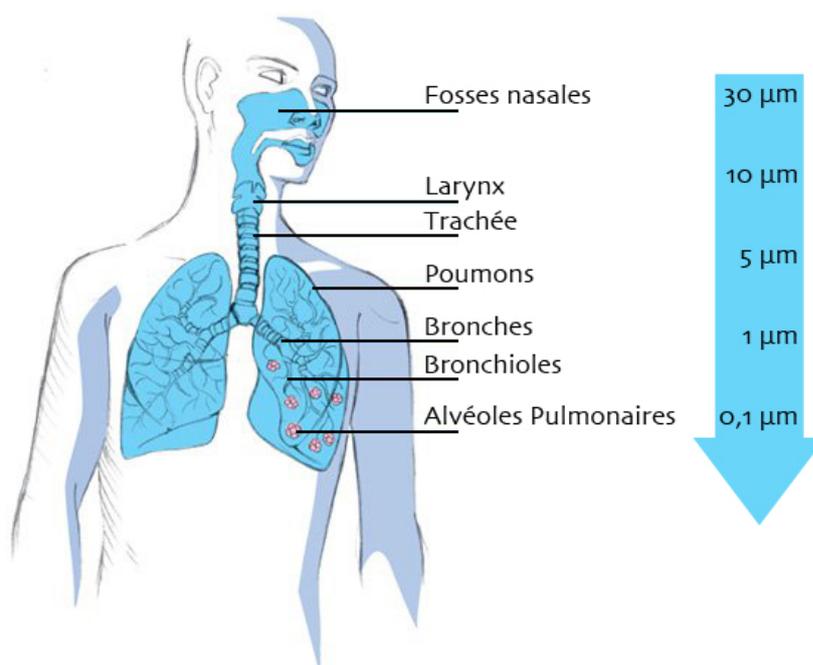


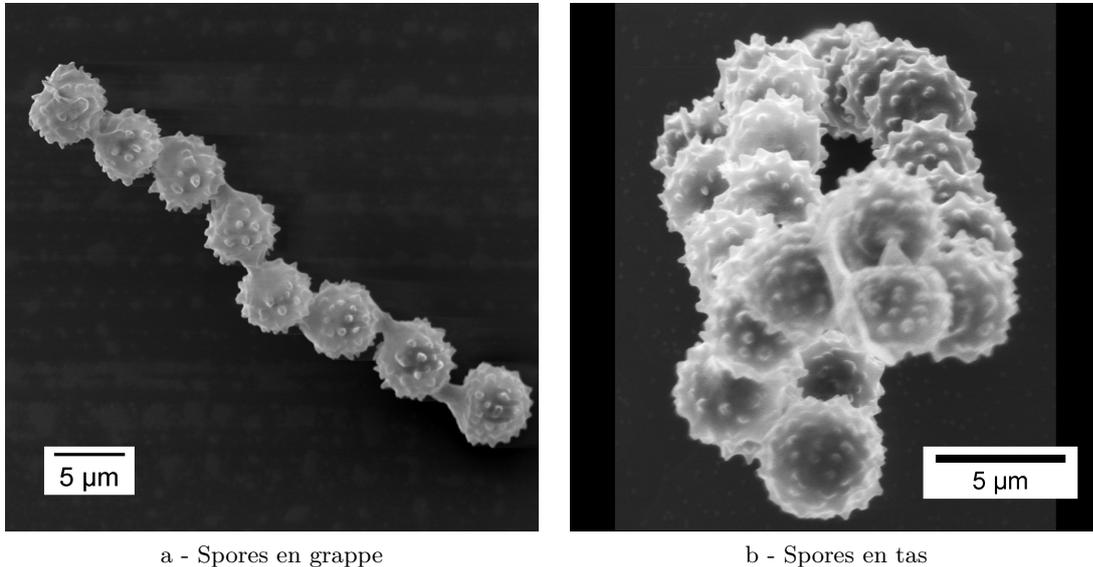
FIGURE 1.4: Lieu préférentiel de dépôt des particules en fonction de leur diamètre. Plus les particules sont fines, plus elles pénètrent profondément dans notre appareil respiratoire [85]

La majorité des particules d'un diamètre aérodynamique supérieur à $10\ \mu\text{m}$, et jusqu'à 80 % des particules d'un diamètre aérodynamique compris entre $5\ \mu\text{m}$ et $10\ \mu\text{m}$ sont capturées par impaction inertielle dans la région nasopharyngale, car c'est la partie de l'appareil respiratoire où le flux d'air est le plus rapide. Les particules ayant un ratio longueur sur diamètre élevé, comme les grappes de spores, voire photo de la figure 1.5.a, y subissent également le mécanisme d'interception. Les particules d'un diamètre aérodynamique compris entre 1 et $5\ \mu\text{m}$ se déposent dans la zone trachéo-bronchique. La vitesse de l'air y est plus faible, permettant un dépôt par sédimentation, directement proportionnel au temps de résidence, ainsi qu'un dépôt par impaction.

La diffusion est le mécanisme dominant pour les particules d'un diamètre inférieur à $1\ \mu\text{m}$. Elle est inversement proportionnelle au diamètre des particules, et secondée par la précipitation électrostatique due aux interactions électrostatiques résultant de la charge des aérosols et des parois alvéolaires. Les particules submicroniques, particulièrement celles d'une taille inférieure à $0,1\ \mu\text{m}$, pénètrent profondément dans les poumons et ne se déposent qu'à la faveur du mécanisme de diffusion [53]

La transmission aéroportée des agents infectieux fait de la qualité de l'air intérieur une composante à prendre en compte dans le cadre de la lutte contre les infections nosocomiales, d'autant que de nombreuses études montrent que le contrôle de la qualité de l'air permet de réduire l'incidence de certaines maladies aérotransmises, notamment d'origine fongique [11, 125, 102].

FIGURE 1.5: Spores d'*Aspergillus niger*, aérosolisées par soufflage sur des cultures sur gélose, et sédimentées naturellement, observées au microscope électronique à balayage (grossissement $\times 10\,000$) [93]



1.4 Les patients immunodéprimés

L'immunodépression caractérise un état dans lequel une personne présente une déficience de ses défenses immunitaires, favorisant le développement de micro-organismes ordinairement non-pathogènes, qui deviennent alors responsables de maladies dites opportunistes. Cet état est également responsable d'une plus grande fréquence et d'une plus grande gravité des infections par les agents pathogènes.

Outre les immunodéficiences innées congénitales, les causes de l'immunodépression, lorsqu'elle est acquise, sont multiples et souvent associées. Parmi elles :

- *les causes iatrogènes* (dues aux médicaments), en particulier les traitements immunosuppresseurs utilisés pour la chimiothérapie des affections malignes et en transplantation. Ces médicaments sont de plusieurs types : les médicaments cytotoxiques, avec un effet secondaire sur la moelle osseuse et un risque de neutropénie secondaire (forte diminution du nombre de globules blancs) ou d'aplasie médullaire (très forte diminution de la production par la moelle osseuse de toutes les cellules souches du sang) ; les immunosuppresseurs, ou immunomodulateurs, par un effet direct sur les cellules de l'immunité. Dans ce dernier groupe, on retrouve les corticoïdes, très largement utilisés pour de nombreux traitements et dont les effets secondaires sur l'immunité sont importants lorsqu'ils sont administrés à forte dose et de façon prolongée
- *l'irradiation*, couramment utilisée dans le traitement des cancers et des affections hématologiques malignes, en complément de la chimiothérapie et de la corticothérapie. Les affections malignes, en particulier celles qui touchent les cellules sanguines (leucémie) et celles de l'immunité (lymphomes) nécessitent parfois des irradiations étendues sources d'immu-

nosuppression par atteinte des cellules de la moelle osseuse.

- *les infections virales* et tout particulièrement l'infection par le virus de l'immunodéficience humaine (VIH) responsable du syndrome d'immunodéficience acquise (SIDA)

Le principal risque pour le patient immunodéprimé est le risque infectieux. En cas d'infection bactérienne avérée et exceptionnellement de manière préventive, cela justifie l'utilisation d'une antibiothérapie [111]. Celle-ci peut cependant favoriser l'apparition d'infections fongiques (candidoses notamment), pour lesquelles les antibiotiques ne sont pas efficaces et qui les sélectionnent. Cela montre bien la fragilité de ces patients et l'intrication des risques liés à la pathologie elle-même et à son traitement. Parmi les infections les plus graves pouvant survenir chez les immunodéprimés, les infections fongiques profondes ont une place toute particulière, en raison des difficultés de leur diagnostic et de leur traitement [47]. L'arsenal médicamenteux antifongique reste encore limité et ne permet pas le contrôle d'une infection fongique invasive même si le diagnostic a été réalisé très précocement, ce qui n'est malheureusement pas toujours le cas. Il en résulte une très forte morbi-mortalité, en particulier pour les infections dues à des champignons filamenteux (ou moisissures, par opposition aux levures), au premier rang desquelles figure *Aspergillus*.

1.5 Cas particulier du grand brûlé

Le terme grand brûlé n'a pas de définition médicale précise mais désigne les cas de brûlures considérées comme graves, menaçant le pronostic vital en raison de leur étendue, de leur profondeur ou de leur localisation. On considère qu'un brûlé de plus de 30 % de la surface corporelle est toujours un grand brûlé. Néanmoins, un brûlé peut être grave avec une surface plus réduite notamment en cas de tares associées : la présence d'une ou plusieurs pathologies associées (insuffisance respiratoire ou cardiaque, diabète...) aggrave en effet considérablement le pronostic. L'âge est aussi un facteur très important du pronostic. L'indice de Baux, consistant à additionner l'âge et le pourcentage de surface corporelle brûlée, illustre ce dernier point [9]. Lorsque l'indice est supérieur à 100, le risque vital est très élevé. La brûlure pulmonaire aggrave à elle seule énormément le pronostic.

L'évaluation de la surface d'une brûlure fait aujourd'hui l'objet de méthodes tendant à la rendre la plus précise possible. On peut citer à titre d'exemple le tableau (1.1) proposé par la société française d'étude et de traitement des brûlures :

La profondeur joue en outre un rôle décisionnel dans l'élaboration des modalités thérapeutiques de prise en charge. Si sa définition est clinique et histologique (l'histologie est l'étude des tissus biologiques), l'évaluation de la profondeur d'une brûlure est essentiellement clinique. Le diagnostic est difficile car l'aspect clinique est souvent polymorphe et sujet à des variations dans les quarante-huit premières heures qui suivent le traumatisme. L'évaluation de la profondeur est également rendue difficile par le caractère rarement homogène des brûlures et l'association de « mosaïques » de brûlures de profondeurs différentes au sein d'une même localisation. La nature de l'agent causal et les circonstances de survenue sont une aide non négligeable pour l'établissement du diagnostic de profondeur [120]. Il est habituel de classer la profondeur des brûlures en degrés, en se basant sur l'aspect des lésions.

- Une brûlure du premier degré est une atteinte superficielle épidermique, dont l'aspect clinique est une lésion érythémateuse douloureuse. Elle guérit sans cicatrice en 4 à 5 jours après desquamation.

Tableau 1.1: Détermination de la surface brûlée [120]

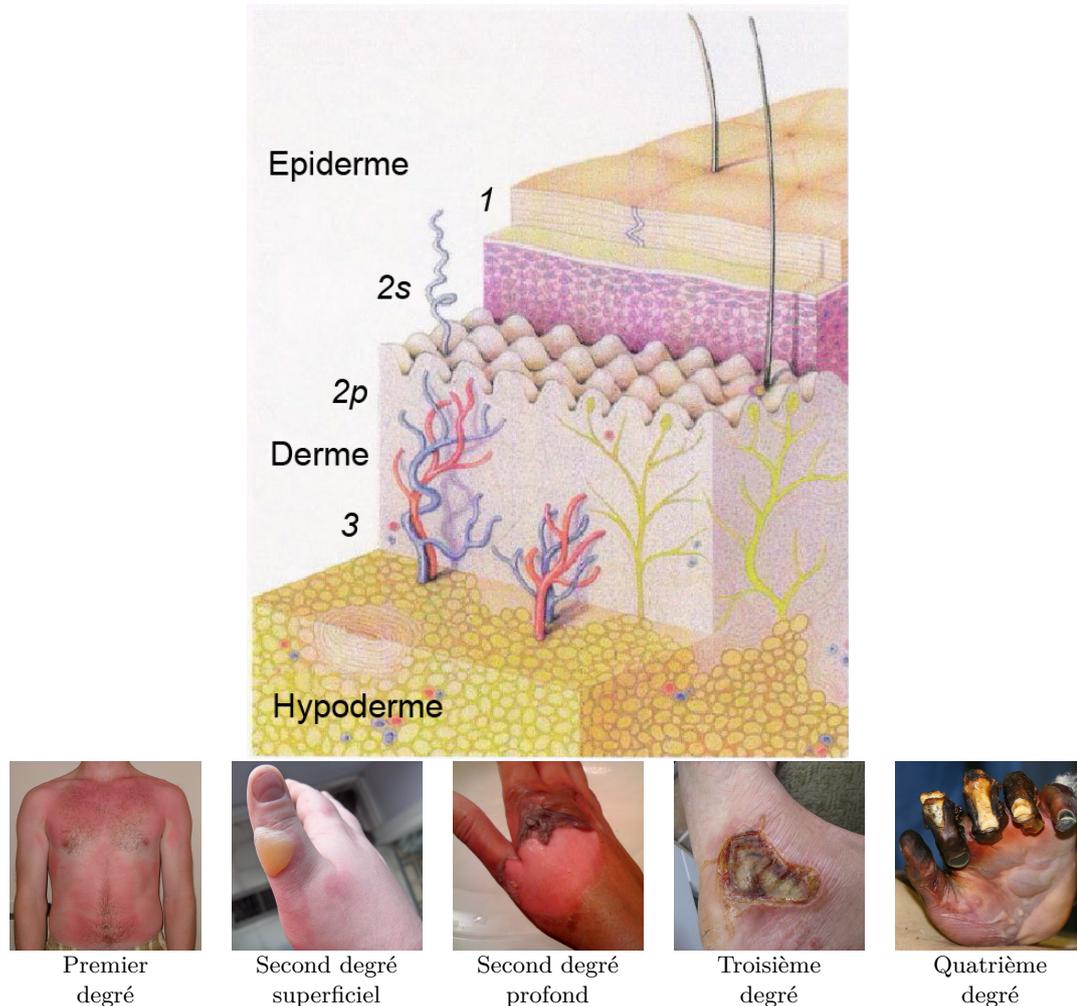
Localisation / Âge	0 - 1 an	1 - 4 ans	5 - 9 ans	10 - 15 ans	Adulte
Tête	19 %	17 %	13 %	10 %	7 %
Cou	2 %	2 %	2 %	2 %	2 %
Tronc ant. ou post.	13 %	13 %	13 %	13 %	13 %
Fesse (chaque)	2,5 %	2,5 %	2,5 %	2,5 %	2,5 %
Organe génital	1 %	1 %	1 %	1 %	1 %
Bras (chaque)	4 %	4 %	4 %	4 %	4 %
Avant-bras (chaque)	3 %	3 %	3 %	3 %	3 %
Main (chaque)	2,5 %	2,5 %	2,5 %	2,5 %	2,5 %
Cuisse	5,5 %	6,5 %	8,5 %	8,5 %	9,5 %
Jambe	5 %	5 %	5,5 %	6 %	7 %
Pied	3,5 %	3,5 %	3,5 %	3,5 %	3,5 %

- Une brûlure du deuxième degré superficiel atteint la totalité de l'épiderme et une partie du derme papillaire. L'aspect clinique présente des phlyctènes (cloques) à fond rose ou rouge et à parois épaisses suintantes, intensément douloureux, avec saignements à la scarification. Elle guérit sans cicatrice en 10 à 14 jours, mais des dyschromies résiduelles sont possibles.
- Une brûlure du deuxième degré profond détruit la totalité de l'épiderme et atteint le derme réticulaire. L'aspect clinique présente des phlyctènes à fond rouge brun, quelques zones blanchâtres et une anesthésie partielle. En l'absence d'infection, la guérison est lente (de 21 à 35 jours), et des cicatrices majeures peuvent subsister en cas d'infection. Une telle brûlure peut nécessiter une greffe de peau.
- Une brûlure du troisième degré détruit totalement l'épiderme et atteint profondément le derme, voire parfois l'hypoderme. L'aspect clinique présente des colorations variables, blanches, brunes ou noires. La lésion est sèche, insensible et sujette aux infections. On constate l'absence de blanchiment à la pression et de saignement à la scarification, et une anesthésie à la pique. La greffe de peau est indispensable à la cicatrisation.
- On distingue parfois la brûlure du quatrième degré, ou carbonisations, lorsqu'elle atteint les structures sous-cutanées (os et muscles). Le traitement chirurgical doit alors réséquer (retirer) toutes les structures détruites par la brûlure avant d'envisager la chirurgie reconstructrice.

Il existe de nombreuses étiologies de brûlures, qui, en fonction de leur cause, ne vont pas occasionner le même type de lésions, et nécessitent des traitements adaptés :

- les brûlures thermiques sont externes (cutanées) mais peuvent aussi atteindre les voies respiratoires par inspiration de l'air chaud.
- les brûlures électriques, par passage du courant électrique dans le corps ou sur la peau. On voit fréquemment dans ce cas une brûlure au point d'entrée et une autre au point de sortie. Le courant électrique perturbe le fonctionnement du système nerveux et du coeur, et détruit les cellules au sein des tissus. Le retentissement systémique de la brûlure dépend du voltage : si celui-ci est bas (inférieur à 1 000 volts), le risque cardiovasculaire immédiat domine. Si le voltage est haut, les brûlures sont sévères, profondes et étendues. Les brûlures par arc électrique, sans passage de courant électrique dans le corps, sont par contre comparables aux brûlures thermiques.
- les brûlures caustiques, causées par le contact avec la peau d'un produit chimique. Une telle brûlure peut également causer une intoxication par passage chimique transcutané ou

FIGURE 1.6: Différents degrés de brûlure [136]



par inhalation concomitante.

- les brûlures par irradiation
- les brûlures photochimiques : la sève de certaines plantes peut, sous l'action de la lumière, occasionner de graves brûlures.
- les gelures, qui ne sont pas à proprement parler des brûlures

Les conséquences de la brûlure sont multiples au niveau local et général. Ainsi, une brûlure thermique profonde et étendue est suivie dans sa phase précoce (premières 48 h) d'une réaction inflammatoire massive de l'organisme. La brûlure provoque également une fuite massive de liquides suintement au niveau des brûlures (perte par les vaisseaux sanguins) mais aussi par la constitution d'un œdème important, tant au niveau des tissus brûlés que des tissus sains. Ces phénomènes peuvent parfois mener à un état de choc hypovolémique (perte massive du volume sanguin circulant). Le poumon, le cœur, le cerveau, le foie et plus généralement tous les or-

ganes sont atteints, à cause de l'action des médiateurs de l'inflammation. Ainsi, ces phénomènes peuvent être responsables d'une ischémie rénale (insuffisance rénale aiguë), cutanée (aggravation des lésions) et gastrique (hémorragies digestives). Le système immunitaire est progressivement affaibli car il est détourné vers l'inflammation massive et désordonnée, au détriment de la défense de l'organisme.

La phase secondaire commence à partir du troisième jour et dure jusqu'au recouvrement complet des surfaces brûlées. Durant cette phase peuvent apparaître les problèmes d'infection des zones brûlées, mais aussi au niveau pulmonaire et des cathéters, qui sont favorisées par une dénutrition et une immunosuppression sévères. Privé de peau, le brûlé n'est plus capable de réguler sa température corporelle, ce qui entraîne un hypermétabolisme, c'est à dire une dépense énergétique accrue, accentuée notamment par la douleur et d'autres facteurs. Dénutrition et immunodépression en sont les conséquences directes [46].

L'infection est une cause majeure de mortalité dans les services de brûlés. L'atmosphère chaude et humide dans laquelle le patient fragilisé doit être maintenu joue en cela un rôle, puisqu'elle est propice au développement d'espèces fongiques pour lesquelles le brûlé constitue malheureusement un substrat idéal. De plus, certains antiseptiques, de même que certains analgésiques opiacés, ainsi que différents anesthésiques et certains antibiotiques administrés à forte dose, sont responsables de perturbations immunitaires [48]. Le poumon est par ailleurs une cible privilégiée de l'infection.

Le grand brûlé est à la fois immunodéprimé et source de germes pathogènes. Cette situation nécessite une vigilance extrême. Il faut s'assurer que le patient, qui est par définition qualifié de nosocomial, puisqu'il s'auto-contamine systématiquement avec sa propre flore bactérienne :

- ne contamine pas et ne soit pas contaminé par d'autres patients du même service
- ne soit pas contaminé par des agents pathogènes présents dans l'air de la chambre

Il est donc nécessaire de contrôler les flux et la qualité de l'air de la chambre, par exemple en le décontaminant, en limitant les dysfonctionnements aérauliques de la zone protégée pour y empêcher tout risque d'intrusion de contaminant, et en intercalant un sas en dépression entre la chambre et le couloir, afin qu'aucun germe ne puisse y entrer ni en sortir.

Chapitre 2

Aspergillus et le règne fongique

2.1 Le règne fongique

La taxinomie est la science qui a pour objet de décrire les organismes vivants et de les regrouper en entités appelées taxons, afin de les identifier, de les nommer, et enfin de les classer. Ces classements ne sont pas figés et évoluent en permanence. Dans les taxinomies classiques, le plus haut niveau de classification des êtres vivants s'appelle un *règne* (bien que de nouvelles classifications aient été proposées depuis, plaçant le règne au deuxième rang [139, 28]). La classification la plus classique, proposée par Carl Woese en 1977 [138] comporte six règnes, parmi lesquels les végétaux et les animaux, mais aussi les bactéries et les mycètes.

Le règne des mycètes, aussi appelé Fungi, constitue un taxon regroupant les organismes plus communément appelés champignons, dont environ 90 000 espèces ont été décrites à ce jour, mais dont le nombre est estimé proche de 5 millions [17]. À ce titre, les champignons ne sont pas des plantes et forment un règne à part. Ce que nous désignons habituellement par le terme champignon, constitué d'un pied et d'un chapeau, constitue en réalité l'appareil reproducteur de certains d'entre eux. Le reste du champignon est souterrain, et cette partie invisible est appelée le mycélium. Elle est composée d'un ensemble de filaments plus ou moins ramifiés.

Contrairement aux végétaux, qui sont capables de fixer directement le gaz carbonique de l'air grâce au mécanisme de photosynthèse, les champignons doivent trouver le carbone nécessaire à leur vie dans leur environnement immédiat, sous forme de matières organiques. Pour cela, ils peuvent, en fonction des espèces, recourir à différents modes de nutrition :

- le saprophytisme : ils se nourrissent de matière organique morte ou en décomposition. Ils participent ainsi au recyclage de la matière organique en mettant à la disposition des autres organismes des éléments minéraux essentiels de nouveau assimilables
- la symbiose : la plupart des plantes vertes vivent en symbiose avec des champignons du sol, formant une association symbiotique appelée mycorhize. La partie visible d'une forêt, constituée par les plantes, ne pourrait exister sans sa partie invisible et souterraine constituée par les champignons. Ces derniers aident les plantes à absorber eau et sels minéraux, et ils sont approvisionnés en retour en glucides produits par la photosynthèse. C'est un bénéfice mutuel
- le commensalisme : un champignon commensal tire profit de son hôte sans lui nuire mais sans lui apporter d'avantages.

- le parasitisme : les champignons parasites tirent parti de leur hôte aux dépens de ce dernier. Souvent pathogènes, ils provoquent des maladies et entraînent parfois la mort de leurs hôtes. Par exemple, le mildiou et la rouille chez les végétaux.

La reproduction des champignons est tantôt asexuée, tantôt sexuée, au moyen de cellules spéciales, les spores. Ces dernières peuvent donner naissance à un nouvel individu sans fécondation. Les spores de champignons peuvent survivre pendant de longues périodes, même dans des conditions défavorables.

2.2 *Aspergillus*

Aspergillus est un champignon filamenteux, de type moisissure, dont les colonies se présentent sous forme duveteuse. Il se développe sur les matières organiques en décomposition, dans le sol, le compost, les denrées alimentaires, les céréales. Ses spores sont ubiquitaires et cosmopolites : on en trouve dans toutes les parties du monde, jusqu'en Antarctique [41]. Leur concentration usuelle est de l'ordre de une à cent spores par mètre cube [81], mais fluctue considérablement en fonction des régions et des saisons. Nous inhalons quotidiennement et constamment des spores d'*Aspergillus*. On en répertorie des centaines d'espèces, leur nombre approximatif variant de 185 [135] à 300 [7] selon les sources.

Le genre *Aspergillus* a été décrit pour la première fois par le botaniste et mycologue italien Pier Antonio Micheli (1679-1737), dans un ouvrage publié en 1729 où il décrit près de 900 espèces de plantes et de champignons, *Nova plantarum genera*. Pour l'anecdote, il y observa notamment que les espèces fongiques n'apparaissent pas par génération spontanée. *Aspergillus* est très utilisé dans l'industrie agro-alimentaire : par exemple, *Aspergillus flavus* var. *oryzae* est utilisé comme agent de fermentation dans la fabrication du *kōji* du saké japonais et du *kōji* du miso (le *kōji* est une sorte de levure de riz, qui sert de moût d'amorçage) ; *Aspergillus sojae* est utilisé quand à lui pour la fabrication du *kōji* de la sauce de soja. D'autres espèces sont également utilisées dans l'industrie des biotechnologies pour la fabrication d'enzymes et d'antimicrobiens.

Parmi les centaines d'espèces d'*Aspergillus* recensées, au moins une vingtaine ont été impliquées en pathologie humaine. Parmi celles-ci, *Aspergillus fumigatus* est responsable de la majorité des infections fongiques aspergillaires chez l'homme. Il a été identifiée pour la première fois en 1863 par le médecin et botaniste allemand Johann Baptist Georg Wolfgang Fresenius (1808-1866). Il est très commun, et peut être isolé depuis des environnements très divers : air, sol, sable des plages, marais et mangroves, plantes en pots, compost, excréments d'animaux, fourrage, denrées alimentaires (poivre et épices notamment). Il vit dans le sol et les matières organiques en décomposition, mais aussi sur de nombreux substrats tels que les produits alimentaires, les poussières, l'intérieur des conduits d'aération et les systèmes d'air conditionné. Il est très présent en milieu rural et dans l'habitat : celliers, pièces humides ou mal ventilées, terre des plantes en pots, *etc.* Il est à noter que la fumée non filtrée de marijuana peut contenir des quantités de spores substantielles [41]. C'est également un allergène.

Présent en abondance dans le sol et les végétaux en décomposition, *Aspergillus flavus* est la deuxième espèce responsable d'infections chez l'homme avec environ 15 % des isolats cliniques d'*Aspergillus* en laboratoire de mycologie [44]. Il produit des mycotoxines, les aflatoxines, reconnues comme étant les plus puissants cancérigènes naturels [95]. Les principaux produits dans

lesquels les aflatoxines sont retrouvées sont le maïs, le coton, les haricots, le sorgho, l'arachide, le blé et d'autres graines diverses.

Aspergillus niger est l'une des espèces les plus communes dans l'environnement (sol, plantes, aliments) et représente 5 % des isolats aspergillaires en laboratoire [44]. Il s'agit du principal agent des otomycoses (affections de l'oreille dues à un champignon). Il est également responsable d'aspergillomes et est la troisième espèce retrouvée dans l'aspergillose invasive. Il est responsable de la dégradation de certains fruits et légumes (voir figure 2.1).

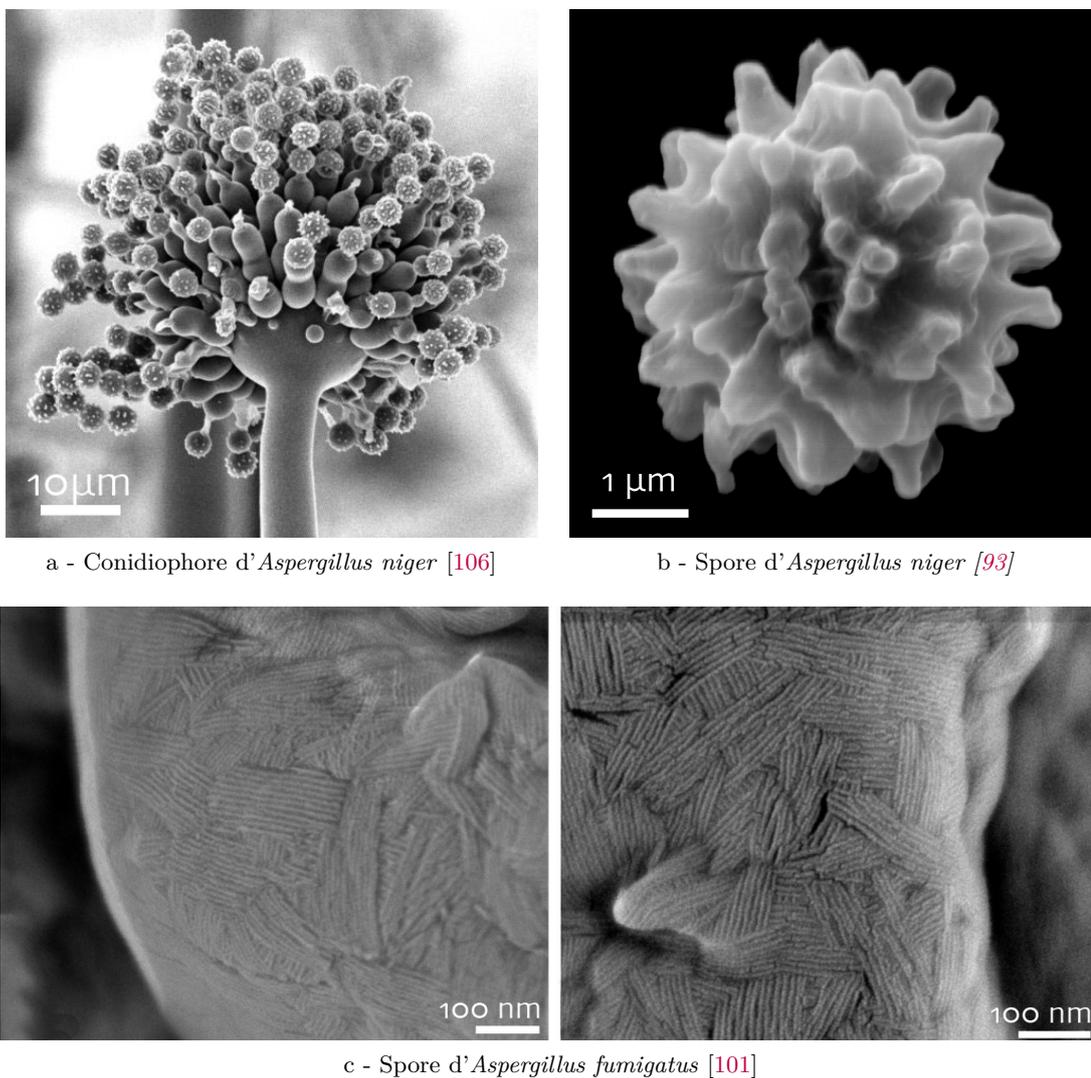
FIGURE 2.1: Dégradation de fruits et légumes par *Aspergillus niger*



Aspergillus nidulans est retrouvé dans la matière organique en décomposition. Il est isolé dans un faible pourcentage des infections cliniques aspergillaires. *Aspergillus versicolor* est fréquemment retrouvé dans le sol, le foin, le coton et les produits laitiers. Il n'est qu'occasionnellement pathogène, mais peut produire des toxines capables d'induire des diarrhées. Il est aussi mentionné pour être un carcinogène hépatique et rénal, ainsi qu'un agent d'onychomycose. *Aspergillus terreus* est retrouvé dans le sol et les eaux stagnantes, et peut représenter jusqu'à 5 % des isolats aspergillaires cliniques en laboratoire de mycologie. *Aspergillus glaucus* est très fréquent dans l'environnement, notamment dans le sol, sur les substances végétales ou animales en décomposition. Il peut être retrouvé à la surface des confitures, sur les cuirs de chaussures ou les vêtements ayant séjourné dans des placards humides. *Aspergillus ustus* est retrouvé dans la matière végétale en décomposition. Il n'a que peu d'impact en clinique. *Aspergillus clavatus* a une distribution tropicale, subtropicale et méditerranéenne. Il est isolé du sol sous de nombreuses cultures (coton, patate douce, riz, canne à sucre, bananier, etc.) et est présent sur de nombreux produits alimentaires en stockage (riz, farine, arachide, fruits déshydratés...). Il peut apparaître lors du maltage et être alors allergénique (maladie du poumon des ouvriers de malterie) [8].

Les spores d'*Aspergillus* ont une forme grossièrement sphérique, d'un diamètre moyen de $3,5 \mu\text{m}$. Leur géométrie varie en fonction des espèces : les spores d'*A. niger* possèdent par exemple une surface zébrée de circonvolutions sinueuses (figure 2.2.a et b) alors que les spores d'*A. fumigatus* sont recouvertes de petites structures en forme de bâtonnets organisés en réseaux serrés, appelés rodlets (figure 2.2.c)

FIGURE 2.2: Observations au microscope électronique à balayage



En France, *Aspergillus* est l'un des genres les plus fréquemment rencontrés dans l'air extérieur, ainsi que dans l'air des hôpitaux. Les autres genres de champignons habituellement retrouvés dans l'air sont *Cladosporium* et *Penicillium* [118] :

- La plupart des *Cladosporium* ne sont pas pathogènes pour l'homme, mais quelques espèces se distinguent par leur capacité à causer des infections fongiques de la peau et des ongles, des sinusites et, plus rarement, des infections pulmonaires. Les spores de plusieurs espèces de *Cladosporium*, quand elles sont inhalées en suspension dans l'air, sont d'importants allergènes. En grandes quantités, elles peuvent gravement affecter les asthmatiques et les personnes souffrant d'affections respiratoires chroniques. Les espèces connues de *Cladosporium* ne sont pas réputées produire de mycotoxines préoccupantes pour l'homme, mais produisent des composés organiques volatils (COV) associés à des odeurs perçues comme

désagréables.

- Le genre *Penicillium* ne comprend quand à lui pratiquement aucune espèce pathogène. Certaines espèces sont responsables de la pourriture des fruits (*Penicillium expansum*, *Penicillium digitatum*), et d'autres sont utilisées industriellement pour la synthèse de la pénicilline (*Penicillium chrysogenum*, *Penicillium notatum*) et la fabrications de fromages (*Penicillium camembertii*, *Penicillium roqueforti*). Deux espèces, *Penicillium griseofulvum* et *Penicillium expansum* sont capables de produire de la patuline, mycotoxine neurotoxique. La seule espèce pathogène connue à ce jour est *Penicillium marneffeii*, provoquant des infections disséminées relativement fréquentes et redoutables en Asie du Sud-Est chez les patients infectés par le VIH.

D'autres genres et espèces fongiques peuvent être retrouvés dans l'air, mais en moindres quantités, parmi lesquels *Alternaria sp.*, *Trichoderma sp.*, *Chrysonilia Sitophila*, *Mucor sp.*, *Paecilomyces sp.* À l'exception de *Paecilomyces sp.*, incriminé dans des infections à caractère invasif [99, 29], ces espèces ne sont pas réputées pathogènes pour l'homme, tout au plus allergènes.

2.3 Pouvoir pathogène des *Aspergillus*

Les moisissures sont des organismes peu virulents mais très opportunistes. Les espèces du genre *Aspergillus* ne deviennent pathogènes que dans certaines conditions très particulières où elles profitent d'une défaillance des systèmes de défense de l'hôte pour l'infecter [81]. *Aspergillus fumigatus* est à ce titre l'*Aspergillus* le plus impliqué en pathologie humaine : Il est en cause dans environ deux tiers des infections fongiques aspergillaires chez l'homme et de 80 % des cas documentés d'infection invasive [44, 8]. Il est aussi connu pour sa capacité à se développer sous la forme de truffes aspergillaires, sans invasion réelle des tissus. Mais comme nous l'avons vu précédemment, d'autres espèces sont également incriminées dans les manifestations pathologiques : *Aspergillus flavus*, *niger*, *nidulans*, *terreus*, *versicolor*, etc.

La plupart des espèces d'*Aspergillus* sont incapables de se développer à 37° C et cette caractéristique fondamentale distingue les espèces inoffensives des espèces pathogènes. Parmi celles qui en sont capables, la plus rapide à croître est *Aspergillus fumigatus*, ce qui explique qu'on la retrouve si souvent impliquée : ses hyphes (filament constituant le mycélium) poussent à une vitesse comprise entre 1 cm/h et 2 cm/h [96]. Il est thermotolérant, capable de croître au-delà de 40° C, et de survivre jusqu'à 70° C. D'autres caractéristiques participent au pouvoir pathogène de cette espèce [41, 12, 104] :

- la petite taille des spores ainsi que leur hydrophobicité [101] facilitent leur mise en suspension dans l'air
- la petite taille des spores leur permet également de pénétrer les poumons profondément
- les hydrophobines présentes à la surface des spores empêchent leur reconnaissance par le système immunitaire [3]
- le tropisme vasculaire des spores, c'est à dire leur capacité à atteindre les vaisseaux sanguins, leur permet de se disséminer dans l'organisme
- la production de mycotoxines impliquées dans des processus de sensibilisation est responsable de manifestations allergiques

De nombreux sites d'infections ont été décrits, comme la peau, le péritoine, les reins, les os, les yeux et l'appareil digestif. Cependant, chez la plupart des patients, l'appareil respiratoire, qui est la principale porte d'entrée des spores, reste la zone d'infection majoritaire.

Les sujets immunocompétents développent très rarement des pathologies pulmonaires aspergillaires. L'inhalation de spores d'*Aspergillus* est la plupart du temps sans conséquences car le système immunitaire élimine les spores et empêche leur croissance. Cependant, le tabac, une infection par d'autres agents pathogènes (virus, bactéries), une fibrose pulmonaire ou d'autres antécédents bronchopulmonaires (mucoviscidose, sarcoïdose, broncho-pneumopathie chronique obstructive) peuvent altérer le tapis mucociliaire et créer des lésions des cellules épithéliales des muqueuses. Ces lésions favoriseraient l'adhésion des spores, pouvant mener à des pathologies sévères comme l'aspergillose bronchopulmonaire allergique (ABPA) ou encore l'aspergillome, développement d'une masse fongique localisée, dite truffe aspergillaire, dans une cavité pulmonaire préexistante, comme celles laissées par la tuberculose. Une exposition répétée à des spores ou à des antigènes d'*Aspergillus* peut également être responsable de pathologies allergiques bénignes, incluant l'asthme, la sinusite allergique et l'alvéolite. Ces pathologies n'impliquent pas de croissance fongique dans le corps du patient, et il suffit en général de supprimer le facteur environnemental pour que les symptômes s'estompent.

2.4 Le risque aspergillaire chez les patients immunodéprimés

C'est en 1847 que le premier cas de pneumopathie humaine associée à *Aspergillus* est décrit, par Theodor Sluyter (1817-1895), dans le cadre de sa thèse de médecine. Il s'agissait vraisemblablement d'une aspergillose pulmonaire invasive (API). Dans les années 1970, les premières grandes séries d'API sont décrites [142], en relation avec l'augmentation croissante des thérapeutiques immunosuppressives pour les traitements des leucémies et pour les transplantations.

L'API est la forme clinique la plus sévère d'aspergillose. Elle consiste en l'invasion du tissu pulmonaire, puis en la diffusion par voie sanguine du champignon à partir du foyer pulmonaire (figure 2.3). Après le poumon, le cerveau est l'organe le plus fréquemment atteint mais la peau, le rein, la thyroïde, les os, le cœur et les yeux peuvent être touchés également [109]. Elle est de très mauvais pronostic, d'une part parce qu'elle touche des patients sévèrement immunodéprimés [55, 25, 124, 35], et d'autre part parce que son diagnostic est souvent tardif. Les taux de mortalité rapportés varient de 28 % à 100 % selon les sources [80, 7, 55]. C'est aujourd'hui une pathologie directement responsable de la mort de patients leucémiques, et de l'échec de traitements chimiothérapeutiques. C'est également une cause principale de décès chez les greffés de moelle osseuse. L'API implique de plus des coûts hospitaliers de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers d'euros par traitement [40, 143, 110].

Le risque aspergillaire, et en particulier l'API, constitue un problème de santé publique important : *Aspergillus* est progressivement devenu l'un des pathogènes fongiques les plus prévalents, responsable en 1992 de 30 % des infections fongiques chez les patients cancéreux [126, 81]. La même année, il est estimé que 10 % à 25 % des patients leucémiques ont développé une API. Ces dernières sont récemment devenues la première cause de mortalité d'origine infectieuse dans les services d'hématologie et de greffe de moelle osseuse [15, 44]. Durant les trois dernières décennies, l'incidence des API chez les patients immunodéprimés a significativement augmenté [129, 75], ce qui a été confirmé par de nombreuses études récentes [78, 27, 115].

Le facteur favorisant majeur est la neutropénie (taux bas de globules blancs) profonde et prolongée, mais d'autres immunosuppressions profondes peuvent également favoriser une API. Plusieurs catégories de patients sont considérées à haut risque : principalement les patients

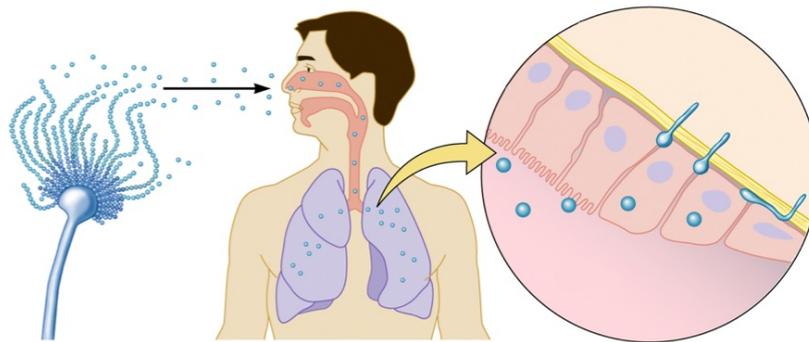


FIGURE 2.3: Représentation schématique de l'infection par les spores aspergillaires avec inhalation puis germination des spores au niveau alvéolaire [38]

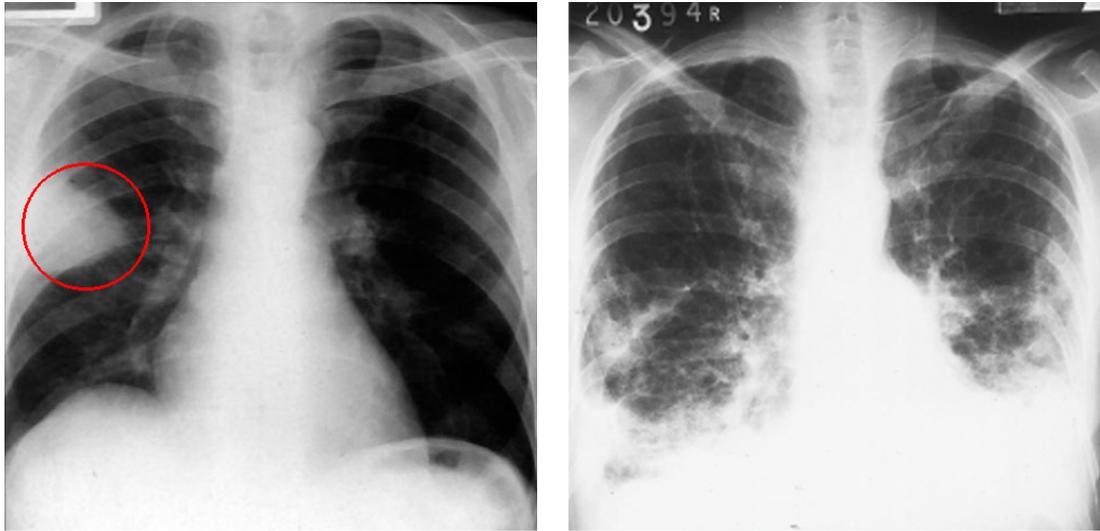
atteints d'hémopathie maligne, les transplantés de moelle et d'organes solides (en particulier du cœur et du poumon), les patients atteints de SIDA en phase terminale, les patients sous corticothérapie ou chimiothérapie prolongée, les grands brûlés, et les patients atteints de déficit immunitaire congénital.

Le problème majeur de l'API est de porter le diagnostic suffisamment tôt pour espérer améliorer son pronostic. Les signes cliniques sont peu évocateurs car non-spécifiques et se restreignent souvent à une fièvre et parfois à une douleur thoracique. L'imagerie médicale est souvent difficile à interpréter et les signes pas toujours spécifiques d'une API (voir figure 2.4). Les hémocultures ne sont pratiquement jamais positives et l'isolement du champignon dans les prélèvements respiratoires est peu sensible et souvent tardif. La recherche d'antigène circulant apporte de forts arguments de présomption mais la seule méthode qui prouve l'API est la biopsie qui n'est qu'exceptionnellement pratiquée car souvent contre indiquée.

L'incidence de l'API a longtemps été difficile à établir et sous-estimée pour diverses raisons, parmi lesquelles la difficulté de diagnostic à partir de cultures d'*Aspergillus*, le fait que peu d'institutions procèdent à des autopsies de façon systématique, alors que c'est dans certains cas l'unique façon d'établir le diagnostic avec certitude, et enfin les signes radiologiques difficiles à interpréter [91, 24, 41, 18]. Quatre études récentes, publiées entre 2005 et 2011, se sont penchées sur le cas particulier des patients ayant subi une transplantation du poumon, et ont situé l'incidence pour cette population particulière entre 1 % [100, 76] et 5 % [88, 55]. Les données épidémiologiques les plus récentes ont à notre connaissance été publiées en 2011 et sont issues d'une étude ayant eu lieu entre 2005 et 2007 en France [86]. Cette dernière porte sur 424 cas d'API probable, soit une incidence médiane par hôpital de 0,271 cas pour mille. Parmi les 393 adultes, 35 % présentaient une leucémie aiguë, 22 % un syndrome lymphoprolifératif chronique, 21 % avaient reçu une allogreffe de cellules souches, 9 % une transplantation d'organe solide, 5 % souffraient d'une maladie systémique nécessitant l'administration de fortes doses de corticoïdes, 4 % d'une tumeur solide, et enfin 2 % d'une pathologie respiratoire chronique.

L'augmentation de l'incidence de l'API, et plus généralement des pathologies fongiques invasives, s'explique en partie par le fait que la population à risque augmente constamment. C'est une conséquence directe des progrès de la médecine dans les domaines de la cancérologie et des

FIGURE 2.4: Radiographies de poumons présentant des infections aspergillaires [41]



a - Présence d'une truffe aspergillaire chez un patient avec un antécédent tuberculeux

b - Aspergillose pulmonaire invasive probable chez un patient en stade terminal de SIDA

greffes, notamment de l'intensification des chimiothérapies et du meilleur contrôle des infections bactériennes et virales. Il est ainsi possible de traiter un nombre croissant de patients, qui n'auraient pas pu recevoir de traitement quelques années auparavant. Cela entraîne une augmentation du nombre de patients immunodéprimés [81, 129, 132]. D'autre part, étant très difficile à diagnostiquer, le traitement de l'API n'est pas optimal. Les rechutes sont fréquentes, particulièrement lors d'immunosuppressions continues.

2.5 Relation entre exposition et infection aspergillaire

Le degré d'exposition environnemental est un facteur majeur de l'incidence de l'aspergillose invasive. Le rôle déterminant de l'aérobiocontamination aspergillaire est aujourd'hui reconnu : de nombreuses études réalisées lors d'épidémies d'API montrent clairement une relation entre la survenue d'un pic de contamination et une incidence accrue des cas d'API [4, 22]. Une relation directe entre exposition et infection a été démontrée pour l'API chez les patients immunodéprimés, et ce de plusieurs façons :

- par l'étude des épidémies d'aspergillose invasive, dont certaines sont directement la conséquence d'un pic d'aérocontamination fongique
- par des études longitudinales mettant en évidence un lien entre aérocontamination fongique et incidence de l'aspergillose en milieu hospitalier
- en montrant l'impact des mesures de réduction de la contamination fongique sur l'incidence de l'aspergillose

Aucune étude prospective et longitudinale n'avait été réalisée chez les transplantés pulmonaires, alors que ces patients ont un risque élevé d'infection ou de colonisation aspergillaire, jusqu'à la thèse de Christopher Leleu, soutenue en Septembre 2012 [84]. Cette dernière a confirmé le risque élevé de colonisation dans les premières semaines suivant la transplantation (27 % des patients),

et a mis en évidence la corrélation entre la survenue d'infections aspergillaires et la contamination fongique environnementale.

Cependant, la physiopathologie (étude des mécanismes physiques, cellulaires ou biochimiques qui conduisent à l'apparition d'une maladie et des conséquences de celle-ci) et les conditions de survenue de l'API font encore l'objet de débats. On estime à l'heure actuelle qu'il existe principalement un risque « primaire » directement lié à l'inhalation de spores et qui conduit à une infection évolutive, et un risque dit « secondaire » différé, consécutif à la réactivation d'une colonisation préexistante des voies aériennes supérieures et ne se produisant qu'à l'occasion d'une immunodépression importante et prolongée. Dans le cadre hospitalier, les deux risques sont à prendre en compte en terme de prévention, le premier relevant d'une prévention de la contamination par une maîtrise de l'environnement et le second relevant plutôt de la chimioprophylaxie par un traitement antifongique. Les modalités et conditions d'application de ces mesures préventives restent cependant difficiles à définir à cause du manque de standardisation des techniques d'évaluation de la contamination fongique et des difficultés d'interprétation des résultats. Par exemple, et bien que cela ait déjà été proposé [114], il n'a été défini pour le moment et de façon à faire autorité aucun seuil de contamination au-delà duquel le risque aspergillaire est considéré comme significativement augmenté.

Par précaution, une grande attention doit être apportée à la qualité de l'air au sein des hôpitaux, et particulièrement dans les services accueillant des patients fortement immunodéprimés. La décontamination de l'air, l'utilisation de chambres à flux laminaire, l'isolement des chambres à l'aide de pressions positives et de sas à pression négative, la mise en place de mesures d'hygiène strictes et la surveillance de l'aérobiocontamination sont préconisées. La compréhension des mécanismes physiques complexes qui gouvernent le transport des spores fongiques par l'air, ainsi que leur adhésion sur des surfaces et leur réenvol, peut à ce titre permettre d'améliorer la qualité de l'air intérieur des hôpitaux. En cela, une approche expérimentale physique ainsi que la simulation numérique en mécanique des fluides apporteront de nouveaux éléments complétant les études épidémiologiques.

Deuxième partie

Études Expérimentales

Avant-propos

Les expériences décrites dans les chapitres qui suivent ont été réalisées au laboratoire de physique de l'École Normale Supérieure de Lyon, ainsi qu'à l'Hôpital Saint Louis, à Paris.

Dr. Vance Bergeron, mon directeur de thèse, m'a guidé du début à la fin dans ma démarche expérimentale. Comme la plupart des doctorants, je ne savais pas par quel angle attaquer le sujet au départ, et son encadrement a été déterminant car il m'a progressivement appris à devenir, et je le paraphrase, un conducteur et non plus un passager. J'ai fini par encadrer moi-même des stagiaires, Raphaël Ventura l'été 2011 puis François Cadot l'été 2012, qui ont continué à exploiter mes manip alors que j'étais à Paris, et que je travaillais sur la partie numérique de ma thèse.

Le professeur Francis Derouin, directeur du laboratoire de Parasitologie-Mycologie de l'Hôpital Saint-Louis, a mis à notre disposition une chambre expérimentale pilote dans laquelle nous avons pu porter nos expérimentations à taille réelle. Elle avait précédemment servi à valider expérimentalement le concept du « presque tout dans la chambre », imaginé par le professeur Maurice Mimoun, ainsi que le plafond soufflant à profil de vitesse convexe développé par Airinspace [10, 92]. Le Professeur Derouin nous a également introduit auprès des personnes en charge des unités de Pneumologie et de Greffe, qui nous ont autorisé à effectuer des prélèvements dans leurs services.

Chapitre 3

Aérosolisation et sédimentation

3.1 Le nébuliseur Collison

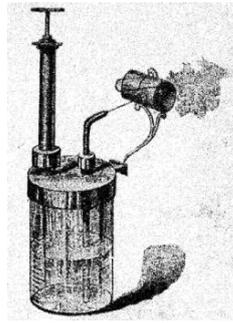
Un nébuliseur est un dispositif capable de transformer certains liquides en un nuage de gouttelettes extrêmement fines. Il existe différentes techniques pour y parvenir, et différentes façon de les mettre en œuvre, toutes regroupées sous le même terme de nébulisation. De nombreuses applications existent comme l’humidification, la diffusion d’huiles essentielles, l’inhalation de médicaments, ou encore l’aérosolisation, qui est celle qui nous intéresse. Un terme parfois employé à la place de nébulisation est pulvérisation [141], cependant celui-ci n’est pas assez spécifique et nous ne l’emploierons pas. Il est à noter également que par le passé, les termes « atomiseur » et « nébuliseur » furent employés de façon synonyme [90], bien que le terme nébuliseur semble à présent prévaloir.

En 1935, lors d’une conférence de la British Medical Association, W.E. Collison présente pour la première fois l’« inhalateur » portant son nom. Il en décrit l’utilisation dans son livre publié en 1935, *Inhalation Therapy Technique*, mais sans donner de détails techniques [32]. Ce dispositif est par la suite utilisé à diverses fins, et sa conception adaptée en conséquence. Il a par exemple été utilisé pendant la deuxième guerre mondiale afin de tester la perméance de filtres en y nébulisant des solutions de bleu de méthylène. En 1947, T. Rosebury décrit pour la première fois l’aérosolisation de bactéries à l’aide du dispositif de Collison [113]. En 1972, K.R. May publie un article qui fait aujourd’hui référence [90], où il décrit précisément le fonctionnement du désormais dénommé nébuliseur Collison. Il y explique comment utiliser le dispositif pour générer des aérosols de particules.

Principe de fonctionnement

Afin de produire de fines gouttelettes, de l’air sous pression est introduit dans le nébuliseur, de façon à produire un ou plusieurs jets de mélange air/liquide qui sont projetés à grande vitesse sur la face interne du nébuliseur. L’impact entre le jet et la surface interne produit des gouttelettes d’une large gamme de diamètres. Les plus grosses retombent dans le mélange initial, sous l’effet de leur poids, tandis que les plus fines sont entraînées hors du dispositif.

Si la solution nébulisée est une suspension de particules, alors ces dernières peuvent se retrouver emprisonnées dans les gouttelettes et ainsi être mises en suspension dans l’air. C’est le principe de l’aérosolisation par nébulisation. Les particules doivent pour cela être suffisamment fines, et les



L'un des premiers nébuliseurs, fabriqué par Georg Lewin's en 1860 [32]

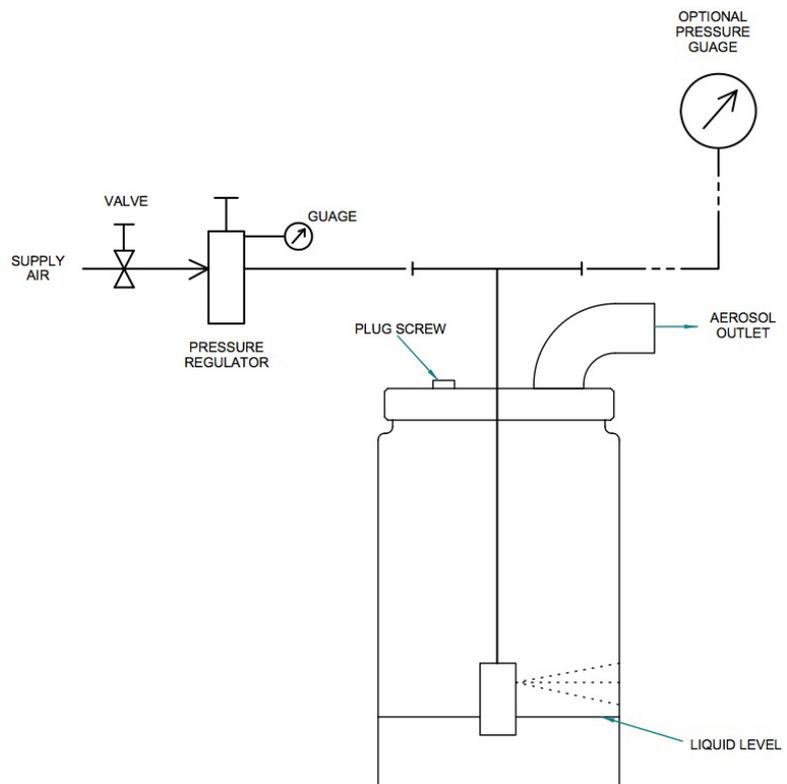


Un nébuliseur Collison moderne à 6 jets, fabriqué par BGI Incorporated [68]

gouttelettes suffisamment grosses, tout en restant assez petites pour s'échapper du nébuliseur. Afin de ne pas obtenir d'amas de particules, la concentration de la solution nébulisée doit être telle que la probabilité qu'une goutte contienne plus d'une particule soit suffisamment faible.

De toutes les gouttelettes produites lors de l'impact, 25 % sont d'un diamètre inférieur à $1 \mu\text{m}$. Parmi les gouttes d'un diamètre supérieur à $1 \mu\text{m}$, 95 % sont d'un diamètre inférieur à $2,7 \mu\text{m}$ [90]. Il est aisé d'aérosoliser des particules d'une taille allant jusqu'à $3 \mu\text{m}$ avec un nébuliseur de type Collison, mais cela devient très difficile si la taille des particules dépasse $5 \mu\text{m}$ [71]

FIGURE 3.1: Schéma du principe de fonctionnement du nébuliseur Collison [16]. La solution de particules est placée dans un récipient en verre. Ce récipient est refermé par un couvercle en acier inoxydable traversé par une sonde. À l'extrémité interne de la sonde se trouve une buse qui plonge dans la solution, munie d'un nombre variable d'orifices. À l'extrémité externe se trouvent deux entrées de part et d'autre d'un T. La première entrée permet d'injecter l'air comprimé dans la buse et de créer les jets qui impacteront les parois. La seconde entrée permet de connecter un manomètre afin de contrôler la pression de l'air injecté. Enfin, une sortie coudée permet aux gouttelettes assez fines de s'échapper.



Avantages et inconvénients

L'aérosolisation à l'aide d'un nébuliseur de type Collison nécessite la mise en solution des particules à aérosoliser. Cela peut être un avantage ou un inconvénient en fonction des particules en question. Lors de nos expériences, nous avons utilisé des billes de latex de différentes tailles (de 1 μm à 10 μm). Ces billes étant vendues sous forme de solution de concentration connue, il ne restait plus qu'à les diluer pour obtenir la solution désirée. Nous avons également nébulisé des spores d'*Aspergillus niger*. Pour les mettre en solution, nous avons déposé une quantité donnée d'eau distillée sur des cultures sur boîte de petri. Nous avons ensuite gratté la surface des cultures avant de récupérer la suspension ainsi obtenue. Pour connaître la concentration de ces solutions, nous avons procédé par dilution et culture. Le protocole de préparation de solutions de spores pour nébulisation est présenté en annexe D.1.

La mise en solution préalable de spores en vue de leur aérosolisation soulève certaines interrogations. D'une part parce que cela est très éloigné de leur mode d'aérosolisation naturel, d'autre part parce que les spores d'*Aspergillus* sont hydrophobes [101, 3]. De plus, les spores sont projetées à haute vitesse contre les parois internes du nébuliseur, causant de violents chocs dont les conséquences éventuelles sur la viabilité, la culturabilité, ou encore la capacité à se reproduire ultérieures des spores nous sont inconnues. Signalons également que la taille des spores d'*Aspergillus niger*, 3,5 μm en moyenne, est un inconvénient à leur nébulisation. Nous sommes proches de la limite haute du nébuliseur et cela signifie que nous allons sélectionner les spores les plus petites. Nous ne savons pas si la taille des spores a une influence sur leur comportement ultérieur.

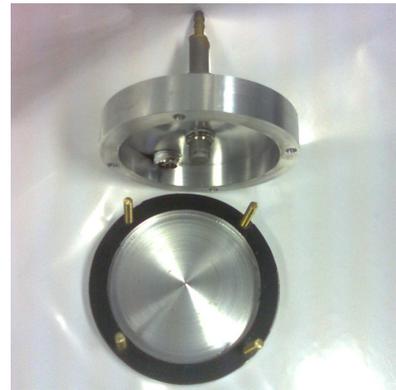
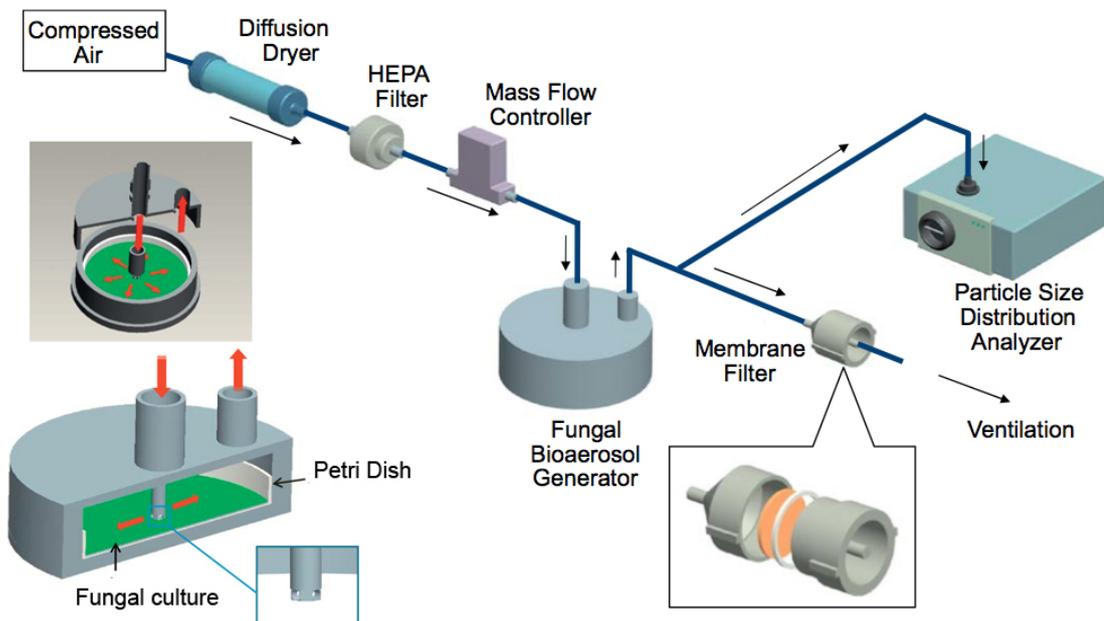
Pour autant, le nébuliseur Collison constitue aujourd'hui une référence dans l'aérosolisation de particules et de bioparticules, notamment car il permet une bonne reproductibilité des concentrations obtenues. Signalons qu'il existe d'autres techniques, voire notamment les travaux de l'IRSN sur le bullage [123].

3.2 Aérosolisation de spores par voie sèche

En raison des inconvénients propres à notre utilisation spécifique du nébuliseur Collison, nous souhaitons nous munir d'un dispositif permettant d'aérosoliser les spores par soufflage. Après avoir essayé de procéder de façon artisanale, en dirigeant un flux d'air comprimé sur les boîtes de petri, s'est fait sentir le besoin de réaliser cette opération de façon contrôlée. La littérature est pléthorique quand aux méthodes d'aérosolisation de spores fongiques par soufflage direct sur des cultures sur boîtes de petri [54, 74, 72, 71, 119, 83]. Nous avons choisi de reproduire le dispositif décrit par Lee *et al.* en 2010 [82], en raison de sa simplicité de fabrication, nous permettant d'en réaliser nous-même un prototype, ainsi que pour les résultats prometteurs décrits.

Ce dispositif consiste en un réceptacle dans lequel s'ajuste la boîte de culture. Il possède en son centre une sonde permettant d'injecter de l'air sous pression. Cette sonde vient affleurer la culture fongique et est diamétralement percée de petits orifices permettant de souffler l'air tangentiellement à la surface de culture. Une ouverture excentrée permet alors aux spores de s'échapper (voir schéma 3.2 et photos 3.3). Dans la suite de l'exposé, nous l'avons nommé DAF (pour Dry Aerosolizer of Fungal spores).

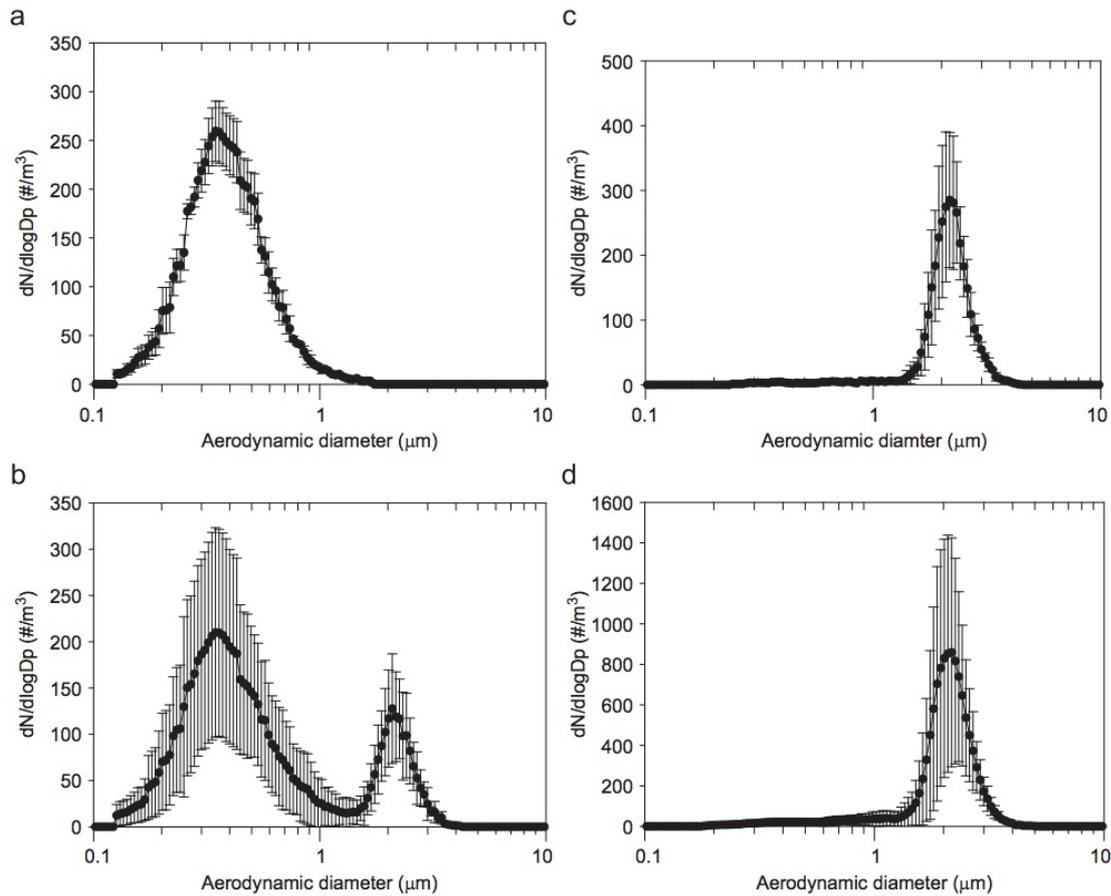
FIGURE 3.2: Principe de fonctionnement du DAF [82]

FIGURE 3.3: Notre prototype du DAF. L'étanchéité entre les deux parties est assurée par un joint plat. Du Téflon[®] en bande est utilisé pour étanchéifier les orifices filtrés de sortie et d'entrée.

Dans leur article, Lee *et al.* [82] expliquent qu'ils parviennent à aérosoliser, en fonction de la vitesse de l'air à la sortie des orifices, des spores fongiques, des fragments fongiques (morceaux de mycélium, de conidiophores, *etc.*), ou un mélange des deux, comme illustré sur les diagrammes granulométriques de la figure 3.4). Ils illustrent cela par une analyse granulométrique de l'aérosol généré. On constate effectivement qu'à une vitesse inférieure à 7 m/s, le diamètre aérodynamique moyen des particules aérosolisées est de 0,4 μm , ce qui correspondrait à des fragments fongiques, tandis que pour une vitesse supérieure à 21 m/s, le diamètre aérodynamique moyen des particules aérosolisées est égal à 2,1 μm , ce qui correspond au diamètre des spores d'*Aspergillus versicolor*

utilisées pour leurs expériences, et qui sont réputées mesurer entre $2 \mu\text{m}$ et $3,5 \mu\text{m}$ [117].

FIGURE 3.4: Distribution de la taille des particules du bioaérosol d'*Aspergillus Versicolor* généré sous différentes vitesses de l'air à la sortie des buses : (a) 7 m/s, (b) 14 m/s, (c) 21 m/s et (d) 35,4 m/s [82]



Nous avons reproduit l'expérience en utilisant des spores d'*Aspergillus niger*. Connaissant le débit volumique D à l'entrée de l'aérosoliseur ainsi que le diamètre des buses (1 mm), au nombre de huit, nous en avons déduit la vitesse V en sortie des buses :

$$V = \frac{D}{8 \cdot \pi r^2} \Rightarrow V[m.s^{-1}] \simeq 0,66 D [l.min^{-1}]$$

Le DAF a été placé dans une cuve en PMMA (Plexiglas) étanche à l'air avec une ouverture munie d'un filtre HEPA. L'air injecté était séché à l'aide d'un dessiccateur sous la forme d'un tube de cinq centimètres de diamètre et trente centimètres de longueur, rempli de billes de gel de silice. Nous avons mesuré le débit à l'aide d'un débitmètre Sho-Rate. Nous avons mesuré la concentration particulaire de l'aérosol à l'aide d'un compteur particulaire portable à diffusion

Handilaz (Particle Measuring Systems). La taille moyenne des spores d'*Aspergillus* se situant aux alentours de $3,5 \mu\text{m}$, nous avons considéré que le canal $1 \mu\text{m} - 5 \mu\text{m}$ du compteur particulaire représentait la quantité de spores aérosolisée. Les résultats de ces mesures sont présentés figure 3.5.

Nous n'avons pas reproduit le résultat obtenu par Lee *et al.* [82], à savoir générer en fonction de la vitesse de l'air un aérosol de spores, de fragments fongiques, ou un mélange des deux. Nous ne générons, quelle que soit la vitesse de soufflage, qu'un aérosol de spores. Une piste d'explication possible est que nous avons travaillé avec l'espèce *niger* au lieu de l'espèce *versicolor*, dont les spores sont de taille légèrement inférieure, mais nous nous attendions à des résultats au moins similaires, à la vitesse près.

Malgré cela, le DAF à notre besoin premier qui est d'aérosoliser des spores fongiques sans avoir à les mettre en solution. Il présente également quelques inconvénients. Tout d'abord, il produit des concentrations de spores extrêmement élevées, bien trop importantes pour les cuves dans lesquelles nous avons réalisé les expériences qui vont être décrites par la suite. Nous avons dû pour y remédier filtrer l'aérosol produit en sortie. De plus, et c'est l'inconvénient majeur, nous avons eu des difficultés importantes à obtenir une reproductibilité acceptable de la concentration de l'aérosol généré; elles peuvent s'expliquer par la difficile reproductibilité des croissances sur boîtes de petri. Nous soupçonnons également un biais introduit par la température des boîtes, selon qu'elles viennent d'être sorties de l'étuve, du réfrigérateur, ou de l'ambient, mais nous n'avons pas réussi à le confirmer expérimentalement.

3.3 Sédimentation de particules

La sédimentation de particules, ainsi que le comportement des bioaérosols, sont des sujets largement traités dans la littérature scientifique. Pour un exposé complet, le lecteur pourra se reporter aux ouvrages de référence de Cox & Wathes [37] et Hinds [59]. Nous allons présenter quelques résultats qui seront des outils utiles pour la suite de l'exposé.

Vitesse de sédimentation

Lorsqu'une particule est en suspension dans l'air, elle est soumise à l'influence de son propre poids et va sédimenter, pour peu que l'air soit au repos. Passé un régime transitoire, la particule atteint une vitesse constante, lorsque la force de traînée F_D est égale à la force d'attraction gravitationnelle F_G (une description de la force de traînée est donnée au chapitre 7.2).

$$F_D = F_G$$

Si l'on se place dans le cas de petites particules sphériques se déplaçant à faible vitesse (écoulement de Stokes), la force de traînée peut être approximée comme suit :

$$F_D = 3\pi \cdot \mu \cdot d_p \cdot V_S \quad (\text{Loi de Stokes}) \quad (3.1)$$

μ est la viscosité dynamique du fluide, d_p est le diamètre de la particule, et V_S est la vitesse relative de la particule par rapport au fluide, ou vitesse de sédimentation. Les hypothèses exactes pour pouvoir appliquer la loi de Stokes sont que l'écoulement est incompressible, qu'il n'y a pas de parois ou de particules à proximité de la particule, que cette dernière est une sphère rigide, que

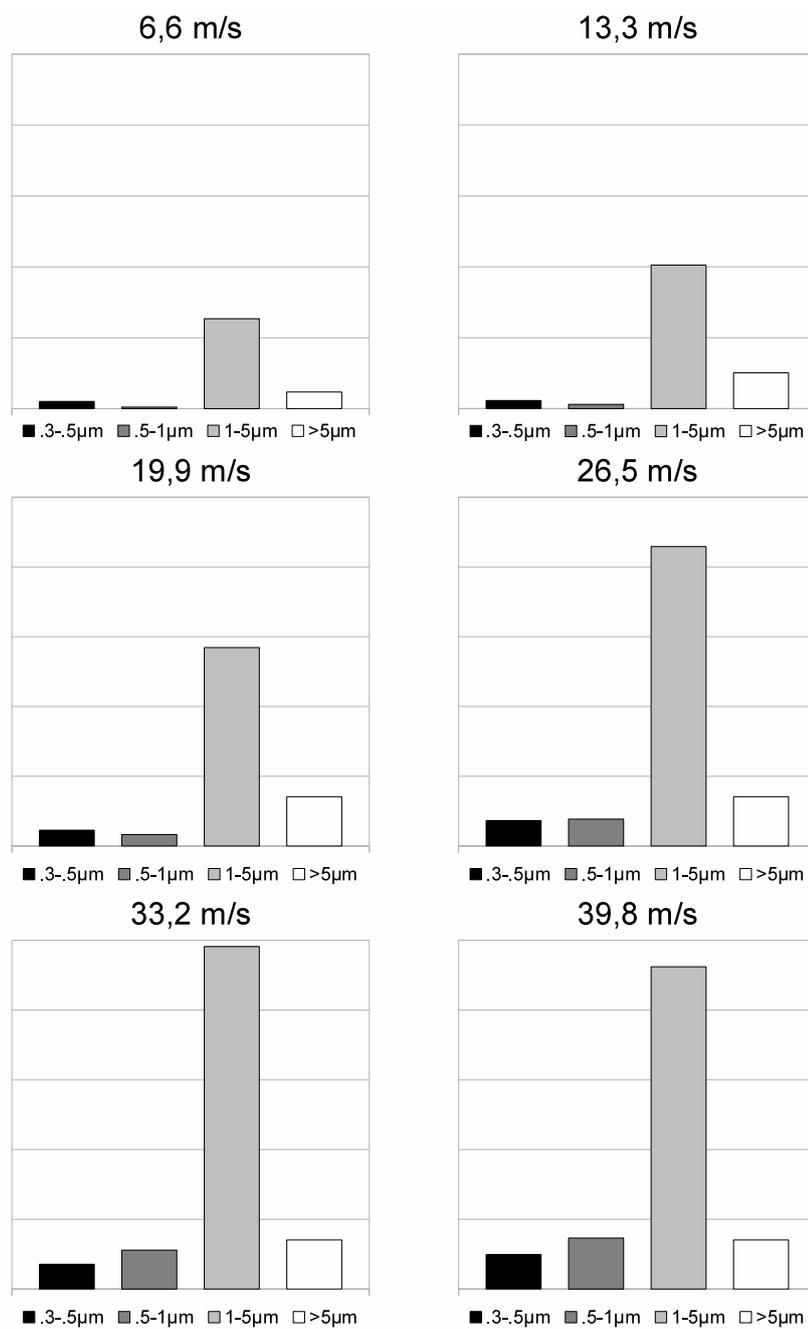


FIGURE 3.5: mesures granulométriques obtenues lors de l'aérosolisation par voie sèche de souches d'*Aspergillus niger*, en fonction de la vitesse de l'air à la sortie des orifices. La quantité de spores aérosolisées est représentée en unité arbitraire.

son déplacement se fait à vitesse constante, et que la vitesse de l'air à la surface de la particule est nulle. La force d'attraction gravitationnelle s'exprime quand à elle comme suit :

$$F_G = \frac{\pi \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot g \cdot d_p^3}{6} \quad (3.2)$$

g est l'accélération de la pesanteur, ρ_p est la densité de la particule et ρ_f est la densité du fluide. Cette dernière est incluse pour tenir compte de la flottabilité, mais peut dans la plupart des cas être négligée. Par exemple, dans le cas d'une goutte d'eau dans de l'air, le ratio des densités est égal à 800, et négliger la flottabilité induit une erreur de seulement 1 %. Les équations (3.1) et (3.2) nous donnent alors :

$$V_S = \frac{\rho_p \cdot g \cdot d_p^2}{18 \cdot \mu} \quad (3.3)$$

C'est l'équation de sédimentation de Stokes. Sous cette forme, elle est suffisamment précise ($\pm 10\%$) pour déterminer la vitesse de sédimentation de particules de densité unitaire de diamètres pouvant aller de 1,5 à 75 μm [59].

Facteur de correction de Cunningham

Une hypothèse nécessaire à l'établissement de la loi de Stokes est la condition de non glissement : la vitesse de l'air à la surface de la particule est nulle. Cette hypothèse n'est plus vérifiée si les particules sont suffisamment petites pour avoisiner le libre parcours moyen du fluide. La vitesse de l'air à leur surface n'est pas nulle : il existe un glissement. C'est le cas lorsque les particules sont d'un diamètre inférieur à 1 μm . De telles particules sédimentent plus vite que ce que prévoit l'équation (3.3). En 1910, Ebenezer Cunningham (1881 - 1977) propose un facteur de correction de la loi de Stokes afin de tenir compte de ce glissement. Ce facteur est appelé facteur de correction de Cunningham, noté C_C . Il dépend du libre parcours moyen λ des molécules du fluide.

$$C_C = 1 + \frac{2,52\lambda}{d_p} \quad (3.4)$$

$$\lambda = \frac{1}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot n \cdot d_m^2} \quad (3.5)$$

n est le nombre de molécules par unité de volume du fluide, et d_m est le diamètre de collision des molécules, c'est à dire la distance entre les centres de deux molécules à l'instant de la collision. Pour de l'air, à la pression de 101 kPa (1 atm) et à la température de 293 K (20°C), le libre parcours moyen est égal à 0,066 μm . Le facteur de correction de Cunningham est toujours plus grand que 1 et réduit la force de traînée de la loi de Stokes :

$$F_D = \frac{3\pi \cdot \mu \cdot d_p \cdot V}{C_C} \quad (3.6)$$

Son utilisation étend le champ d'application de la loi de Stokes jusqu'aux particules d'un diamètre inférieur à 0,1 μm . Ce champ peut être étendu d'avantage grâce à des équations empiriques basées sur des mesures expérimentales du glissement. Son expression devient alors :

$$C_C = 1 + \frac{\lambda}{d_p} [2,34 + 1,05e^{-0,39\frac{d}{\lambda}}] \quad (3.7)$$

Il est alors appelé « facteur de correction du glissement » (*slip correction factor* en anglais). L'équation déterminant la vitesse de sédimentation corrigée s'écrit :

$$V_S = \frac{\rho_p \cdot g \cdot d_p^2 \cdot C_C}{18\mu} \quad (3.8)$$

Elle est alors valide pour une large gamme de tailles de particules, allant de particules nanométriques à des diamètres pouvant s'élever jusqu'à $50 \mu m$ [59]. En effet, rappelons que nous avons fait au départ l'hypothèse d'un écoulement de Stokes, et donc de petites particules se déplaçant à faible vitesse. Pour une particule de $1 \mu m$ de diamètre et de densité $1000 kg \cdot m^{-3}$, aux conditions standard, le facteur de correction du glissement vaut 1,15. Cela signifie que la particule sédimente 15 % plus vite que ce qui aurait été prédit par l'équation non corrigée. Pour des applications numériques précises, il convient d'utiliser ce coefficient pour des tailles de particules allant jusqu'à $10 \mu m$.

Concentration particulaire

L'équation (3.8) nous permet de déterminer l'évolution de la concentration d'un aérosol dans un milieu clos. Le cas réel est complexe du point de vue aéraulique, et se situe entre les deux cas idéaux suivants : la sédimentation « calme » et la sédimentation « agitée ».

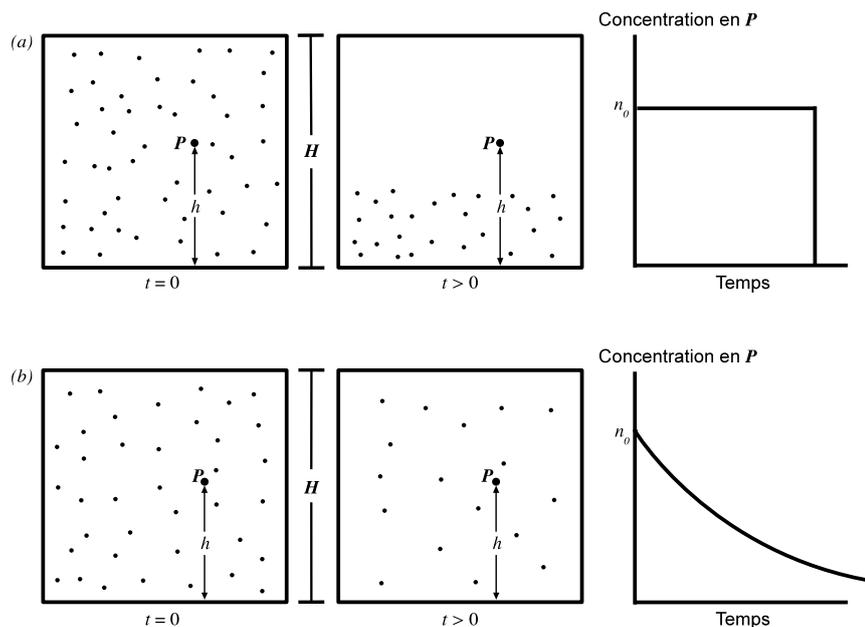


FIGURE 3.6: Sédimentations calme (a) et agitée (b) [59]

Dans le modèle de sédimentation calme, le fluide n'est pas en mouvement, et le déplacement de chaque particule de l'aérosol se résume à sa sédimentation gravitationnelle au sein du fluide. Dans le cas d'un aérosol monodispersé, c'est à dire dont toutes les particules ont la même taille,

ces dernières vont sédimenter à la même vitesse. Au bout d'un certain temps, une région supérieure sans particule va se former. La limite séparant cette région vide de particules de la région inférieure contenant encore des particules va se déplacer à une vitesse égale à la vitesse de sédimentation. En n'importe quel point de l'espace considéré, la concentration particulaire sera constante et égale à la concentration initiale, jusqu'à ce qu'elle devienne instantanément nulle au moment où le point sera traversé par la limite entre les deux zones. Après un temps égal à H/V_S , H étant la hauteur de l'espace considéré, la concentration particulaire est nulle en tout point.

À l'extrême inverse, si l'aérosol est vigoureusement agité, alors il occupe à chaque instant le volume total de l'espace considéré, et sa concentration est uniforme. La diffusion, ainsi que la déposition et le réenvol sur les parois (à l'exception du sol) sont négligés. On considère que la vitesse des particules due à leur convection est nulle en moyenne : cela signifie qu'elles vont se déplacer dans toutes les directions de façon équiprobable. À la convection s'ajoute la sédimentation : ainsi, la vitesse moyenne totale des particules est égale à la vitesse de sédimentation. La concentration particulaire diminue avec le temps, ainsi que le taux de dépôt, puisqu'il est proportionnel au nombre de particules restant en suspension. Si l'on considère le nombre total de particules n dans l'espace considéré, de hauteur H , alors la distance parcourue moyenne pendant un court instant dt est égale à $V_S dt$. Cette distance est parcourue vers le bas : toutes les particules se trouvant à une distance inférieure à $V_S dt$ du sol se sont donc déposées. On peut alors exprimer la variation dn du nombre de particule total pendant un instant dt , qui correspond aux particules qui se déposent pendant dt (3.9)

$$dn = -n \frac{V_S}{H} dt \quad (3.9)$$

Cela nous donne, en intégrant avec comme conditions initiales $n = n_0$ et $t = 0$:

$$n(t) = n_0 e^{-\frac{V_S}{H} t} \quad (3.10)$$

La concentration des particules subissant une sédimentation « agitée » décroît exponentiellement avec le temps, et par conséquent n'atteint jamais zéro. Dans le cas d'aérosols monodispersés, la situation réelle se situe entre ces deux cas idéaux. Cependant, dans le cas de petites particules, et notamment de spores fongiques, nous sommes très proches du cas agité. Cela sera confirmé par les expériences décrites par la suite. Dans le cas d'aérosols polydispersés, la formule (3.10) peut-être appliquée à chaque taille de particule, ou être intégrée en fonction de la distribution de tailles afin d'obtenir une équation caractérisant la concentration particulaire en fonction du temps.

Vérification expérimentale

Afin de vérifier l'applicabilité des équations obtenues précédemment, nous avons effectué plusieurs expériences de sédimentation en utilisant des particules sphériques de résine de mélamine. La résine de mélamine, de formule brute $C_3H_6N_6$ a une masse volumique de 1600 kg/m^3 . Une particule sphérique en résine de mélamine de $2 \mu\text{m}$ de diamètre sédimentera donc, d'après l'équation (3.8) à une vitesse de $2,1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ soit environ $0,2$ millimètres par seconde. Introduisons le coefficient de diminution Δ :

$$\Delta = \frac{V_S}{H} \quad (3.11)$$

$$n(t) = n_0 e^{-\Delta t} \quad (3.12)$$

Le coefficient de diminution s'exprime en secondes inverses, et peut être interprété comme un taux de particules qui atteignent le sol chaque seconde. Si l'on représente l'équation (3.10) sur une échelle semi-logarithmique en temps, ce sera une droite de pente $-\Delta$. Le coefficient de diminution nous permet donc de comparer directement et visuellement différentes vitesses de sédimentation.

FIGURE 3.7: Cuve en plexiglass dans laquelle ont été générés les divers aérosols



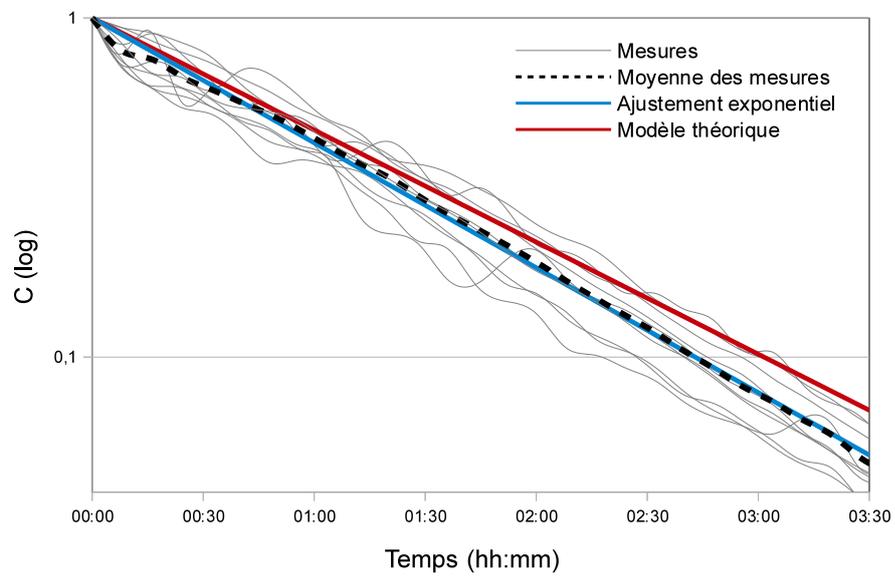
Nous avons aérosolisé des sphères de résine de mélamine de diamètre $2 \mu\text{m}$ (Fluka, Sigma-Aldrich) dans une cuve en PMMA (Polyméthacrylate de méthyle ou Plexiglas[®]) dont les parois intérieures ont été recouverte d'aluminium afin de s'affranchir d'éventuels effets dus à la charge électrostatique des parois. La hauteur de la cuve est de 926 cm pour un volume de $0,829 \text{ m}^3$. Nous avons utilisé un nébuliseur Collison et mesuré la concentration particulaire à l'aide d'un compteur Handilaz Mini (Particle Measuring Systems). Les résultats de dix répétitions de l'expérience sont présentés dans le graphe de la figure (3.8).

Le tableau (3.1) présente les coefficients de diminution théorique et mesuré, ainsi que l'écart relatif entre les deux. Suivent l'écart type, qui quantifie la répétabilité de nos expériences et l'incertitude sur nos mesures, ainsi que l'erreur type de la moyenne, c'est à dire l'écart type divisé par la racine carrée du nombre d'expériences réalisées. On constate que nos mesures sont proches du résultat prédit théoriquement. Nous avons également une bonne répétabilité puisque l'écart et l'erreur type nous indiquent une faible dispersion des mesures. Des résultats similaires ont été obtenus dans la chambre pilote de l'hôpital Saint-Louis, ce qui indique que les dimensions de la cuve sont adéquates pour pouvoir négliger les effets de bord.

Tableau 3.1: Comparaison des coefficients de diminution théoriques et mesurés pour des billes de résine de mélamine de $2 \mu\text{m}$ de diamètre

	Théorie	Mesures	Écart relatif	Écart type	Erreur type
$\Delta (10^{-4} \text{ s}^{-1})$	2,24	2,36	4,90 %	$1,29 \cdot 10^{-1}$	$4,08 \cdot 10^{-2}$

FIGURE 3.8: Sédimentation de particules sphériques de mélamine de diamètre $2\ \mu\text{m}$: concentration particulaire normalisée C (pour le canal $1\text{-}5\ \mu\text{m}$) en fonction du temps.



Chapitre 4

Fongicides et surfaces

4.1 Objectifs

Nous allons présenter dans ce qui suit une série d'expériences dont l'objectif principal est de proposer une méthodologie originale et pertinente permettant de quantifier l'efficacité ainsi que la rémanence de traitements fongicides de surfaces. Nous avons pour cela traité différentes surfaces que nous avons ultérieurement soumises à une sédimentation de spores fongiques de façon contrôlée. Les surfaces utilisées sont en matériaux d'usage courant en milieu hospitalier : l'acier inoxydable, le verre, le polypropylène (PP) et le carrelage émaillé. Ces matériaux possèdent des caractéristiques différentes (rugosité, conductivités électrique et thermique, hydrophobicité), et il n'y a aucune raison pour qu'ils réagissent identiquement à une contamination ou à un traitement fongicide [112].

Nous avons élaboré nos traitements fongicides en utilisant deux solutions commerciales : AniosTM (DDSH[®]) et VesisminTM. Ces deux fongicides se présentent sous forme de solutions directement pulvérisables sur la surface à traiter. Ils sont différents par leur composition, leur viscosité et leur tension superficielle (angle de contact inférieur à 90° pour Anios et supérieur à 90° pour Vesismin, sur de l'innox). Nos échantillons témoins ont quand à eux uniquement subi un traitement à l'éthanol.

Nous avons aérosolisé des spores d'*Aspergillus niger* issus d'une source référencée fournie par le laboratoire de Parasitologie-Mycologie de l'Hôpital Saint-Louis à Paris. Nous avons pour ce faire utilisé un nébuliseur Collison ainsi que le DAF (voir chapitre 3.2) afin d'observer des différences éventuelles de comportement entre les aérosols respectifs.

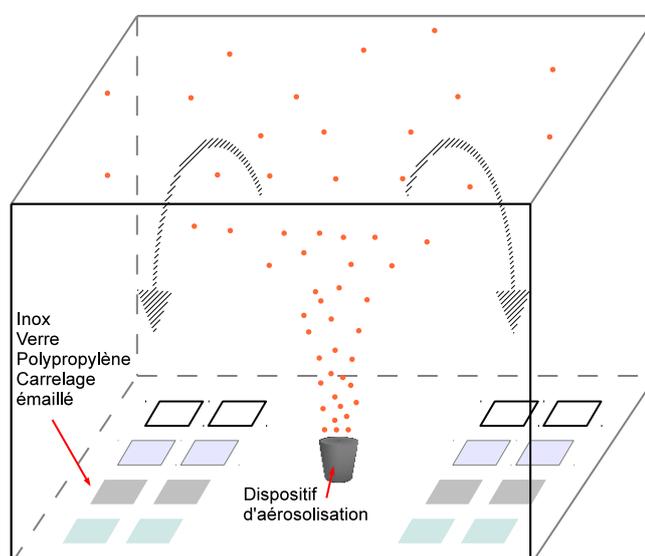
Il existe de nombreux protocoles de tests permettant d'évaluer l'efficacité de solutions fongicides. Tous procèdent en phase liquide : les spores sont mises en solution, puis le fongicide est ajouté à la solution. Enfin, les spores sont mises en culture. C'est le cas par exemple de la norme NF EN 1650, qui fait aujourd'hui référence [2]. Nous pensons que de tel protocoles, s'ils évaluent l'efficacité immédiate des fongicides mis en contact aqueux avec les spores fongiques, n'évaluent cependant pas leur effet rémanent une fois secs. En d'autres termes, ils ne permettent pas de quantifier leur effet lorsqu'une spore aéroportée se dépose sur une surface sèche préalablement traitée. C'est un des objets de la présente étude.

Nous proposons à cette fin un protocole aussi proche de la réalité que nous l'ont permis nos moyens expérimentaux. De fait, nous ne prétendons pas avoir reproduit expérimentalement les conditions réelles de contamination et décontamination des surfaces. Cependant nous avons essayé d'en être le plus proches possible, en laissant les spores sédimenter naturellement sur des surfaces que nous avons traité manuellement.

4.2 Matériel et méthodes

Nous avons réalisé l'ensemble des expériences dans la cuve précédemment utilisée au chapitre (3.3). Sa surface au sol est de $1,13 \times 0,78 = 0,89 \text{ m}^2$ pour une hauteur de $0,93 \text{ m}$ soit un volume de $0,829 \text{ m}^3$. Entre chaque aérosolisation, l'air intérieur était renouvelé puis les parois internes de la cuve frottées à l'éthanol. Des prélèvements de l'air ainsi que des surfaces intérieures ont été réalisés afin de s'assurer que l'environnement soit exempt de spores fongiques cultivables.

FIGURE 4.1: Schéma du dispositif expérimental



Les surfaces utilisées ont subi différents traitements fongicides, avec en commun un nettoyage préalable à l'éthanol pur. Suite à ce pré-traitement, une partie ne subissait pas de traitement supplémentaire, faisant office de surfaces témoins ; l'autre partie était traitée par un excédent de fongicide. En plus des fongicides AniosTM et VesiminTM, nous avons utilisé une solution cinq fois plus concentrée de VesiminTM, notée Vesimin+ dans la suite. Une fois traitées, les plaques ont été placées au hasard au fond de la cuve (afin de moyenner d'éventuelles inhomogénéités de concentration particulaire). Une fois les surfaces mises en place, les spores ont été aérosolisées, l'aérosoliseur (Collison ou DAF) étant systématiquement placé au centre de la cuve.

La concentration de spores a été mesurée en continu en utilisant un compteur particulaire (Handilaz[®] mini, Particle Measuring SystemsTM). Ce dernier était programmé pour compter les particules toutes les 2 minutes pendant 30 secondes (dont une purge de 5 secondes), avec un

débit de $2,8 \text{ l/min}$ ($0,1 \text{ cfm}$), sur le canal $1\text{-}5 \mu\text{m}$. Une fois les spores sédimentées, nous avons utilisé des boîtes de petri de type Sabouraud glucosé au Chloramphénicol afin de réaliser des prélèvements de surface (Sigma-AldrichTM). Ces boîtes étaient de type contact : cela signifie que la gélose est coulée de façon à laisser dépasser un ménisque au dessus du bord, permettant un contact direct avec la surface à prélever. Les boîtes ont été incubées à 28°C pendant 48 h , puis sorties de l'étuve afin de ralentir la croissance et de pouvoir compter les colonies avant qu'elles ne forment un tapis.

Il nous a été difficile d'obtenir une bonne répétabilité lors de ces expériences : il est souvent arrivé que la concentration de spores soit trop élevée, auquel cas il était impossible de compter les colonies fongiques car les boîtes de petri étaient saturées ; ou trop faible, auquel cas il y avait trop peu de colonies pour que les résultats soient statistiquement significatifs. Nous n'avons comptabilisé que les expériences où le nombre de colonies par boîte était de l'ordre de la dizaine, et inférieur à 300, soit environ une expérience sur cinq.

4.3 Résultats

Sédimentation de spores fongiques

La spore, à l'exception de sa membrane rigide, est constituée de cytosol (phase liquide dans laquelle baignent les organites cytoplasmiques). Le cytosol est lui-même constitué à 85% d'eau. N'ayant pas de meilleure estimation à disposition, nous avons choisi de prendre la masse volumique des spores égale à celle de l'eau, soit 1000 kg/m^3 . Le graphe de la figure (4.2) représente l'évolution de la concentration de spores aérosolisées par voie sèche pour vingt-sept essais, ainsi que les courbes de diminution théorique de cette concentration pour deux valeurs de rayon des spores. Pour un diamètre moyen de $3,5 \mu\text{m}$, l'équation (3.8) nous donne la vitesse de sédimentation théorique d'une spore : $3,7 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$. Cela nous permet de déterminer, en utilisant l'équation (3.10) que 95% des spores doivent avoir sédimenté au bout d'environ deux heures.

Nous constatons tous d'abord une forte dispersion des mesures. Nous avons contrôlé la concentration particulière à l'aide d'un compteur optique en surveillant la gamme de taille allant de 1 à $5 \mu\text{m}$. Étant donné que l'on souffle directement sur les cultures pour aérosoliser les spores, il est très probable que nous aérosolisons également des fragments de mycélium, dont nous ne connaissons ni la taille ni la forme, ni la densité, mais qui pourraient expliquer cette dispersion. Dans une moindre mesure, la non-sphéricité des spores ainsi que leur agglutination peut également expliquer ce phénomène. Sur la photo de la figure (4.3) par exemple, on peut observer deux spores de forme ovoïde qui, si elles s'agglutinent dans le sens de l'épaisseur, peuvent avoir un diamètre optique inférieur à $5 \mu\text{m}$. N'ayant pas quantifié le taux d'agglutination des spores de l'aérosol généré, nous ne pouvons pas dire dans quelle mesure ce phénomène explique la dispersion de nos mesures.

Nous observons ensuite une différence significative entre la courbe théorique pour un rayon moyen de $3,5 \mu\text{m}$, qui est le rayon moyen communément admis pour les spores d'*Aspergillus niger* (4.1), et la courbe moyenne expérimentale, qui est plus proche de la courbe théorique que l'on obtiendrait pour un diamètre de $3,15 \mu\text{m}$. Cela peut s'expliquer par les mêmes raisons évoquées ci-dessus.

FIGURE 4.2: Sédimentation de spores d'*Aspergillus niger* : concentration particulaire normalisée C en fonction du temps.

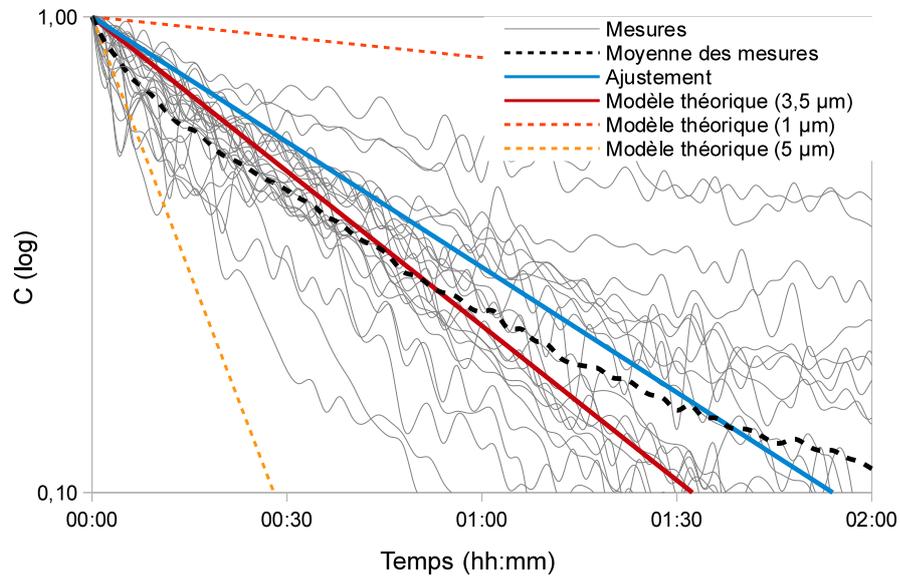
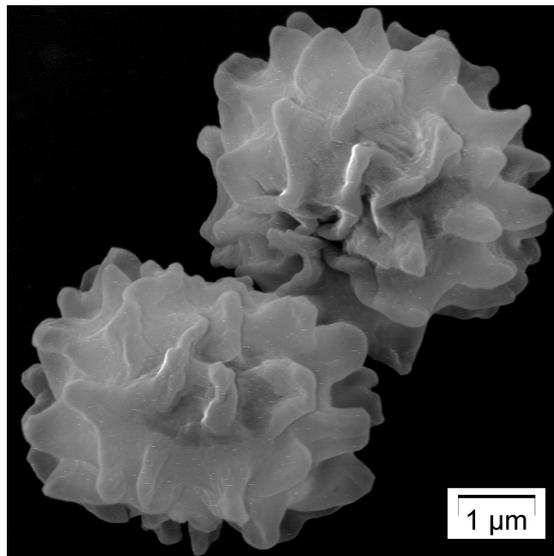


FIGURE 4.3: Deux spores d'*Aspergillus niger* ovoïdes agglutinées.



Examinons les biais que présente notre modèle théorique de sédimentation lorsqu'on l'applique à la déposition de spores fongiques. Évoquons pour commencer l'incertitude sur la masse volumique des spores, qui peut faire basculer nos prédictions en excès comme en défaut. Ajoutons que nous avons réalisé nos expérimentations dans une cuve en PMMA, qui est un diélectrique : des phénomènes d'interactions électrostatiques entre l'aérosol et les parois peuvent avoir lieu. En outre, les spores présentent une rugosité de surface en l'espèce de petits picots, et nous ne savons

Tableau 4.1: Comparaison des coefficients de diminution théoriques et mesurés pour des spores d'*Aspergillus niger*

	Δ (10^{-4} s^{-1})	Écart type	Erreur type	Écart relatif
Mesures (moyenne)	3,37	$1,26 \cdot 10^{-1}$	$2,43 \cdot 10^{-2}$	-
Théorie ($3,5 \mu\text{m}$)	4,15	-	-	23,1 %

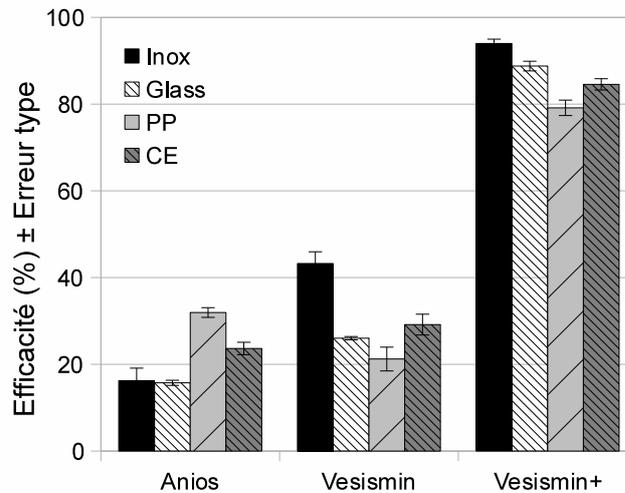
pas comment cela peut influencer sur leur cinétique de sédimentation.

Différences entre matériaux

Le graphe (4.4) ainsi que le tableau (4.2) présentent l'efficacité des trois traitements considérés, pour chaque matériau testé. La dispersion des mesures est représentée sur chaque barre par l'erreur type sur 9 répétitions. L'efficacité est calculée par rapport aux surfaces témoins qui n'ont reçu aucun traitement spécifique excepté un lavage à l'éthanol (4.1), et pour lesquelles l'efficacité est définie comme nulle.

$$\eta = \left(1 - \frac{\text{nombre de colonies}_{\text{surface traitée}}}{\text{nombre de colonies}_{\text{surface non traitée}}} \right) \cdot 100 \quad (4.1)$$

FIGURE 4.4: Efficacité de traitements fongicides appliqués à différentes surfaces



Pour un traitement donné, nous n'avons pu distinguer aucune différence d'efficacité statistiquement significative entre les différents matériaux. Pour chaque traitement, nous avons effectué un test de Kruskal-Wallis afin de déterminer si l'on peut considérer que les différents matériaux appartiennent à des populations différentes, en d'autres termes s'ils se comportent de façon significativement différente. Nous avons obtenu des p-valeurs égales à 0,194, 0,587 et 0,295 respectivement pour Anios, Vesismin et Vesismin concentré, signifiant que l'hypothèse que les matériaux appartiennent à des populations différentes a respectivement 19,4 %, 58,7 % et 29,5 % de chances

	Anios	Vesimin	Vesimin+
Inox	16,24 (2,89)	43,34 (2,72)	93,97 (1,01)
Verre	15,73 (0,59)	26,03 (0,38)	88,77 (1,12)
Polypropylène	31,95 (1,13)	21,23 (2,75)	84,5 (1,78)
Carrelage	23,66 (1,43)	29,17 (2,41)	84,55 (1,29)

Tableau 4.2: Efficacité en pourcentage (et erreur type de l'efficacité sur 9 répétitions entre parenthèses) de trois traitements fongicides, en fonction des matériaux traités.

d'être erronée. Cela ne semble donc pas être le cas, et justifie le choix de l'acier inoxydable comme matériau de référence dans la plupart des normes. Nous avons donc choisi de continuer la suite des expériences avec uniquement des surfaces en acier inoxydable.

Différences entre traitements

Pour un matériau donné, nous avons observé des différences d'efficacité statistiquement significatives entre les différents traitements. Pour chaque matériau, nous avons effectué un test de Mann-Whitney afin de déterminer si Anios ou Vesimin (à leurs concentrations commerciales) permettaient d'obtenir une meilleure efficacité. Nous avons trouvé que l'efficacité de Vesimin est significativement meilleure pour l'acier inoxydable et le verre (respectivement $p=0,017$ et $p=0,001$). Anios est quand à lui plus efficace sur le PP ($p=0,027$). Aucune différence significative n'a été observée pour le carrelage émaillé ($p=0,480$). À l'exception de la solution concentrée de Vesimin, aucun des fongicides de concentration commerciale n'a montré de meilleure efficacité quel que soit le matériau (voir tableau 4.3).

	Anios	Vesimin	Vesimin+
Moyenne de l'efficacité (%)	21,90	29,92	86,61

Tableau 4.3: Moyennes de l'efficacité de chaque traitement tous matériaux confondus

Différences entre les méthodes d'aérosolisation

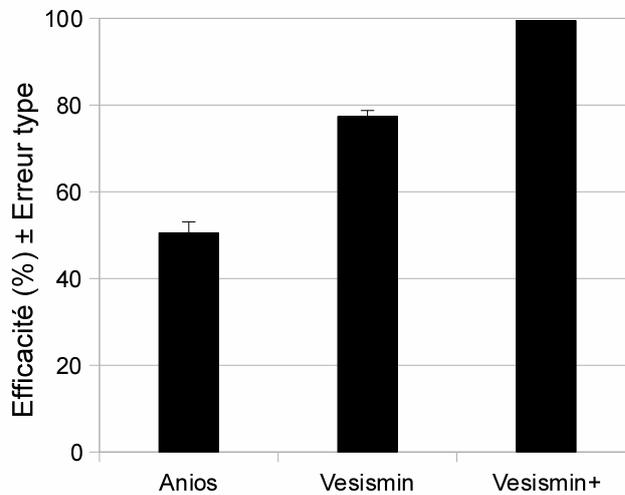
Nous avons reproduit la même expérience mais en utilisant cette fois-ci le DAF, et uniquement avec des surfaces en acier inoxydable. Les résultats sont présentés graphe (4.5) et tableau (4.4), ainsi que pour chaque barre, l'erreur type sur 12 reproductions.

	Anios	Vesimin	Vesimin+
Efficacité (%)	50,56	77,41	99,46
Erreur-type	2,52	1,34	0,04

Tableau 4.4: Moyennes et erreur-type sur douze répétitions de l'efficacité de chaque traitement tous matériaux confondus

Nous constatons que les traitements fongicides sont nettement plus efficaces lorsque les spores sont aérosolisées par voie sèche que par voie humide. Cela est confirmé par un test de Mann-Whitney ($p=0,020$ et $p=0,041$ pour Anios et Vesimin respectivement). Il semblerait donc que

FIGURE 4.5: Efficacité de traitements fongicides appliqués à des surfaces en inox



la nébulisation sélectionne des spores moins sensibles à nos traitements fongicides. La meilleure efficacité de Vesismin pour les surfaces en acier inoxydable est confirmée avec 0,2 % de chances d'erreurs ($p=0.002$).

Rémanence des traitements fongicides

Les efficacités de décontamination fongique présentées jusqu'ici ont été observées sur des surfaces traitées puis séchées. Nos traitements possèdent par conséquent un effet rémanent. Des expériences ultérieures nous ont permis d'observer que ce comportement s'étend jusqu'à 96 h, mais nous n'avons pas suffisamment reproduit les résultats pour l'affirmer statistiquement.

Critique du protocole expérimental

Une objection qui pourrait être faite à ce niveau de l'étude est que nous n'avons pas mesuré l'efficacité des traitements fongicides, mais plutôt la capacité des spores à germer lorsqu'elles sont prélevées avec le protocole que nous utilisons. Dans le cas où elles ne germent pas, cela pourrait aussi bien être dû à l'efficacité du traitement qu'à une diffusion du fongicide au travers du milieu de culture lors du contact, inhibant la germination localement, cet effet disparaissant si la spore venait à se réenvoler pour se déposer ailleurs. Afin d'invalider cette critique, nous avons fait sédimer des spores fongiques sur des boîtes de petri ayant ou n'ayant pas été en contact avec des surfaces propres et traitées avec l'un ou l'autre des fongicides. Une fois à l'étuve, nous n'avons pas observé de différence de croissance entre les différentes boîtes.

Signalons ici la difficulté à compter les colonies d'*Aspergillus niger*. La croissance est extrêmement rapide et il s'écoule seulement quelques heures entre le moment où les colonies sont facilement discernables et le moment où elles ont formé un tapis sur le milieu. Nous avons constaté lors d'expériences ultérieures que les milieux de cultures au malt améliorent légèrement la situation car les colonies sont plus nettement délimitées. Nous avons par conséquent fait le choix de retirer les

boites de l'étuve après 48 *h* pour les laisser à l'ambient, afin de ralentir la croissance et élargir la durée durant laquelle les colonies sont suffisamment développées mais pas trop pour être précisément comptées. L'inconvénient est que d'une expérience à l'autre, les conditions de croissance ne sont pas strictement identiques.

4.4 Conclusion

Nous avons montré qu'un traitement préalable d'une surface avec une solution fongicide permet d'inhiber la croissance fongique pouvant résulter d'une déposition ultérieure de spores, démontrant ainsi son efficacité et sa rémanence. Nous avons également constaté que les spores aérosolisées par soufflage direct étaient plus sensibles aux traitements fongicides que les spores aérosolisées par nébulisation. Nous ne savons pas si cela provient d'une perte de viabilité des spores aérosolisées par voie sèche, ou au contraire d'une sélection des spores les plus résistantes par le nébuliseur Collison. Nous avons observé que pour un même traitement, il n'y avait pas de différence significative entre les différents matériaux testés ; en revanche, pour un même matériau, différents traitements peuvent avoir des efficacités significativement différentes.

Chapitre 5

Réenvol de particules

5.1 Éléments de théorie

Lorsqu'elles se déposent sur une surface, les petites particules y sont maintenues par des forces de grande intensité qui sont une somme d'attractions physiques, de liaisons chimiques et de contraintes mécaniques. Cette somme de forces est généralement regroupée sous le terme unique de *force d'adhérence*. Des études, aussi bien théoriques qu'expérimentales, s'y intéressent depuis le milieu des années 60 [34, 77, 105, 69]. À partir du milieu des années 90, il devient difficile de parler de réenvol de particules sans évoquer les travaux du professeur Gennady Ziskind. Dans un article publié en 1995, ce dernier passe en revue l'état de l'art de la recherche sur la resuspension d'aérosols [148]. Quasi-simultanément, sont publiés un grand nombre d'articles sur le sujet, et la décennie qui suit est particulièrement prolifique. Il faut évoquer notamment la thèse de Abdelmaged Hafez Ibrahim Essawey publiée en 2004 [67] ainsi que ses travaux ultérieurs [63, 64, 65, 62, 66]. En 2006, G. Ziskind publie une nouvelle synthèse, où il cite plus d'une cinquantaine d'articles publiés à partir de 2000 [147]. Plus récemment, il faut également citer les travaux de thèse de Fan Zhang [146], ainsi que les articles qui suivent [144, 145], qui améliorent sensiblement l'approche statistique du modèle *Rock'n Roll* [108, 107].

Si ce domaine de recherche est aussi prolifique, c'est sans doute parce que ses applications sont très nombreuses, et dépassent largement le cadre de cet exposé. Elles sont aussi diverses que le nettoyage de tranches de semi-conducteurs en silicium [60], la détection d'explosifs [103], ou le comportement des particules dans les voies respiratoires [50], pour n'en citer que quelques-unes. Dans le cadre de notre étude, nous allons nous intéresser au cas de petites particules sphériques, soumises à un flux tangent à la surface sur laquelle elles sont déposées. Le but est de pouvoir extrapoler ces résultats au problème de l'adhésion et du réenvol de spores fongiques, la gamme de diamètres allant de $1 \mu m$ à $10 \mu m$ nous intéressant particulièrement. Nous élargirons cependant nos expérimentations à des particules de plus grand diamètre, jusqu'à $500 \mu m$.

Couche limite et sous-couche visqueuse

Lors de l'écoulement autour d'un obstacle, il existe ce que l'on appelle une couche limite. C'est une zone d'interface entre l'obstacle et le fluide environnant lors d'un mouvement relatif entre les deux. Son existence est due au fait que le fluide adhère aux parois de l'obstacle : la vitesse du fluide sur les parois de l'obstacle est égale à la vitesse de ces parois. C'est ce que l'on appelle la condition de non glissement : le fluide ne peut pas glisser sur l'obstacle. Ainsi, dans le référentiel

de l'obstacle, les vitesses sur les parois sont nulles tandis que les vitesses loin des parois sont égales à la vitesse de l'écoulement non perturbé, c'est à dire la vitesse que l'écoulement aurait s'il n'y avait pas d'obstacle. Sur une normale à la paroi, la vitesse varie donc entre zéro et un maximum, selon une loi dépendant de la viscosité du fluide. Plus ce dernier est visqueux, plus la transition est lente, et plus la couche limite est épaisse. Au sein de la couche limite, il existe une sous-couche dite visqueuse, dans laquelle le profil de vitesse est linéaire. Les spores fongiques que nous observons sont si petites qu'elles se trouvent dans la sous-couche visqueuse de la couche limite d'un écoulement turbulent.

Nombre de Reynolds

Le régime d'un écoulement peut-être de nature laminaire ou turbulente. Dans un écoulement laminaire deux particules fluides voisines à un instant donné restent voisines aux instants suivants, alors qu'un écoulement turbulent ne possède pas d'organisation apparente : la vitesse en tout point y présente un caractère tourbillonnaire. Contrairement aux écoulements laminaires, les écoulements turbulents se caractérisent par une apparence très désordonnée et un comportement difficilement prévisible.



FIGURE 5.1: Léonard de Vinci (1452-1519) s'est intéressé à l'étude des turbulences. Après lui, le domaine n'a plus progressé pendant presque 400 ans, jusqu'aux travaux d'Osborne Reynolds (1842-1912)

Ces régimes sont liés à la viscosité du fluide. Plus précisément, l'écoulement est caractérisé par un nombre sans dimension, le nombre de Reynolds, qui mesure l'importance relative des forces inertielles liées à la vitesse et des forces de frottement liées à la viscosité. Si les dernières sont prépondérantes, le frottement entre les couches fluides maintient leur cohésion et l'écoulement est laminaire. Dans le cas contraire, l'écoulement est déstabilisé, ce qui peut conduire à la turbulence.

Le nombre de Reynolds, noté Re , a été mis en évidence en 1883 par Osborne Reynolds.

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad (5.1)$$

Dans cette formule U est une vitesse caractéristique du fluide, L représente une dimension caractéristique de l'écoulement considéré et ν représente la viscosité cinématique du fluide. Nous verrons par la suite qu'il peut dans certains cas exister différentes façons de choisir ces valeurs caractéristiques. Nous obtiendrons alors différents nombres de Reynolds caractérisant différentes zones de l'écoulement considéré.

5.2 Montage expérimental

Description

Pour élaborer notre dispositif expérimental, nous nous sommes inspirés de celui décrit dans l'article publié par M.L. Zoetewij *et al.* [150]. Nous avons mis au point un banc d'essai permettant de soumettre des particules déposées sur un substrat à un flux soit tangentiel, soit ascendant (voir figure 5.2), et d'observer le réenvol des particules tangentiellement et perpendiculairement au plan, à l'aide d'une caméra ultra-rapide (jusqu'à 4000 images par secondes) montée sur un objectif microscopique ($\times 20$ MitutoyoTM NT46-145).

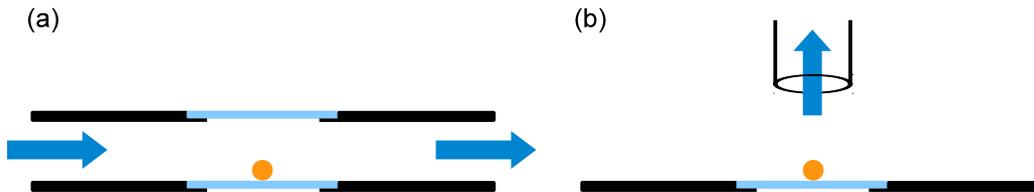


FIGURE 5.2: Schéma de la cellule centrale du dispositif de réenvol, en flux tangentiel (a) et en flux ascendant (b)

Dans la première configuration (figure 5.2.a), permettant d'obtenir un flux tangentiel, la cellule centrale est composée de deux éléments dissociables maintenus par des brides de serrage. L'étanchéité est assurée par un joint plat. La partie inférieure de la cellule centrale est creusée, de façon à pouvoir insérer une lame de microscope. Cette dernière servira soit directement de substrat, soit de support à un substrat différent. Nous avons en effet utilisé également du papier, ainsi que du mica. Le tout est fixé à des plateaux micrométriques Newport[®] nous permettant d'obtenir des réglages de positionnement fins. Un flexible vient se fixer sur la partie supérieure afin d'assurer l'aspiration par l'intermédiaire d'un aspirateur ménager placé en aval. La deuxième configuration (figure 5.2.b), permettant d'obtenir un flux ascendant, conserve uniquement la partie inférieure de la cellule centrale. Au dessus vient se placer une aiguille de 1 mm de diamètre, à laquelle est relié le même aspirateur par l'intermédiaire d'un flexible.

FIGURE 5.3: Dispositif expérimental de réenvol de particules



a - En haut à gauche, montage expérimental de réenvol de particules en configuration flux et observation tangentiels. Une fibre optique nous permet d'éclairer les particules.

b - En haut à droite, vue du dispositif expérimental en configuration flux tangentiel, mais avec le microscope placé au-dessus du substrat pour une observation normale, au bout duquel on aperçoit la caméra rapide.

c - Ci-contre, montage expérimental en configuration flux ascendant et observation latérale, avec un objectif macroscopique.

La photographie (5.3.a) permet d'observer les principaux composants de notre montage, en configuration tangentielle. À l'intérieur de la cellule centrale se trouve le substrat sur lequel ont été déposées les particules. Au dessus de ce substrat se trouve une première fenêtre permettant l'éclairage du substrat. Une deuxième fenêtre se trouve sur le côté, permettant l'observation tangentielle des particules déposées. On aperçoit le flexible connecté à la cellule centrale. Le dispositif mis en place permet également d'observer les particules par dessus, en les éclairant par dessous, comme on peut le voir sur la photographie (5.3-b). On peut y apercevoir la caméra rapide montée sur le microscope, la fenêtre d'observation tangentielle, ainsi que les profilés vissés aux murs sur lesquels tous les éléments peuvent translater. Fixer au mur l'ensemble du dispositif expérimental nous a permis de nous affranchir des vibrations transmises par le sol au travers des paillasses.

Dans la seconde configuration, afin d'obtenir une puissante aspiration ascendante, nous avons connecté le flexible à une aiguille de 1 mm de diamètre que nous avons placé au-dessus des particules observées, comme l'illustre la photographie figure (5.3-c). Cela nous a permis d'observer des phénomènes d'arrachement difficiles à obtenir lorsque le flux est tangentiel.

Gamme de vitesses

Étant donné la petite taille des particules observées, nous avons systématiquement travaillé en utilisant le débit maximal de notre aspirateur. Nous l'avons mesuré à l'aide d'un débitmètre à hélice, ce qui nous a permis d'en déduire la vitesse moyenne dans la cellule : $30 \text{ m/s} \pm 5 \text{ m/s}$. Nous avons confirmé cette mesure à l'aide d'un anémomètre à fil chaud placé à l'entrée de la cellule. Étant donné la faible épaisseur de la couche limite, cette vitesse moyenne est pratiquement égale à la vitesse de l'écoulement non visqueux U_∞ . Cependant cette vitesse n'est pas atteinte instantanément : les particules subissent une accélération du flux jusqu'à sa vitesse maximale. Les simulations numériques réalisées par la suite nous permettrons de déduire de la mesure de la vitesse de l'écoulement non perturbé, celle de la vitesse à mi-hauteur de la sphère, nous permettant de calculer la valeur du nombre de Reynolds local.

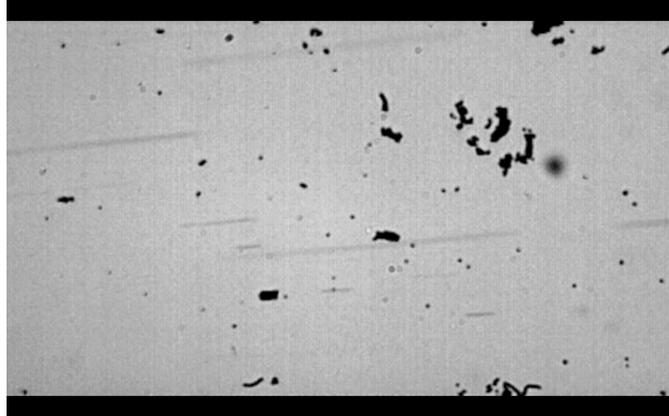
5.3 Observations

Nous allons présenter qualitativement l'ensemble des observations effectuées au cours de nos expériences de réenvol de particules, par ordre croissant de tailles de particules, en commençant par les spores d'*Aspergillus niger*. Le système de dépôt de thèses actuel ne permettant pas le dépôt de vidéos, nous avons inséré des captures d'écran au présent manuscrit, systématiquement associées à un lien internet permettant de voir la vidéo hébergée sur Vimeo, qui nous a semblé le service le plus adapté. Nous avons par ailleurs essayé de classer les différentes vidéos en fonction des phénomènes de réenvol observés, qui coïncident en général avec la taille des particules.

Réentraînement de spores fongiques

Nous avons utilisé des cultures d'*Aspergillus niger* que nous avons déposé sur des lames de verre en tamponnant les milieux de culture au dessus du substrat. Les spores se sont ainsi détachées individuellement ou en tas. Le flux est tangentiel et le débit maximal, ce qui nous donne une vitesse de l'écoulement non perturbé de 30 m/s . Dans le plan focal, nous observons que les spores se détachent peu, et qu'elles ont tendance à se recoller dans la foulée. Quelques tas, offrant plus de portée au flux, se détachent, et entraînent avec eux quelques spores isolées. On devine, hors du plan focal, que des spores détachées en amont se sont réenvolées. Il est impossible de dire ici

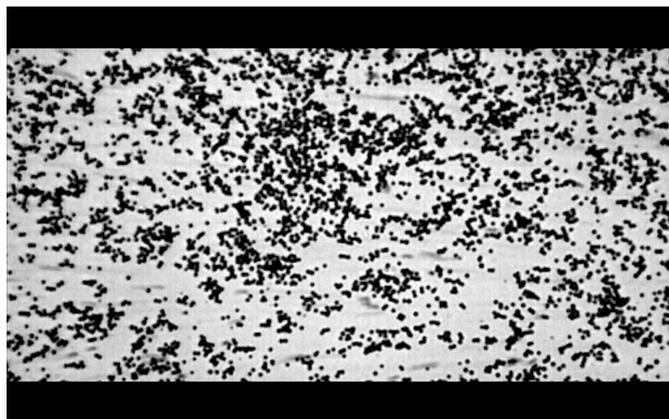
quel sont les mécanismes de détachement. Pour ce faire, il faudrait disposer d'un grandissement supérieur et d'un éclairage plus intense.



Réentraînement de spores fongiques : pour voir la vidéo : <https://vimeo.com/51613439>

Réentraînement de très petites particules

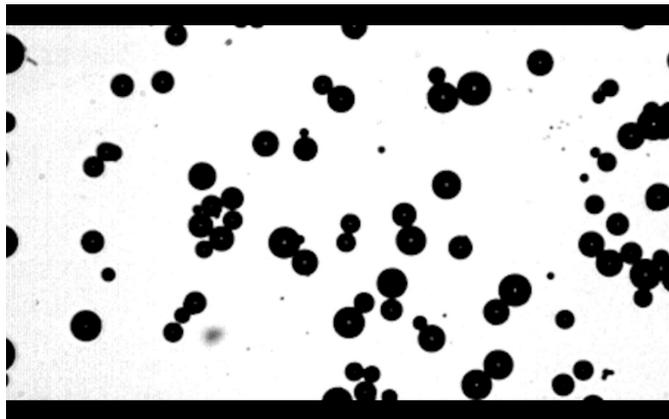
Nous avons déposé sur une lame de verre des billes de verre sphériques dans deux gammes de taille : $2-6 \mu m$ et $16-22 \mu m$. La première est proche de la taille des spores et nous observons des phénomènes similaires : peu de réenvoi, quelques réentraînements suivis de redéposition, quelques réenvols dus aux chocs avec des particules réentraînées en amont, et des particules réenvolées hors du champ focal. La deuxième gamme, plus grande, permet d'observer un réenvoi de la majorité des billes déposées. Il semble que les réenvols par choc avec des particules détachées en amont soit d'une importance prédominante.



Réentraînement de très petites particules : pour voir la vidéo : <https://vimeo.com/51608760>

Effet billard ou boule de neige

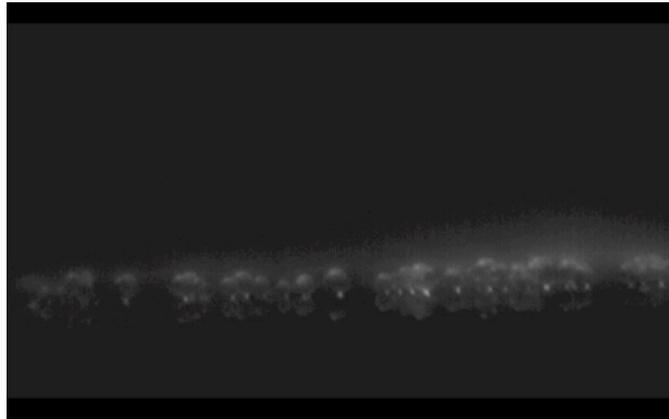
Nous avons utilisé des billes de verre sphériques d'un diamètre moyen de $100\ \mu\text{m}$, déposées sur une lame de verre. Nous les avons observées en deux zones : la première, en plein milieu du tapis de particules ; la seconde, sur le bord d'attaque, c'est à dire à l'endroit où le flux rencontre pour la première fois les particules. On constate que pratiquement aucune particule ne se décroche sur le bord d'attaque, alors qu'elles sont pratiquement toutes réentraînées dans la première zone. Cela montre bien l'importance de ne pas oublier, lorsque l'on adopte une approche statique avec une sphère isolée, comme ce sera le cas dans la partie suivante, que les réenvols peuvent également avoir lieu suite à un choc avec une autre particule. Les billes réentraînées semblent rouler mais il faudrait les observer latéralement pour confirmer cela.



Effet billard : pour voir la vidéo : <https://vimeo.com/51608757>

Réenvol par tas

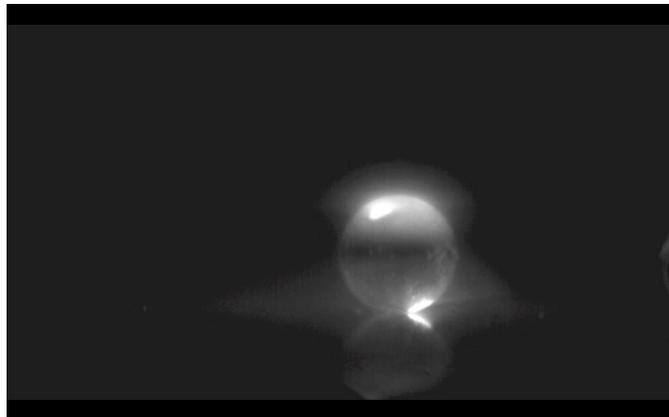
Nous avons utilisé des billes de verres sphériques d'un diamètre moyen de $100\ \mu\text{m}$, déposées sur une lame de verre. L'observation latérale à l'aide d'un objectif macroscopique permet de constater la formation de plusieurs couches, et on devine lors de leurs déplacement que les particules s'attirent entre elles, sans savoir si c'est sous l'influence de forces de van der Waals ou de forces électrostatiques. On observe en premier lieu le réenvol des couches supérieures, par tas. On assiste ensuite au réentraînement de particules isolées, qui roulent jusqu'à rencontrer un obstacle, par exemple une autre particule, ce qui cause à la fois le réenvol de la première et le réentraînement de la seconde. Cela met en évidence l'importance de la rugosité des particules et des substrats sur lesquels elles sont déposées. Étant donné notre niveau de grossissement, il faudrait utiliser des particules de taille supérieure pour réellement observer les mécanismes de réenvol.



Réenvol par tas : pour voir la vidéo : <https://vimeo.com/51608758>

Roulement

Nous avons à nouveau utilisé des billes de verre sphériques d'un diamètre pouvant aller jusqu'à $500 \mu\text{m}$, déposées sur une lame de verre. À cette taille, nous pouvons clairement observer le roulement des particules. La vidéo ne permet pas de dire si un réenvol a lieu ultérieurement. On constate également un phénomène de rebond lorsque les particules entrent en contact. Nous le justifierons dans la suite de l'exposé, mais signalons d'ores et déjà qu'à partir de cette taille, nous ne sommes plus du tout dans la couche limite de l'écoulement, et les particules subissent un flux turbulent, hors du cadre de ce travail. Nous avons réalisé les vidéos qui suivent par curiosité scientifique plus que par besoin pour la thèse.

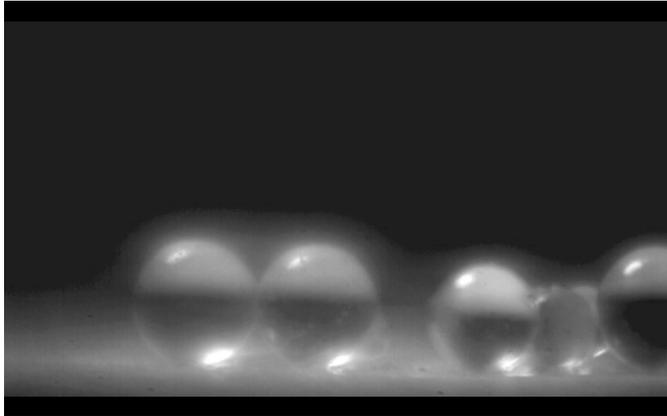


Roulement : pour voir la vidéo : <https://vimeo.com/51613440>

Rebond

Nous avons utilisé des billes de verre sphériques d'un diamètre pouvant aller jusqu'à $500 \mu\text{m}$, déposées sur une feuille de papier. On commence par observer une particule se réenvoler en en chevauchant une autre, et on constate que même à cette échelle, les forces d'attractions entre les

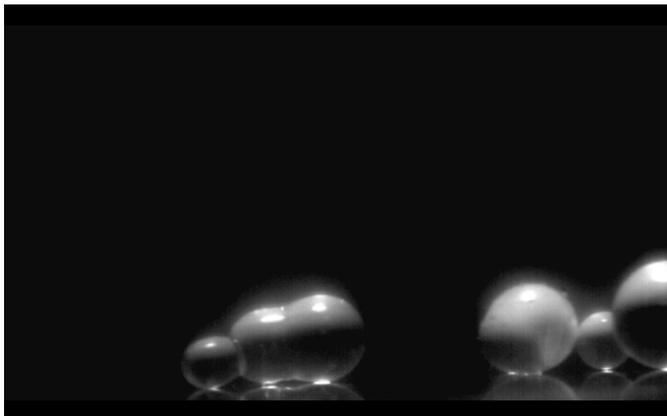
particules sont significatives : une particule sur le point d'être réentraînée est stoppée par une seconde. Comme précédemment, nous ne savons pas s'il s'agit de forces de van der Waals ou de forces électrostatiques, cette dernière hypothèse étant plausible puisque les particules comme le support sont diélectriques et soumis à un écoulement tangentiel d'air. On observe en outre des particules rebondir, ce qui est vraisemblablement dû aux propriétés mécaniques différentes du papier et du verre.



Rebond : pour voir la vidéo : <https://vimeo.com/51608764>

Glissement

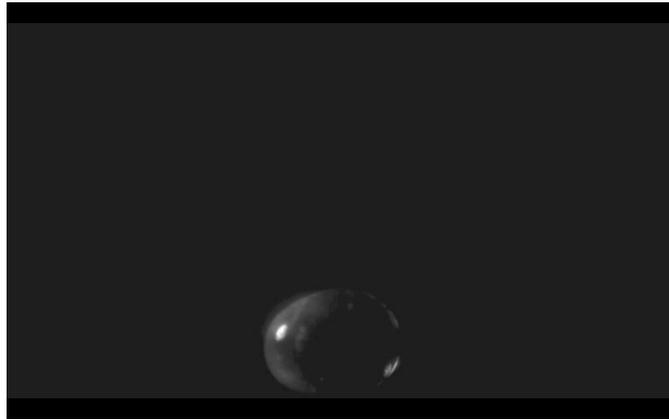
Nous avons utilisé des particules de verre d'un diamètre pouvant aller jusqu'à $500 \mu m$, déposées sur du mica fraîchement pelé. Le mica a la propriété d'être lisse à l'échelle atomique ; on constate d'ailleurs que les particules se réfléchissent nettement sur le support. Les conditions nécessaires à réentraîner une particule par glissement sont théoriquement très restreintes, comme l'illustre la figure (8.2) ; nous observons cependant des particules de forme asymétrique glisser sur le mica, ce qui s'explique par la très faible rugosité du mica et par la forte non sphéricité des particules.



Glissement : pour voir la vidéo : <https://vimeo.com/51608762>

Tourbillon et arrachement

Nous avons observé des particules réentraînées par roulement, et par glissement dans certains cas très particuliers. Nous n'avons pas observé de réenvol se faire autrement que par choc entre particules. Afin d'observer un réenvol par arrachement direct, nous avons utilisé la configuration en flux ascendant de notre dispositif expérimental. Nous avons utilisé des billes de verres d'un diamètre maximal de $500\ \mu\text{m}$, déposées sur une lame de verre. Nous observons alors la création d'un tourbillon, et si la particule observée est placée suffisamment proche de l'aplomb de l'axe de l'aiguille, alors elle reste immobile ou tourne sur elle même, comme si elle se trouvait dans l'œil du cyclone. Un déséquilibre peut alors faire qu'elle est entraînée dans le tourbillon, et éventuellement finit par être arrachée du support.



Tourbillon et arrachement : pour voir la vidéo : <https://vimeo.com/51613438>

Limitations

Nous avons effectué ces expériences à l'aveugle, sans avoir idée du nombre de Reynolds local de l'écoulement autour de nos particules. Nous verrons dans la partie suivante comment la simulation numérique peut nous permettre d'accéder à ces paramètres. Il aurait sans aucun doute été profitable de mener les simulations en parallèle des expérimentations, que ce soit pour des raisons de temps (les simulations demandant un certain temps de calcul, ce dernier peut être employé à travailler sur les expériences) ou parce que nous aurions pu optimiser les expérimentations en fonction des résultats des simulations, et viser plus juste en paramétrant nos simulations grâce au retour d'expérience fourni par les expérimentations.

La limitation principale de cette série d'expériences est la taille des particules observables : nous n'avons pas pu caractériser les mécanismes de réentraînement des spores fongiques, alors que c'est notre principal sujet d'étude. De plus, nous avons eu de grandes difficultés à éclairer suffisamment les particules, ce qui est indispensable lorsque l'on filme à grande vitesse, et également lorsque l'on réalise des observations microscopiques. Une réédition de cette expérience devra à tout prix améliorer ces deux paramètres que sont les puissances de grandissement et d'éclairage.

Chapitre 6

Spores fongiques et ventilateurs

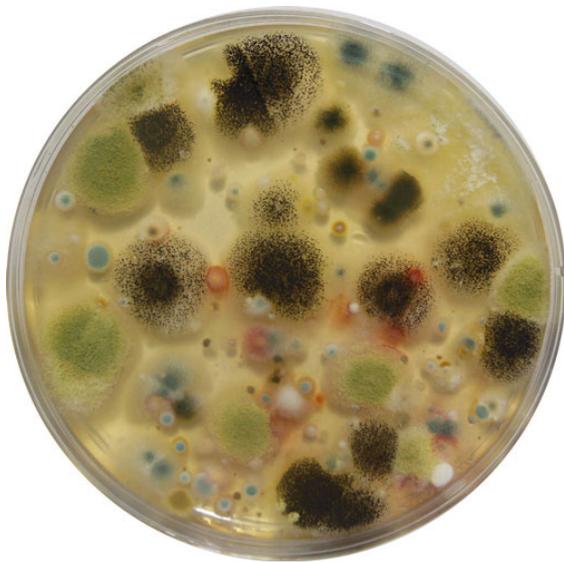


FIGURE 6.1: Mise en culture d'un prélèvement par écouvillonnage réalisé sur les pales d'un ordinateur portable du service de Pneumologie de l'Hôpital Saint-Louis

6.1 Introduction

Nous avons constaté dans le chapitre précédent que les spores d'*Aspergillus niger*, en raison notamment de leur petite taille, adhèrent fortement aux surfaces. Il est peu probable que des mouvements d'air de faible intensité, comme des courants d'air, entraînent leur réenvol. Il existe cependant certains cas particuliers où la déposition et le réenvol de spores se produit. C'est le cas des pales de ventilateurs, notamment les petits ventilateurs de refroidissement de dispositifs électroniques. Ces ventilateurs se rencontrent dans de nombreux appareils, comme les ordinateurs portables. Le but des travaux présentés dans ce chapitre est de déterminer si de tels appareils peuvent représenter un danger de contamination en milieu hospitalier.

La recherche étant une activité fortement non-linéaire [14], il arrive que certaines découvertes soient inattendues. Nous souhaitons à l'origine homogénéiser un aérosol de spores dans une cuve

en PMMA. Nous avons pour cela employé des ventilateurs de refroidissement d'ordinateurs, tels ceux que l'on trouve dans les unités centrales. Nous avons alors constaté que la concentration particulaire chutait plus rapidement que lors d'une sédimentation gravitationnelle, comme l'illustre la figure 6.2, dès que les ventilateurs étaient mis en fonction. Nous nous sommes alors demandé où étaient passées ces spores. Des prélèvements par boîte contact sur les pales des ventilateurs nous donnèrent la réponse.

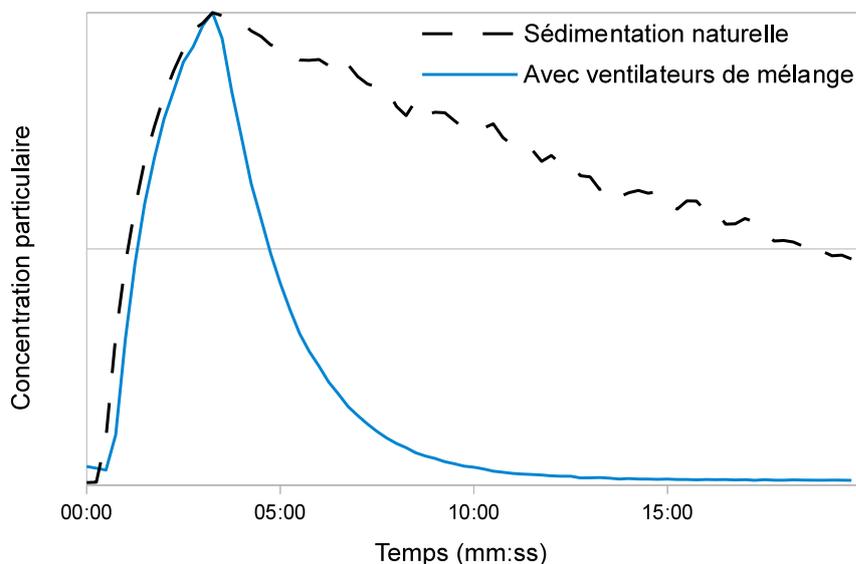


FIGURE 6.2: Comparaison de la diminution de la concentration d'un aérosol fongique dans une cuve en PMMA avec ou sans ventilateurs

Nous nous sommes alors demandé si les ventilateurs étaient également capables de relarguer les spores captées, et ainsi de contaminer une atmosphère saine. La réponse fut de nouveau positive. Il ne nous restait plus qu'à savoir si, en milieu hospitalier, de tels dispositifs étaient employés, et si l'on y trouvait effectivement des contaminants. Nous avons donc effectué des prélèvements dans divers services de l'hôpital Saint-Louis. La photographie (6.1), qui est une mise en culture d'un échantillon prélevé sur les pales d'un ventilateur d'ordinateur portable du service de pneumologie, parle d'elle-même.

6.2 Mise en évidence expérimentale

Matériel et méthodes

Le protocole mis en place comporte trois étapes schématisées figure 6.3 :

- (a) Contamination d'un ventilateur par l'air : un aérosol de spores est créé dans un espace confiné, dans lequel se trouve un ventilateur. Un fois ce dernier mis en marche, les spores fongiques adhèrent à ses pales et le contaminent. Le but est de démontrer qu'un ventilateur est capable de capter des spores.

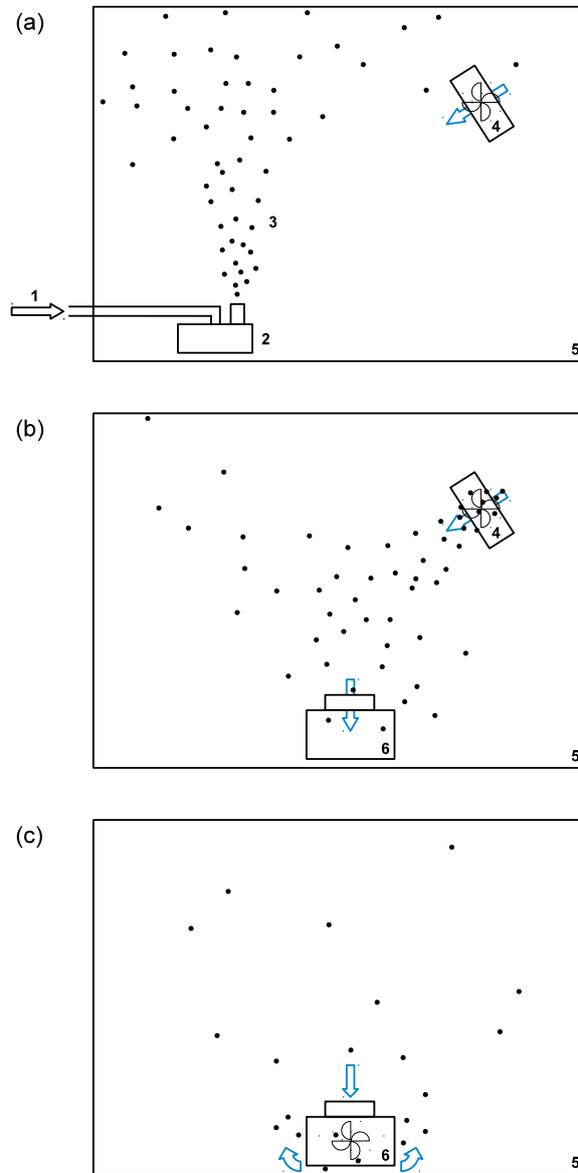


FIGURE 6.3: Les trois étapes du protocole expérimental : (a) contamination du ventilateur par l'air, puis (b) contamination de l'air par le ventilateur, et enfin (c) auto-contamination du biocollecteur. L'air sous pression (1) entre dans l'aérosoliseur (2) qui libère les spores (3). Le ventilateur (4) est contaminé, et peut alors contaminer l'air de la cuve (5) en retour, ce qui est attesté par le biocollecteur (6)

- (b) Contamination de l'air par un ventilateur : une fois le ventilateur contaminé, il est placé dans un espace confiné et propre, dans lequel se trouve également un biocollecteur. Les deux appareils sont mis en route simultanément. L'échantillon d'air collecté est ensuite analysé afin de déterminer s'il contient des spores fongiques. Le but est de démontrer que le ventilateur est capable de relarguer des spores préalablement captées dans une atmosphère contaminée.
- (c) Autocontamination du biocollecteur : le biocollecteur contient lui-même un ventilateur interne lui permettant d'aspirer l'air collecté. Ce ventilateur est susceptible d'avoir capté des spores lors de l'expérience précédente. Le biocollecteur est placé dans un espace confiné et propre, et un échantillon d'air est prélevé. Le but est de démontrer que le ventilateur interne du biocollecteur est capable de capter et relarguer des spores.

Nous avons réalisé toutes nos manipulations au sein de la cuve en PMMA décrite au chapitre (3.3), et utilisé un ventilateur couramment utilisé en micro-informatique (ProtechnicTM MGA12012LR-A25), d'un diamètre de 11,5cm. Nous avons contrôlé les concentrations particulières à l'aide un compteur particulaire portatif TSITM AeroTrack Handheld Particle Counter 9306 ; le DAF décrit au chapitre (3.2) et aérosolisé des spores d'*Aspergillus niger* issues d'une croissance sur boîte de petri d'une souche référencée fournie par le laboratoire de Parasitologie-Mycologie de l'Hôpital Saint-Louis à Paris. Enfin, nous avons utilisé un biocollecteur par impaction sur boîtes de petri ClimetTM Cl-95 (canal 2 μm à 5 μm) et des boîtes de petri OxoidTM de type Sabouraud glucosé au Chloramphénicol. Avant chaque nouvelle utilisation de la cuve, ses parois ont été frottées à l'éthanol et des prélèvements d'air et de surface (boîte de petri de type contact) effectués afin de s'affranchir de toute contamination parasite.

Clean Air Delivery Rate (CADR)

D'après nos mesures, la cinétique de décroissance de la concentration de spores dans la cuve suit une loi exponentielle, tout comme la sédimentation naturelle. On peut donc la modéliser de la même façon qu'au paragraphe (3.3) et mesurer son coefficient de diminution Δ (cf Figure 6.4 et Tableau 6.1).

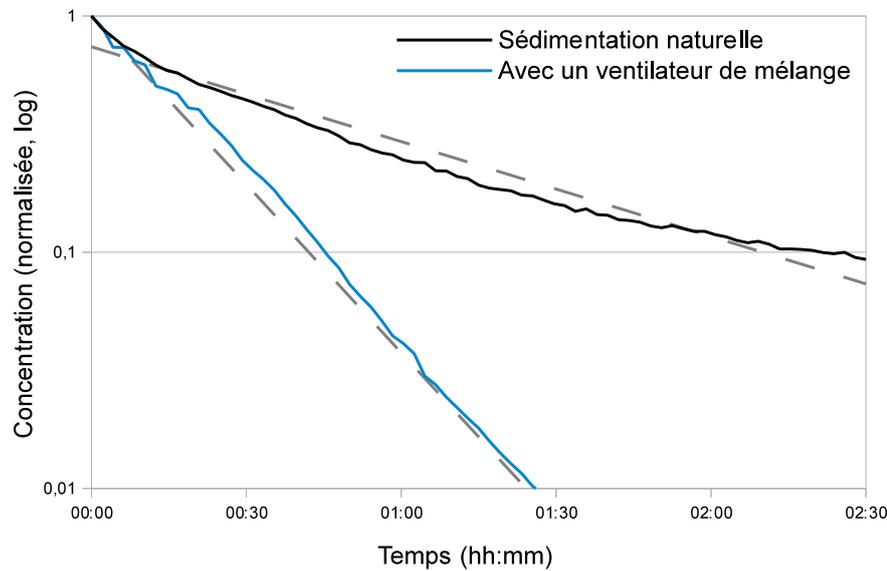
	Sédimentation naturelle	Avec un ventilateur
Δ (10^{-4} s^{-1})	3,37 (cf. tableau 4.1)	9,10

Tableau 6.1: Coefficient de diminution pour la sédimentation de spores fongiques avec un ventilateur

L'action du ventilateur s'apparente ici à celle d'un filtre, puisqu'il capture des particules. Afin de quantifier la capacité du ventilateur à capturer des spores, nous allons utiliser un outil spécifique aux filtres appelé *Clean Air Delivery Rate* (CADR), ou débit d'air propre. Le CADR mesure le débit volumique d'air ayant été nettoyé de toutes les particules d'une certaine taille durant un temps donné. Pour un filtre, c'est la fraction de particules filtrées multipliée par le débit volumique d'air traversant le filtre. Pour notre ventilateur, nous pouvons le définir ainsi :

$$CADR = V \cdot (\Delta_{\text{naturelle}} - \Delta_{\text{ventilateur}}) = 4,76 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (6.1)$$

V représente dans notre cas le volume de la cuve ($0,83 \text{ m}^3$) et non pas le débit au travers du ventilateur, car nous n'avons pas accès au nombre de particules impactant les pales chaque

FIGURE 6.4: Sédimentation de spores d'*Aspergillus niger* avec ou sans ventilateurs

seconde, mais nous avons accès au taux de particules qui sont capturées chaque seconde, que nous devons diminuer du taux de particules qui sédimentent de façon naturelle.

Ayant défini le CADR pour notre ventilateur, nous sommes alors capables de définir une efficacité, comme le rapport du CADR et du débit volumique à travers le ventilateur Q . Cela nous donne la fraction de particules qui sont capturées par les pales du ventilateur par rapport au total des particules qui le traversent. Le débit nominal annoncé par le constructeur étant 57 cfm ($1,61\text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$), nous avons donc :

$$\eta = \frac{CADR}{Q} = 1,77\% \quad (6.2)$$

Concrètement, cela signifie que le ventilateur que nous avons utilisé agit comme un filtre en capturant 1,77 % des particules d'une taille comprise entre $2\ \mu\text{m}$ et $5\ \mu\text{m}$ de l'air qu'il brasse.

Résultats

Tous les prélèvements effectués par le biocollecteur se sont avérés positifs. Cela signifie, d'une part, que le ventilateur que nous avons testé est capable de capter puis de relarguer des spores d'*Aspergillus niger*. D'autre part, le ventilateur interne du biocollecteur est également capable de capter et relarguer des spores ultérieurement. Nous avons donc mis en évidence un risque qui, à notre connaissance, n'était pas identifié.

6.3 Prélèvements en milieu hospitalier

La dernière étape a donc consisté à montrer que ce risque existe bel et bien en milieu hospitalier. Nous avons pour cela effectué des prélèvements dans différents services sensibles afin de savoir si les ventilateurs que l'on y trouve sont contaminés. Nous avons visité les services de Pneumologie et de Greffe de l'Hôpital Saint-Louis, dans lesquels nous avons effectué des prélèvements par écouvillonnage sur divers appareils comportant des ventilateurs : ordinateurs portables, imprimantes et unités centrales. Nous avons également, par curiosité, effectués des prélèvements sur des ventilateurs sur pied. Les prélèvements ont été étalés sur des boites au malt et étuvés à 30°C durant 3 jours. Les résultats sont présentés dans le tableau (6.2).

Absolument tous les prélèvements effectués se sont révélés positifs.

6.4 Conclusion

Nous venons de démontrer que les ventilateurs présents dans de nombreux dispositifs électroniques sont une source potentielle de contamination fongique de l'air. Cela représente un danger dans la mesure où les patients respirent par la suite l'air contaminé. Des précautions doivent être prises quand aux dispositifs pouvant entrer et sortir des chambres, voire circuler d'une chambre à l'autre, comme les ordinateurs portables, les biocollecteurs et les appareils de monitoring. L'ajout de filtres lorsque c'est possible, ou l'emballage dans une poche plastique étanche, voire le démontage pour décontaminer les parties internes peuvent être envisagés. Autrement, la circulation de tels objets dans des zones sensibles est à proscrire.

	Service de Pneumologie												Service de Greffe					
	Petits ventilateurs de refroidissement d'ordinateurs portables								Ventilateurs sur pied				Ventilateurs d'unités centrales				Impri-mantes	
Alternaria sp.	-	4	6	10	-	-	-	-	-	-	-	>20	-	-	-	-	-	-
Aspergillus flavus	2	7	1	-	1	-	-	2	6	7	-	2	-	-	-	-	-	-
Aspergillus fumigatus	16	11	1	10	8	10	-	15	-	3	2	-	-	-	-	-	-	-
Aspergillus niger	3	12	5	6	3	3	3	9	>20	9	5	3	-	-	1	-	-	-
Aspergillus Section usti	-	-	-	-	3	-	-	5	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-
Trichoderma sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-
Chrysonilia Sitophilina	-	-	-	-	-	-	nappe	-	nappe	-	-	-	-	-	-	-	-	nappe
Mucor sp.	nappe	-	nappe	-	-	-	-	-	-	-	nappe	-	-	-	-	-	-	-
Paecilomyces sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	>20	>20	>20	>20	-	-
Penicilium sp.	-	-	>20	>20	17	18	8	-	-	15	7	12	-	-	-	-	-	-
Champignons saprophytes divers	>20	>20	10	12	>20	10	>20	>20	>20	>20	10	>20	-	1	-	1	11	1

Tableau 6.2: Espèces fongiques identifiées après la mise en culture sur boîtes de pétri au malt de prélèvements par écouvillonnage sur les pales de différents ventilateurs d'appareils électroniques en milieu hospitalier. Chaque colonne correspond à un prélèvement et à une mise en culture. Les champignons non identifiés sont désignés sous l'appellation « c.s.d. » (champignons saprophytes divers).

Troisième partie

Simulation numérique

Avant-propos

Les travaux présentés dans cette partie ont été réalisés sur le site de Chatou d'EDF R&D, au sein du groupe I83 (Écoulements Monophasiques et Échanges Thermiques) du département MFEE (Mécanique des Fluides, Énergies et Environnement). Le lecteur néophyte pourra préalablement se reporter à l'annexe A afin de se familiariser avec les outils de la mécanique des fluides numérique. Le chapitre qui suit présente directement les résultats de simulations d'écoulements laminaires autour de motifs de sphères posées sur une paroi. Le dernier chapitre est un chapitre théorique qui fait le lien entre les simulations numériques et les expériences de réenvol du chapitre 5.

Le groupe I83 est responsable du développement et de la maintenance d'outils numériques dans les domaines de la mécanique des fluides monophasiques et du couplage fluide-thermique solide. C'est dans ce groupe qu'est développé le code de calcul open source *Code_Saturne* (<http://www.code-saturne.org>). Parallèlement, I83 se consacre également à des études industrielles utilisant ces codes et parfois des moyens expérimentaux. Ces études sont majoritairement commanditées par le SEPTEN (Service Études et Projets Thermiques et Nucléaires) et la DPN (Direction du Parc Nucléaire).

J'y ai été accueilli par Christian Beauchêne, qui a joué le rôle d'émulsifiant : il m'a permis de naviguer à travers les phases *a priori* non-miscibles que sont le milieu médical, la recherche académique et la recherche industrielle. Nous avons travaillé ensemble à renforcer les liens existant entre mon travail et ses applications médicales. C'est sous son impulsion que cette collaboration, initiée bien avant mon arrivée, a pu se poursuivre par mes travaux de thèse, grâce au financement de la Fondation EDF dans le cadre d'un *mécénat de compétence*. et à une bourse CIFRE (Conventions Industrielles de Formation par la REcherche) accordée par l'ANRT (Association Nationale de la Recherche et de la Technologie) sous la tutelle du Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

Dr. Sofiane Benhamadouche, pour filer la métaphore, a joué le rôle d'un catalyseur. Il m'a aidé, tout au long de mon séjour au sein de I83, à orienter mes recherches et à définir mes objectifs, ce que j'aurais été bien en peine d'accomplir seul. Arrivé en tant que parfait néophyte du calcul numérique, il m'a permis de m'approprier les outils indispensables à mon travail. Non seulement *Code_Saturne*, mais également *Salomé* pour le pré-traitement ainsi que *Ensignt* et *Paraview* pour le post-traitement. Sans parler de *xmgrace*, *matplotlib*, *Motörhead*, etc.

Chapitre 7

Écoulement autour de sphères

7.1 Introduction

Avant d'aborder ce chapitre, le lecteur néophyte pourra trouver en annexe A une initiation au calcul numérique ou seront présentés tous les éléments théoriques nécessaires à la compréhension de ce qui suit. Y sont introduits la modélisation mathématique en mécanique des fluides, ainsi que la simulation numérique en mécanique des fluides, suivis par quelques notions sur le maillage et enfin une courte présentation de *Code_Saturne*.

Nous présentons dans ce chapitre les résultats de simulations d'écoulements laminaires autour de sphères isolées puis en groupe. Afin de valider la cohérence de notre approche, nous avons commencé par étudier le cas simple de l'écoulement autour d'une sphère libre. Ce cas étant largement documenté dans la littérature scientifique, cette étude nous a permis de confronter les résultats de nos simulations à de nombreuses mesures expérimentales. Nous avons poursuivi par l'étude de l'écoulement autour d'une sphère posée sur une paroi. Nous avons établi les caractéristiques de l'évolution des coefficients de traînée et de portance de la sphère posée en fonction du nombre de Reynolds. Nous avons ensuite fait de même avec des paires de sphères selon deux orientations et divers écarts. Nous avons enfin simulé l'écoulement autour d'une sphère située au milieu d'une infinité d'autres sphères. Avant de présenter ces résultats, afin de clarifier la suite de l'exposé, nous commencerons par rappeler les définitions précises des divers coefficients adimensionnels que nous allons employer.

Traînée et portance

Lorsqu'un fluide rencontre un obstacle et le contourne, il exerce des efforts sur ce dernier. Ces efforts sont dus à la pression ressentie par l'obstacle, ainsi qu'à la viscosité du fluide. La somme des efforts \vec{F} exercés par le fluide sur un obstacle peut s'exprimer simplement en fonction du tenseur des contraintes visqueuses $\bar{\tau}$, en intégrant, sur la paroi de l'obstacle, le résultat de son produit avec une normale à cette paroi.

$$\vec{F} = \int_{\partial S} \bar{\tau} \times \vec{n} \, dS \quad (7.1)$$

Notons que cette force peut se décomposer en deux contributions : celle de la pression isostatique et celle de la viscosité du fluide. La contribution visqueuse correspond aux efforts exercés

tangentiellement à la surface de l'obstacle, tandis que la contribution de la pression correspond aux efforts exercés normalement.

$$\vec{F} = \int_{\partial S} p \cdot \vec{n} \, dS + 2\mu \int_{\partial S} \vec{s} \times \vec{U} \, dS \quad (7.2)$$

avec : $\vec{s}_{i,j} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ tenseur du taux de déformation

La traînée est la force qui s'oppose au mouvement d'un corps dans un liquide ou un gaz. Mathématiquement, c'est la composante des efforts exercés sur le corps dans le sens opposé à la vitesse relative du corps par rapport au fluide. Pour l'obtenir il suffit donc de projeter la force résultante (7.1) sur la direction de l'écoulement :

$$\vec{F}_D = \int_{\partial S} \vec{\tau} \times \vec{n} \, dS \cdot \frac{\vec{U}_\infty}{\|\vec{U}_\infty\|} \quad (7.3)$$

L'analyse dimensionnelle montre qu'elle peut également s'écrire sous la forme

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot S \cdot U_{1/2}^2 \quad (7.4)$$

où ρ est la masse volumique du fluide, U_∞ la vitesse loin de l'obstacle, S la surface de référence qui sera ici le disque de même rayon que la sphère, et C_D le coefficient de traînée. Cette formule ne repose sur aucune donnée physique, et ne permet pas d'affirmer que la traînée est proportionnelle au carré de la vitesse. Elle permet seulement d'organiser de manière rationnelle des résultats d'essais en présentant le coefficient de traînée, nombre sans dimension, comme une fonction d'autres nombres sans dimensions. Ce dernier s'exprime alors comme suit :

$$C_D = \frac{2 \cdot F_D}{\pi \cdot \rho_f \cdot r_p^2 \cdot U_{1/2}^2} \quad (7.5)$$

De la même façon, nous pouvons définir la force de portance comme la composante de la force subie par un corps en mouvement dans un fluide qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement. Elle se définit de façon similaire à la force de traînée. Nous la noterons F_L et on peut alors définir un coefficient de portance C_L comme suit :

$$C_L = \frac{2 \cdot F_L}{\pi \cdot \rho_f \cdot r_p^2 \cdot U_{1/2}^2} \quad (7.6)$$

Nombre(s) de Reynolds

Rappelons l'expression générale du nombre de Reynolds, faisant intervenir une vitesse U et une longueur L caractéristiques de l'écoulement et de l'obstacle considérés, ainsi que la viscosité dynamique ν du fluide.

$$Re = \frac{U \cdot L}{\nu} \quad (7.7)$$

Dans le cas de l'écoulement autour d'une sphère, le choix le plus immédiat pour les grandeurs caractéristiques U et L est de prendre la vitesse de l'écoulement non perturbé U_∞ et le diamètre de la sphère d_p . Nous appellerons ce premier nombre le nombre de Reynolds global.

$$Re_G = \frac{U_\infty \cdot d_p}{\nu} \quad (7.8)$$

Ce choix est sans équivoque dans le cas d'une sphère libre. Cependant il pose un problème dans le cas de l'écoulement autour d'une sphère posée sur une paroi. En effet, la vitesse de l'écoulement non-perturbé et le diamètre de la sphère caractérisent l'écoulement en deux zones dont les caractéristiques sont fondamentalement différentes : l'écoulement non perturbé, qui ne voit pas l'obstacle, et la couche limite, où l'influence de l'obstacle sur l'écoulement est prépondérante. Il est alors judicieux de définir deux nombres de Reynolds spécifiques à ces deux zones. Nous appellerons le premier, caractérisant l'écoulement autour de la sphère dans la couche limite, le nombre de Reynolds local, et remplacerons U_∞ par la vitesse $U_{1/2}$ de l'écoulement au centre de la sphère, si cette dernière était retirée de l'écoulement.

$$Re_L = \frac{U_{1/2} \cdot d_p}{\nu} \quad (7.9)$$

Dans le cas d'une sphère posée sur une plaque plane semi-infinie, nous pouvons définir l'abscisse de la sphère x_p comme la distance entre cette dernière et le bord de la plaque. Cela nous permet de définir le nombre de Reynolds de paroi en remplaçant le diamètre de la particule d_p par son abscisse.

$$Re_P = \frac{U_\infty \cdot x_p}{\nu} \quad (7.10)$$

La donnée de x_p équivaut à la donnée de l'épaisseur de la couche limite δ_{x_p} en x_p , et il est possible d'explicitier cette dépendance. Le lecteur désirant connaître le détail de ce calcul pourra se reporter à l'annexe (B) où est établie l'équation (B.10), qui nous permet d'écrire :

$$\delta_{x_p} \sim \frac{x_p \cdot U_{1/2}}{U_\infty} \quad (7.11)$$

Il est important de bien faire la différence entre toutes ces définitions du nombre de Reynolds. Expérimentalement et numériquement, il ne nous est possible de fixer que la valeur des nombres de Reynolds global et de paroi, puisque c'est la vitesse U_∞ que l'on choisit. La vitesse $U_{1/2}$, et donc le nombre de Reynolds local, sont déterminés indirectement.

À l'exception du cas de la sphère libre, où le choix du nombre de Reynolds est sans équivoque, notre façon de procéder au cours de toutes les simulations présentées par la suite a été la suivante. Nous avons choisi un nombre de Reynolds de paroi, ce qui revient à choisir une abscisse x_p ; ou de façon équivalente à choisir une épaisseur de couche limite δ , déterminant le profil de vitesse auquel la particule fera face. Ceci fait, nous avons fait varier le nombre de Reynolds global, ce qui revient à faire varier la vitesse de l'écoulement non perturbé U_∞ , de façon à balayer une large gamme de vitesses. L'écoulement local autour de la particule, et donc le nombre de Reynolds local, était entièrement déterminé par les choix précédents. Ainsi, une fois Re_P fixé, Re_L dépend uniquement de Re_G . Cette dépendance est illustrée par la courbe de la figure 7.1, issue de nos simulations de l'écoulement autour d'une sphère posée. Son allure n'est pas sans nous rappeler l'allure de la figure (B.2) représentant la fonction f de l'équation de Blasius (se reporter à l'annexe (B) pour plus de détails).

Condition de Courant-Friedrichs-Lewy

La condition de CFL (du nom des mathématiciens Richard Courant, Kurt Friedrichs et Hans Lewis), consiste en un critère de convergence pour résoudre certaines équations aux dérivées partielles. Elle sert à donner le seuil dimensionnel sous lequel on observe une instabilité de calcul,

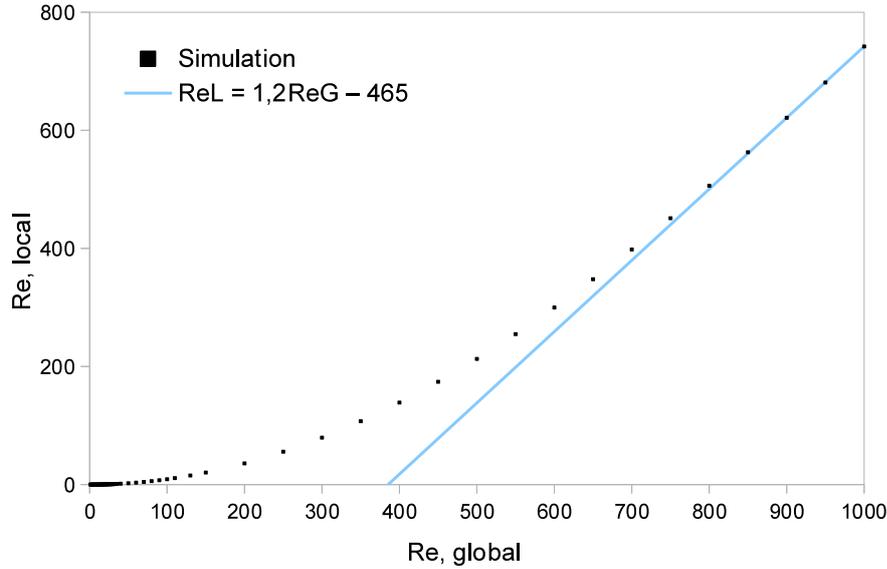


FIGURE 7.1: Évolution du nombre de Reynolds local en fonction du nombre de Reynolds global, pour une sphère posée sur un plan semi-infini. Le nombre de Reynolds de paroi fixé à 32 400, ce qui correspond à une abscisse x_p égale à 66 rayons de sphère, cf (B)

erreur d'approximation dans les calculs numériques, grandissant rapidement au fur et à mesure des calculs. Si la dimension du maillage est inférieure à la distance parcourue dans l'intervalle de pas de temps par l'onde la plus rapide que permet l'équation, l'erreur grandit et envahit la solution physique. Pour exprimer ce critère, on définit le *nombre de Courant*, sans dimension, noté Co :

$$Co = v \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (7.12)$$

Notre maillage comportant de grandes disparités de tailles de cellules, il était difficile de choisir le pas de temps de façon à obtenir un Co proche de l'unité, en particulier lors de calculs à faible nombre de Reynolds. Nous avons par conséquent utilisé un pas de temps variable en temps et en espace, c'est à dire choisi différemment à chaque pas de calcul en fonction de la maille considérée, de façon à obtenir un Co maximal aussi proche que possible de l'unité. *Code_Saturne* prend en charge les pas de temps variables par l'intermédiaire de l'option `idtvar = 2` dans le fichier utilisateur `usini1.f90`.

7.2 Sphère libre

Comme nous l'avons évoqué précédemment, la littérature scientifique est riche d'expérimentations relatives à l'écoulement autour de sphères en chute libre. En simulant ce cas simple, nous avons souhaité valider la pertinence de notre approche numérique avant d'aborder des cas plus délicats. Nous avons calculé numériquement les valeurs du coefficient de traînée d'une sphère libre soumise à un écoulement laminaire, en fonction du nombre de Reynolds de l'écoulement. Nous avons ensuite comparé nos résultats aux données disponibles dans la littérature.

Maillage

Nous nous sommes imposé une contrainte forte en terme de maillage en réalisant un maillage composé exclusivement de cellules hexaédriques, structuré et conforme. Le maillage réalisé comporte 700 000 cellules. Le point délicat dans la conception de ce maillage est la zone proche de la sphère. De façon schématique, nous avons inclus la sphère dans un cube, dont nous avons maillé les côtés d'un simple quadrillage. Nous avons ensuite projeté le maillage des côtés du cube sur la sphère.

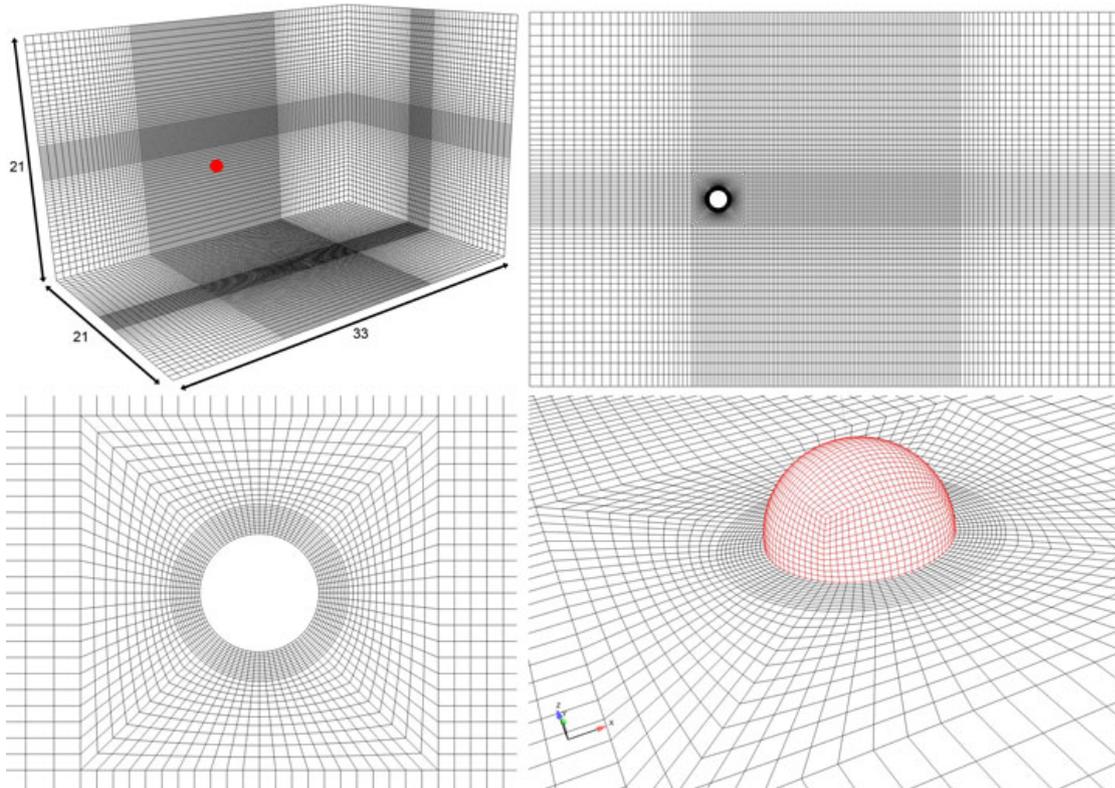


FIGURE 7.2: Différentes vues du domaine de calcul de l'écoulement autour d'une sphère libre. La distance en amont de la sphère est de 10 rayons, et en aval de 22 rayons.

À ce niveau de l'étude, une analyse rigoureuse aurait nécessité que nous réalisions une étude de convergence en maillage. Nous ne l'avons pas fait car nous avons choisi de valider directement notre simulation en comparant ses résultats avec les mesures expérimentales disponibles dans la littérature. Nous réaliserons par la suite une telle étude de convergence, lorsque l'absence de mesures expérimentales ne nous permettra pas de valider notre simulation *a posteriori*.

Options numériques

Nous avons appliqué une condition aux limites de type `inlet` en amont de la sphère, qui consiste à imposer une vitesse, que nous avons choisie constante sur l'ensemble de la face d'entrée. En aval, nous avons imposé une condition aux limites de type `outlet` sur toute la surface de

sortie. À la surface de la sphère, nous avons imposé une condition aux limites de type `wall`, c'est à dire une condition de non-glissement imposant une vitesse nulle à la surface de la sphère. Enfin, pour toutes les surfaces latérales restantes, nous avons imposé une condition aux limites de type `symmetry`, équivalente à une condition `wall` avec glissement : la vitesse doit être parallèle à ces surfaces.

Bien que l'écoulement soit laminaire, nous n'avons pas utilisé le module laminaire du code, car celui-ci utilise un schéma en temps d'ordre 1. Nous avons souhaité utiliser un schéma en temps d'ordre 2. Pour ce faire, nous avons utilisé le module LES avec une constante de Smagorinsky nulle, ce qui équivaut au final à faire de la DNS en écoulement laminaire. Le choix d'un pas de temps variable en temps et en espace nous permet d'obtenir un Co maximum exactement égal à 1 partout. Nous avons choisi un nombre d'itérations tel que l'ensemble des variables calculées ait convergé, comme l'illustre le graphe de la figure 7.3.

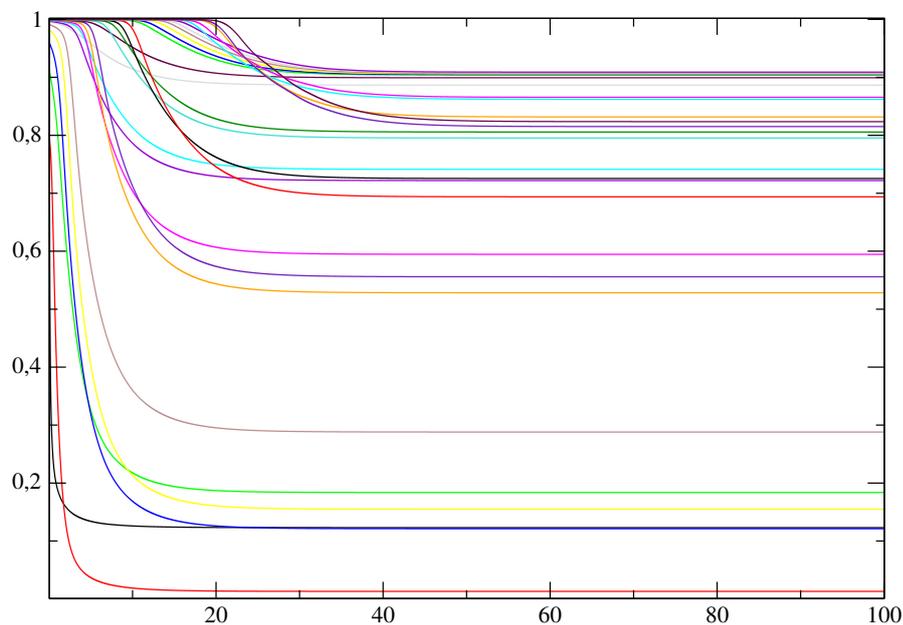


FIGURE 7.3: Convergence de la composante axiale de la vitesse, au bout de 10 000 itérations, en différents points répartis au hasard dans le domaine de simulation, y compris dans le sillage de la sphère.

Validation de l'approche

La littérature est pléthorique au sujet de la force de traînée s'exerçant sur des sphères en chute libre dans un fluide. De nombreuses expériences ont été menées à ce sujet tout au long du XX^e siècle. Cependant ces données n'ont pas toutes la même précision, et certaines expériences ont été biaisées par des dispositifs expérimentaux mal dimensionnés. Par exemple, nombre d'entre elles ont été réalisées dans des cylindres de diamètre trop faible pour que l'influence des bords soit négligeable.

En 2003, les professeurs Brown et Lawler publient un article dans lequel ils entreprennent de compiler toutes les données disponibles à ce sujet [23]. Ils éliminent les données jugées trop peu précises et corrigent les effets de bords des autres en utilisant des modèles empiriques. Au final, ils présentent une série de 480 points pour un nombre de Reynolds variant entre $2 \cdot 10^{-3}$ et $2 \cdot 10^5$. Nous avons confronté nos résultats numériques à cette série de données.

Afin de calculer la force exercée sur la sphère, et d'en déduire le coefficient de traînée, nous avons sommé la pression exercée sur chaque cellule de bord de la sphère, en la multipliant par la surface de la cellule concernée. Les résultats de trente simulations pour un nombre de Reynolds compris entre 1 et 200 sont présentées dans le graphe (7.4), où elles sont également comparées aux données des professeurs Brown et Lawler, ainsi qu'à la solution analytique d'Euler en $\frac{24}{Re}$.

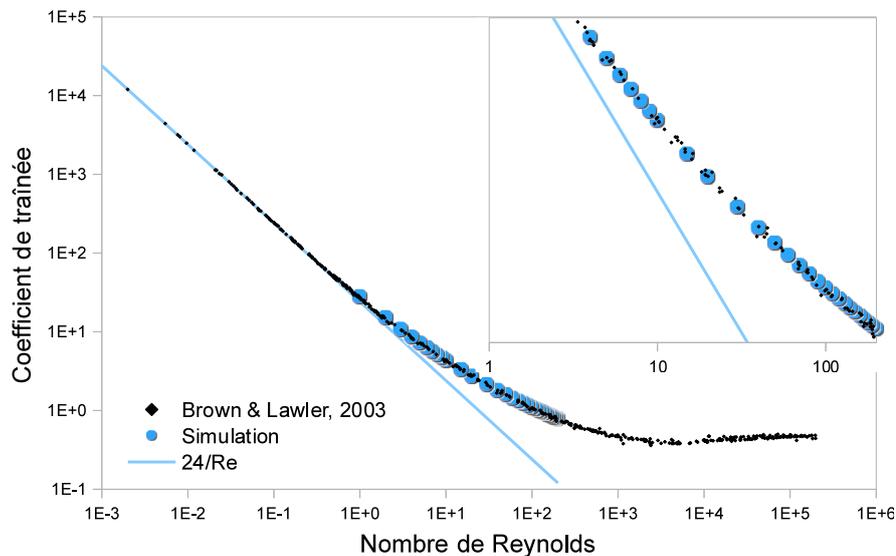


FIGURE 7.4: Coefficient de traînée d'une sphère libre en fonction du nombre de Reynolds de l'écoulement

7.3 Sphère posée

Ayant validé la pertinence de notre approche dans un cas simple, nous allons maintenant aborder le problème qui nous intéresse directement, en calculant les forces qui s'exercent sur une particule adhérent à une paroi et soumise à un flux d'air. Le but final est de parvenir à établir un critère numérique de ré-entraînement des particules qu'il soit possible d'implémenter dans une simulation ultérieure de type lagrangienne.

Géométrie et maillage

La géométrie de l'écoulement considéré présente une singularité au niveau du contact entre la sphère et le plan. En effet, nous ne pouvons pas mailler l'écoulement autour d'un contact ponctuel; et même si le contact est surfacique, il présentera des angles trop aigus qui nuiront à la qualité des mailles au voisinage du contact. Nous avons contourné cette difficulté en posant la

sphère sur un socle cylindrique de hauteur un vingtième de rayon. Cette simplification a malgré tout un sens physique car un contact ponctuel générerait une contrainte infinie au point de contact.

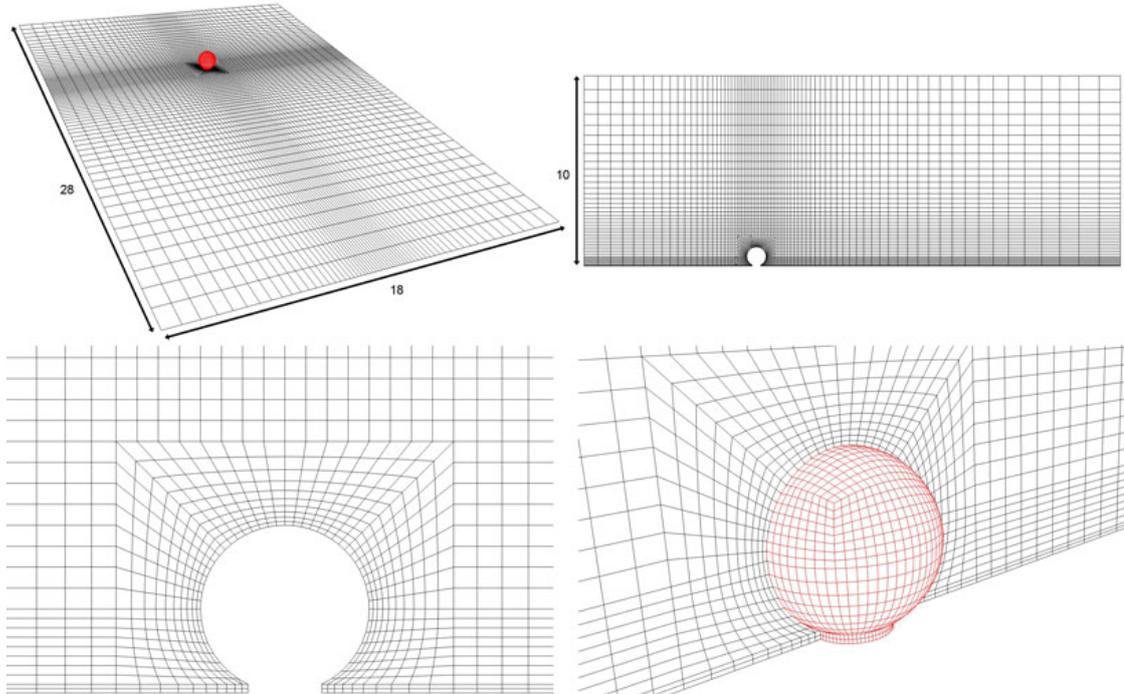


FIGURE 7.5: Différentes vues du domaine de calcul de l'écoulement autour d'une sphère posée sur une paroi. La distance en amont de la sphère est de 9 rayons, et 19 rayons en aval.

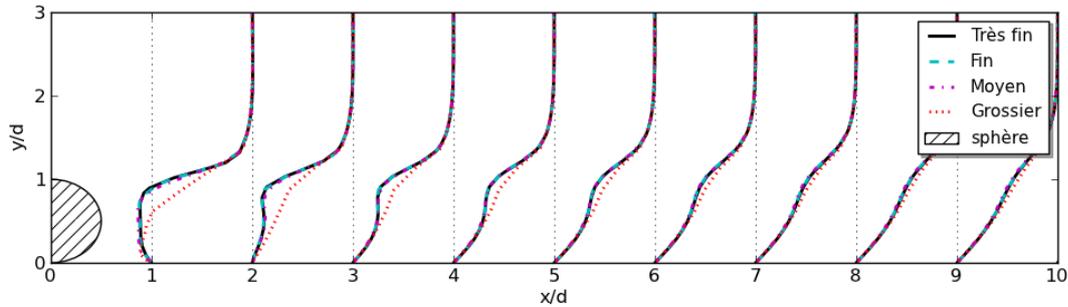
En conservant les mêmes contraintes fortes que précédemment, le domaine s'avère un peu plus délicat à mailler. En posant la sphère sur une paroi, nous perdons la symétrie sphérique qui nous avait permis d'inclure la sphère dans un cube dont nous avons projeté les côtés sur la sphère. Nous avons donc divisé la sphère en deux hémisphères. L'hémisphère supérieur a été maillé de la même façon que pour la sphère libre. L'hémisphère inférieur a quand à lui été divisé en quartiers afin d'exploiter la symétrie de révolution autour de l'axe sphère-plan.

Étude de convergence en maillage

Lors d'une simulation numérique, il convient de s'assurer que le maillage utilisé est suffisamment fin, mais pas non plus trop fin, ce qui allongerait les calculs sans apporter de précision supplémentaire. Pour cela on effectue une étude de raffinement. Nous ne l'avons pas fait pour l'étude de l'écoulement autour d'une sphère libre car nous disposions de mesures expérimentales auxquelles comparer nos résultats, ce qui n'est pas le cas ici. Signalons cependant que le maillage réalisé pour l'écoulement autour d'une sphère libre était probablement trop fin par rapport à notre besoin : une étude de raffinement nous aurait peut-être épargné du temps de calcul.

Nous avons donc réalisé différents maillages de finesses croissantes, calculé l'écoulement autour de la sphère, et comparé les profils de vitesse obtenus, représentés sur le graphe (7.6).

FIGURE 7.6: Profils de vitesses en aval d'une sphère en fonction de la finesse du maillage utilisé



Maillage	Nombre d'hexaèdres	C_D	C_L
Grossier	26 000	1,19	0,42
Moyen	210 000	1,20	0,30
Fin	710 000	1,21	0,31
Très fin	1 680 896	1,20	0,31

FIGURE 7.7: Étude de raffinement du maillage : précision de calcul des coefficients de trainée et de portance

Le tableau (7.7) représente l'évolution des coefficients de trainée et de portance en fonction de la finesse des maillages utilisés. On constate qu'au delà d'un maillage moyennement raffiné de 210 000 éléments, le gain de précision ne justifie pas le doublement du temps de calcul. Nous avons donc effectué toutes les simulations dont les résultats sont présentés ci-après avec ce maillage. Il comporte 1400 faces de bord sur la surface de la sphère, socle cylindrique compris, ce dernier étant divisé en deux couches dans son épaisseur.

Options numériques

À l'exception de la face d'entrée, les conditions aux limites appliquées sont identiques aux cas de la sphère libre. Notons que nous avons appliqué une condition aux limites de type `wall` à la plaque plane. La face d'entrée étant en contact avec la paroi, nous avons nécessairement besoin d'imposer un profil de vitesse en entrée. Nous ne connaissons pas à priori ce profil de vitesse. Nous avons de bonnes raisons de penser, étant donné la petite taille des particules étudiées, que ces dernières sont immergées dans la sous-couche visqueuse de la couche limite. Cela implique que le profil de vitesse auquel elles font face est linéaire. Néanmoins, nous ne connaissons pas la pente de ce profil, ou de façon équivalente le taux de cisaillement.

Nous avons donc fait le choix de calculer analytiquement le profil de vitesse d'un écoulement parallèle à une plaque plane semi-infinie. Le détail de ce calcul se trouve au chapitre B. La simplification des équations de Navier-Stokes, compte-tenu des particularités de l'écoulement sur une plaque plane, permet d'obtenir un système d'équations différentielles du premier ordre

pouvant être résolu numériquement et à la précision voulue. Les profils de vitesses obtenus sont appelés profils de Blasius, et présentent la propriété d'être autosimilaires. Cela signifie qu'ils conservent exactement la même forme tout au long de leur évolution le long de la paroi, et changent seulement d'échelle : ils sont « étirés ». On observe également qu'une certaine portion du profil peut-être approximée par un profil linéaire, ce qui confirme notre intuition de départ. La figure 7.8 représente le profil de vitesse que nous avons appliqué au cours de nos simulations.

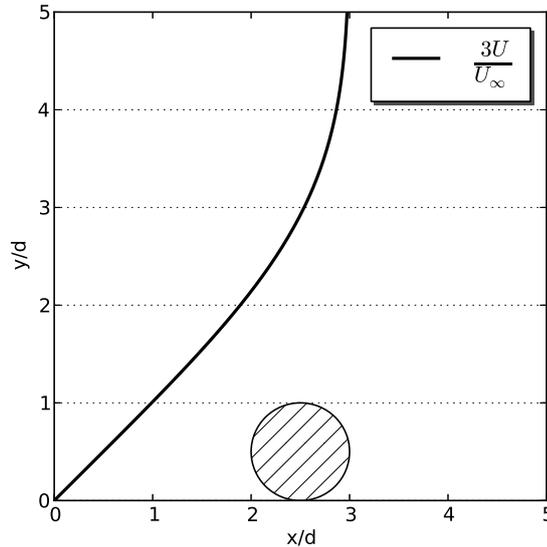


FIGURE 7.8: Profil de vitesse utilisé en entrée lors de nos simulations. Les unités de distance sont indiquées en rayons de sphère, et la vitesse en unité arbitraire. Le profil correspond au développement d'un profil de Blasius à une distance de 66 rayons de sphères du bord de la plaque.

Nous avons fixé le nombre de Reynolds de paroi à 32 400, ce qui correspond à placer la sphère à une distance de 66 rayons du bord de la plaque. De cette façon, nous sommes assez loin pour nous affranchir d'effets de bords éventuels et soumettre la particule à un profil de vitesse de Blasius complètement développé. Mais si nous avons choisi précisément cette valeur, c'est pour pouvoir comparer nos résultats à ceux de Sweeney & Finlay [127], qui sont les seuls, à notre connaissance, à avoir simulé l'écoulement laminaire d'un fluide autour d'une sphère posée sur une paroi.

Résultats

Les résultats de 45 simulations sont présentés sur la figure (7.9). Ils représentent l'évolution des coefficients de traînée et de portance en fonction du nombre de Reynolds local. Les valeurs obtenues sont comparées aux valeurs expérimentales compilées par Brown et Lawler [23], ainsi qu'à celles obtenues numériquement par Sweeney et Finlay [127]. Nous avons ajusté empiriquement la courbe du coefficient de traînée par une courbe d'équation $C_D = 50/Re$.

FIGURE 7.9: Évolution des coefficients de traînée et de portance d'une sphère posée sur une paroi en fonction du nombre de Reynolds local de l'écoulement

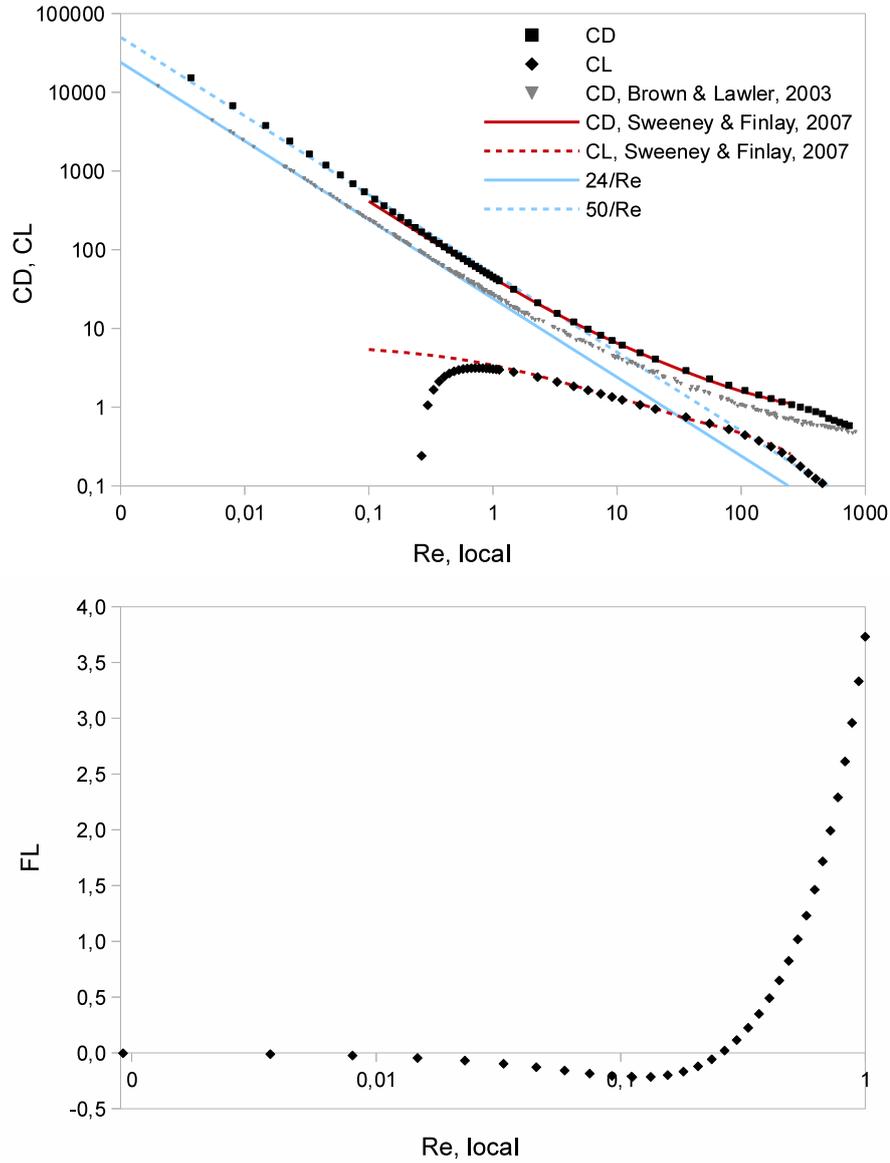


FIGURE 7.10: Force de portance F_L en fonction du nombre de Reynolds local Re_L , pour les plus petites valeurs de ce dernier

On constate que le coefficient de portance devient négatif à faible Reynolds. Physiquement, cela signifie que la force exercée sur la particule n'a plus tendance à la soulever mais au contraire, à la maintenir en contact. Cette observation ne cadre cependant pas avec les résultats de Sweeney et Finlay. Ce résultat nous semblant suspect, nous avons tracé la courbe de la force de portance en fonction du nombre de Reynolds local pour les valeurs les plus faibles de ce dernier, sur la figure 7.10, afin de vérifier que la force de portance tend bien vers zéro avec le nombre de Reynolds, ce qui montre *a minima* que ce n'est pas absurde physiquement.

Il est à noter que l'on observe l'apparition d'instabilités à partir d'un Reynolds local égal à 300, ce qui est en accord avec ce qui est décrit dans la littérature [1, 116]. Physiquement, ces instabilités annoncent que l'ont commence à arriver dans une zone de transition entre un écoulement laminaire et un écoulement turbulent. Ces instabilités se présentent par exemple sous la forme de décollements de couches limites périodiques, et sont responsables d'oscillations des grandeurs observées (vitesse, pression, coefficients de traînée et de portance), comme illustré sur la figure 7.11. Les valeurs représentées sur la figure 7.9 sont donc, à partir de 300 pour le Reynolds local, des valeurs moyennes.

FIGURE 7.11: Apparition d'instabilités sur les coefficients de traînée et de portance à partir d'un nombre de Reynolds local égal à 300.

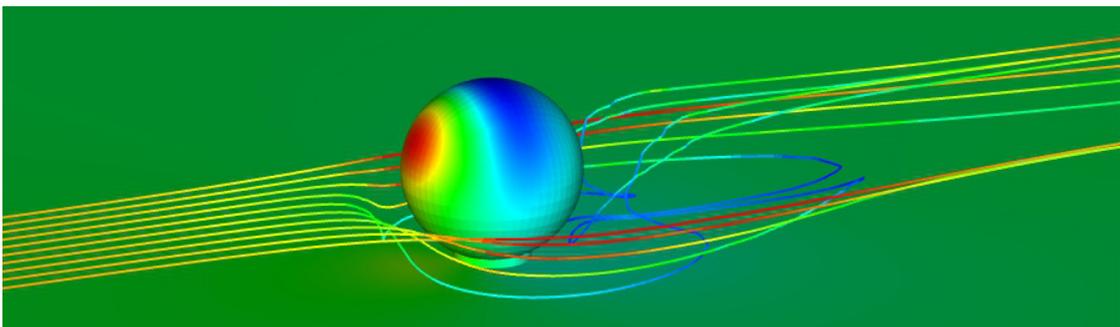
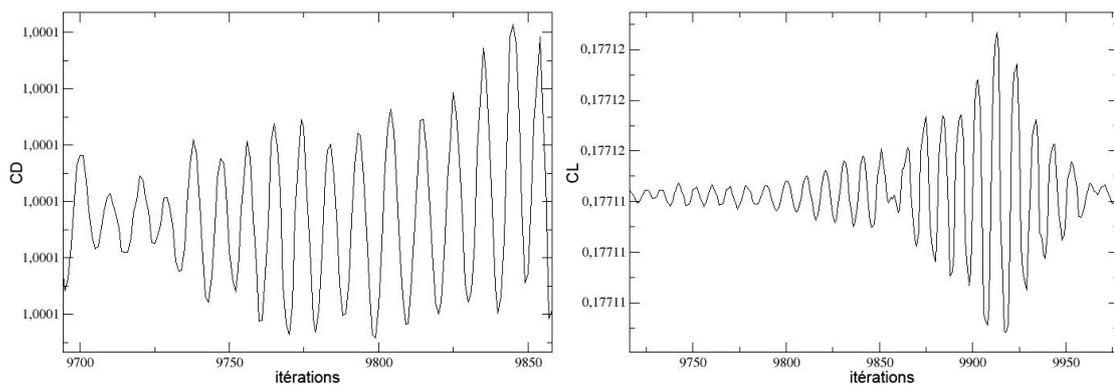


FIGURE 7.12: Écoulement autour d'une sphère à Reynolds local = 100. Pression sur la sphère et vitesse sur les lignes de champ.

Il aurait été possible de caractériser les oscillations observées grâce au nombre de Strouhal (Vincenc Strouhal, 1850-1922). Physiquement, il représente le rapport du temps d'advection et du temps caractéristique de l'instationnarité. Si f est la fréquence des instationnarités, L une longueur caractéristique de l'obstacle et U_∞ la vitesse de l'écoulement non-perturbé, il s'exprime par la formule (7.13). Cependant, nous avons utilisé un pas de temps variable en temps et en espace, et dans ce cas l'interprétation physique des instabilités que l'on observe est très hasardeuse.

$$St = \frac{f \cdot L}{U_\infty} \quad (7.13)$$

La figure 7.12 représente quelques lignes de courant de l'écoulement autour d'une sphère pour un nombre de Reynolds local égal à 100, correspondant à un nombre de Reynolds local égal à 350. La pression est représentée sur la sphère ainsi que sur le plan, et les lignes de courant sont colorées en fonction de la vitesse de l'écoulement. On constate qu'il existe des recirculations juste en aval de la sphère, et que le point d'application des forces de pression n'est pas au centre de la sphère mais un peu au dessus, ce qui confirme l'hypothèse de Sharma *et al.* que nous évoquerons plus tard, voir pour cela l'équation (8.15)

Pour finir, nous allons observer le rapport entre les contributions des termes visqueux et de pression aux efforts de traînée et de portance. Le tableau 7.1 présente, pour tous les ordres de grandeurs du nombre de Reynolds local que nous avons explorés, ces contributions en pourcentages. Pour le coefficient de traînée, on constate que plus le nombre de Reynolds diminue, plus la part visqueuse prend le dessus. Pour le coefficient de portance, c'est la plupart du temps la part de pression qui domine, sauf vers $Re_L = 1$ où la part visqueuse atteint un maximum. Dans tous les cas, les deux contributions sont substantielles et aucune ne peut être négligée devant l'autre.

Tableau 7.1: Contributions des termes de pression et de viscosité aux efforts de traînée et de portance

Re_L	C_D		C_L	
	Pression (%)	Viscosité (%)	Pression (%)	Viscosité (%)
0,001	34,0	66,0	87,9	12,1
0,01	34,0	66,0	88,2	11,8
0,1	33,8	66,2	95,6	4,4
1	34,3	65,7	42,1	57,9
10	40,0	60,0	61,6	38,4
100	59,0	41,0	91,4	8,6

7.4 Deux sphères

Maillage et options numériques

Nous allons maintenant présenter les résultats obtenus pour des simulations d'écoulements autour de deux sphères posées côte à côte. Ce qui nous intéresse est de voir comment la promiscuité des deux sphères peut influencer le flux qu'elles ressentent. Nous avons placé les deux sphères selon deux configurations : l'une de face, où les sphères sont côte à côte face à l'écoulement ; l'autre de profil, où les sphères sont l'une derrière l'autre. Ces deux configurations sont présentées sur la figure (7.13). La taille ainsi que le raffinement des domaines de calculs sont identiques à celle

du domaine précédemment utilisé pour simuler l'écoulement autour d'une sphère isolée. Nous avons paramétré la distance séparant les deux sphères de façon à pouvoir choisir cette dernière entre 0, 2 et 1 rayon de sphère. Nous parlerons dans la suite de l'exposé du ration, qui est le rapport entre la distance entre les bords des sphères et le rayon de ces dernières.. La façon dont à été conçu le maillage fait que, lorsque les sphères sont très proches, certaines mailles sont très déformées, comme on peut le voir sur la figure (7.14)

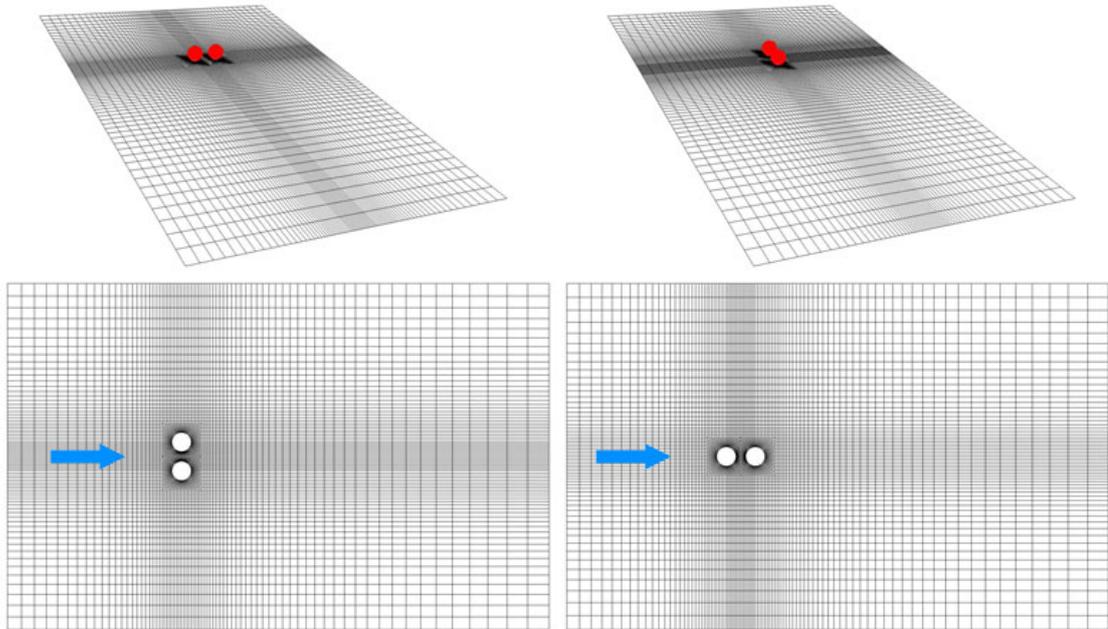


FIGURE 7.13: Maillages des domaines de calcul de l'écoulement autour de deux sphères selon les deux configurations décrites. La flèche bleue représente le sens de l'écoulement.

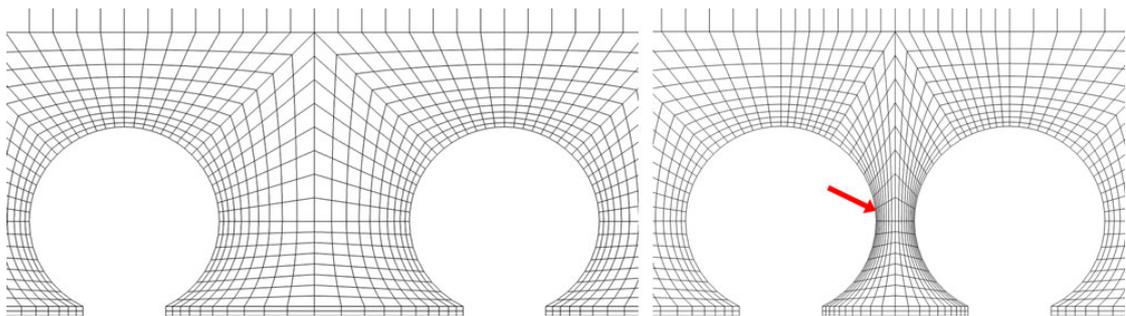


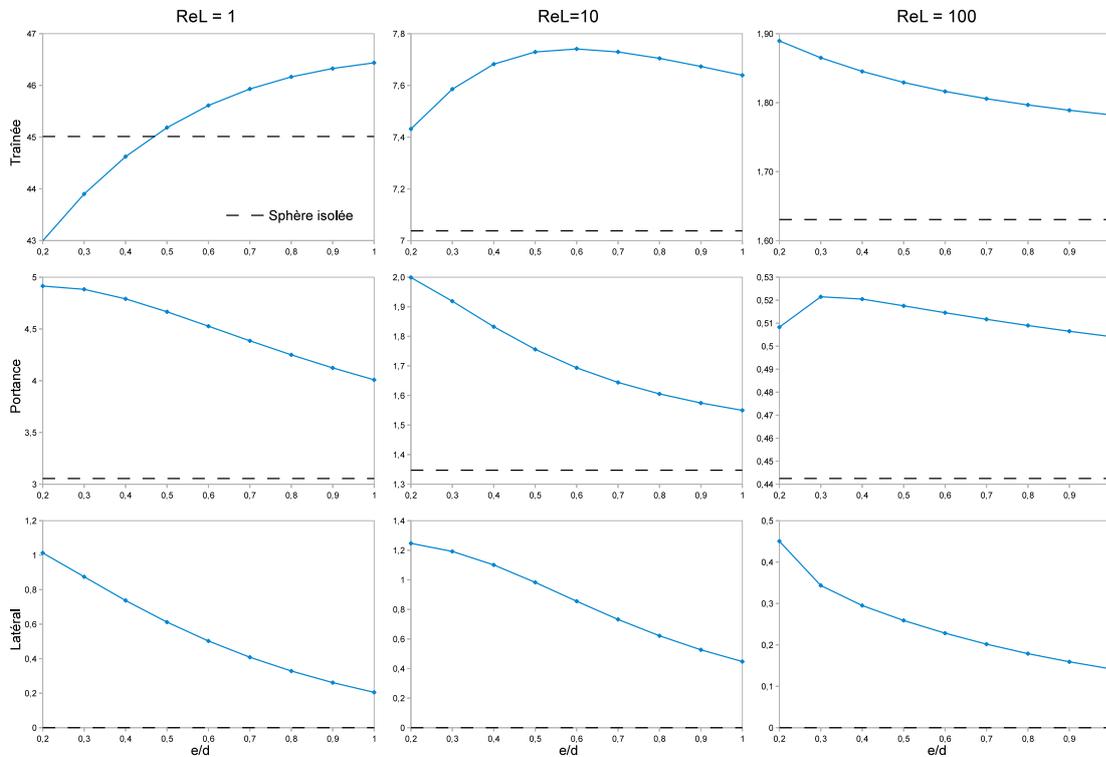
FIGURE 7.14: Déformation des mailles lors du rapprochement des sphères

Les options numériques sont strictement identiques à celles de la simulation de l'écoulement autour d'une sphère isolée.

Sphères côte à côte

Dans le cas où les sphères sont placées côte à côte, elle subissent, en plus des forces de traînée et de portance, un force dirigée latéralement. De la même façon dont nous avons défini les coefficients de traînée et de portance, il est possible de définir un coefficient adimensionnel latéral que nous noterons C_S . Étant donné que les sphères sont symétriques l'une de l'autre par rapport à l'axe de l'écoulement, elles doivent nécessairement avoir les mêmes coefficients de traînée, portance et latéraux, ce que nous avons effectivement vérifié lors de nos simulations. Les graphes de la figure (7.15) présentent l'évolution des coefficients de traînée, de portance et latéraux des sphères en fonction du ratio de l'écart entre les bords des sphères et de leur diamètre et ce pour différents nombres de Reynolds locaux. L'effort latéral est tel que les sphères sont repoussées l'une de l'autre.

FIGURE 7.15: Évolution des coefficients de traînée, portance et latéraux de deux sphères posées côte à côte face à un écoulement laminaire, en fonction du ratio de la distance entre les bords des sphères et du rayon de ces dernières



En fonction du nombre de Reynolds ainsi que de l'écartement entre les sphères, les coefficients de traînée et de portance peuvent être supérieurs ou inférieurs à ce qu'ils sont dans le cas d'une sphère isolée. Ils atteignent une valeur maximale pour une valeur donnée de l'espacement dans certains cas, mais il aurait fallu élargir la gamme de variation du ratio pour savoir si c'est toujours le cas. Comme dans le cas isolé, la force de traînée domine largement. On constate que l'effort latéral a dans tous les cas étudiés tendance à éloigner les sphères. La figure 7.16 représente

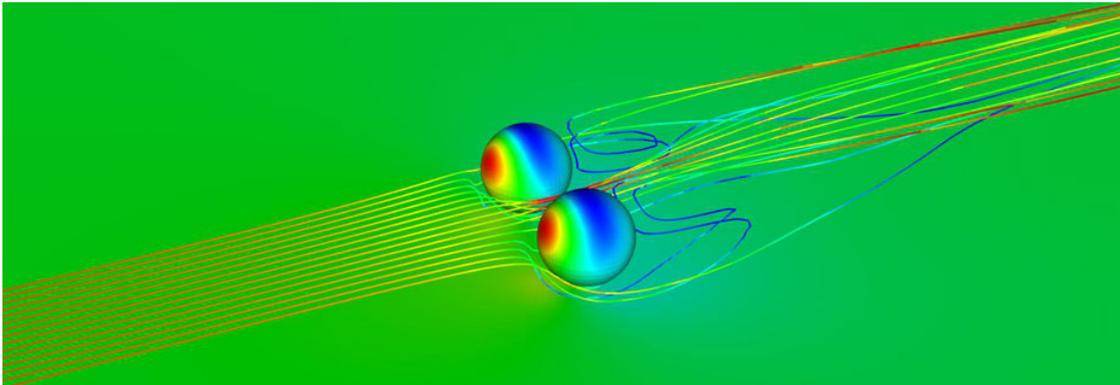


FIGURE 7.16: Écoulement autour de deux sphères posées côte à côte face à un écoulement laminaire de Reynolds local égal à 100. Pression sur la sphère et vitesse sur les lignes de courant.

l'écoulement autour de deux sphères espacées d'un demi rayon, pour un nombre de Reynolds local égal à 100. La pression est représentée sur les sphères et le plan, et les lignes de courant sont colorées en fonction de la vitesse. On peut observer des recirculations dans le sillage des deux sphères.

Sphères l'une derrière l'autre

Si les sphères sont placées l'une derrière l'autre face à l'écoulement, elles ne doivent pas subir de force latérale, cependant il n'y a aucune raison pour qu'elles subissent les mêmes efforts de traînée et de portance puisque l'une est dans le sillage de l'autre. Les graphes de la figure (7.17) présentent l'évolution des coefficients de traînée et de portance des sphères en fonction du ratio de l'écart entre les bords des sphères et de leur diamètre, et ce pour différents nombres de Reynolds locaux.

Comme dans le cas précédent, le coefficient de portance atteint dans certains cas un maximum, supérieur au cas isolé, pour un espacement donné, sans que nous ayons déterminé si c'est systématiquement le cas. Cela ne semble pas être le cas du coefficient de traînée qui est dans tous les cas inférieur au cas isolé. Étant donné la symétrie de l'écoulement par rapport au plan coupant les deux sphères en moitiés, le coefficient latéral doit être nul, ce que nous avons vérifié numériquement. On constate en outre que la sphère placée en aval, dans le sillage de la première, voit ses coefficients de traînée et portance réduits, et on constate que les deux sphères voient leurs coefficients de traînée d'autant plus diminués qu'elles sont proches. À nouveau, comme dans le cas isolé, la force de traînée prédomine.

FIGURE 7.17: Évolution des coefficients de traînée et de portance de deux sphères posées l'une derrière l'autre face à un écoulement laminaire, en fonction du ratio de la distance entre les bords des sphères et du rayon de ces dernières

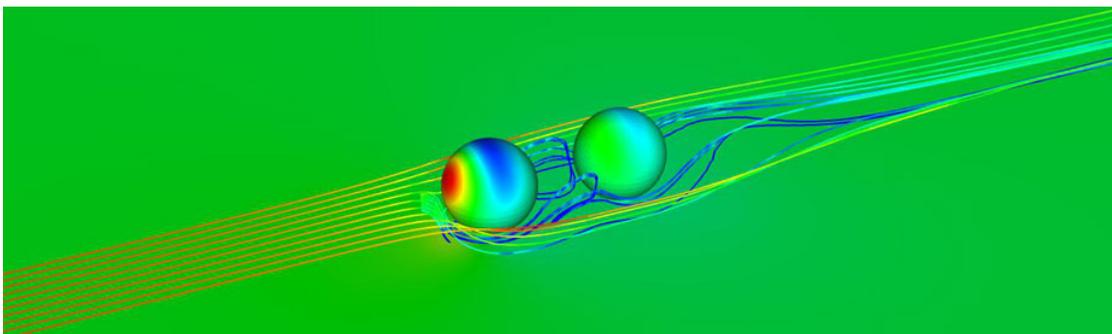
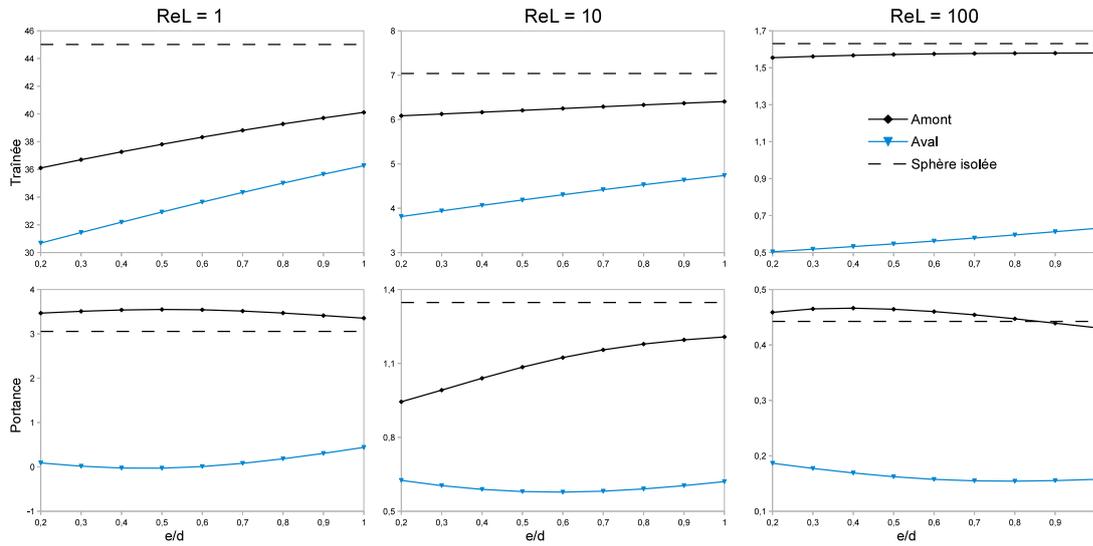


FIGURE 7.18: Écoulement autour de deux sphères posées l'une derrière l'autre face à un écoulement laminaire de Reynolds local égal à 100. Pression sur la sphère et vitesse sur les lignes de courant.

7.5 Quadrillage périodique de sphères

Conditions aux limites périodiques

Le préprocesseur de *Code_Saturne* permet de définir des conditions aux limites périodiques. Cette condition est plus interprétée comme une condition *géométrique* que comme une condition aux limites : elle permet de joindre des faces de façon à ce que ce qui sort d'un côté rentre de l'autre, donc de virtuellement recoller des faces de bord. Deux types de périodicité peuvent être utilisés : une périodicité par translation, qui est celle que nous avons utilisée et qui permet de translater et recoller un maillage dans les trois directions de l'espace ; une périodicité par rotation, qui permet de faire tourner un maillage par la donnée d'un angle et d'une direction. Lorsque l'option de périodicité est utilisée, les faces sur lesquelles a été définie une condition de périodicité n'apparaissent plus comme des faces de bord mais comme des faces internes.

Maillage paramétré

Nous avons de nouveau tiré profit du maillage réalisé pour une sphère isolée, que nous avons dupliqué et modifié de façon à paramétrer la distance entre les sphères. De même que pour le cas de deux particules, lorsque les sphères sont très proches, les cellules sont très déformées. La figure (7.19) représente les domaines de maillages pour les cas extrêmes, à savoir une distance inter-sphère égale à deux rayons de sphères (à gauche) et à un quart de rayon de sphère (à droite). Signalons que dans les deux cas, les sphères ont le même rayon unitaire. C'est l'espacement entre les sphères qui varie (et donc la taille du domaine).

Corrélations

Nous avons calculé les coefficients de traînée et de portance d'une sphère au milieu d'un quadrillage infini de sphères subissant un écoulement plan. Il ne nous était plus possible dans cette configuration de définir un profil de vitesse. Nous avons donc donné comme condition d'entrée un écoulement dont le débit est tel que la vitesse moyenne nous donne le nombre de Reynolds local désiré, ce dernier n'étant plus défini à partir de la vitesse à mi-hauteur mais à partir de la vitesse moyenne. Nous avons ensuite fait varier le ratio de 0,25 à 2. Les graphes (7.21) présentent l'évolution des coefficients de traînée et de portance, en fonction du nombre de Reynolds pour les différents ratios ; puis en fonction des différents ratios pour différents Reynolds locaux variant entre 1 et 100.

Comme dans le cas d'une sphère seule, on constate que les coefficients de traînée et de portance diminuent lorsque le nombre de Reynolds local augmente. On observe une légère augmentation de ces coefficients lorsque les sphères sont rapprochées. Le coefficient de traînée domine toujours largement.

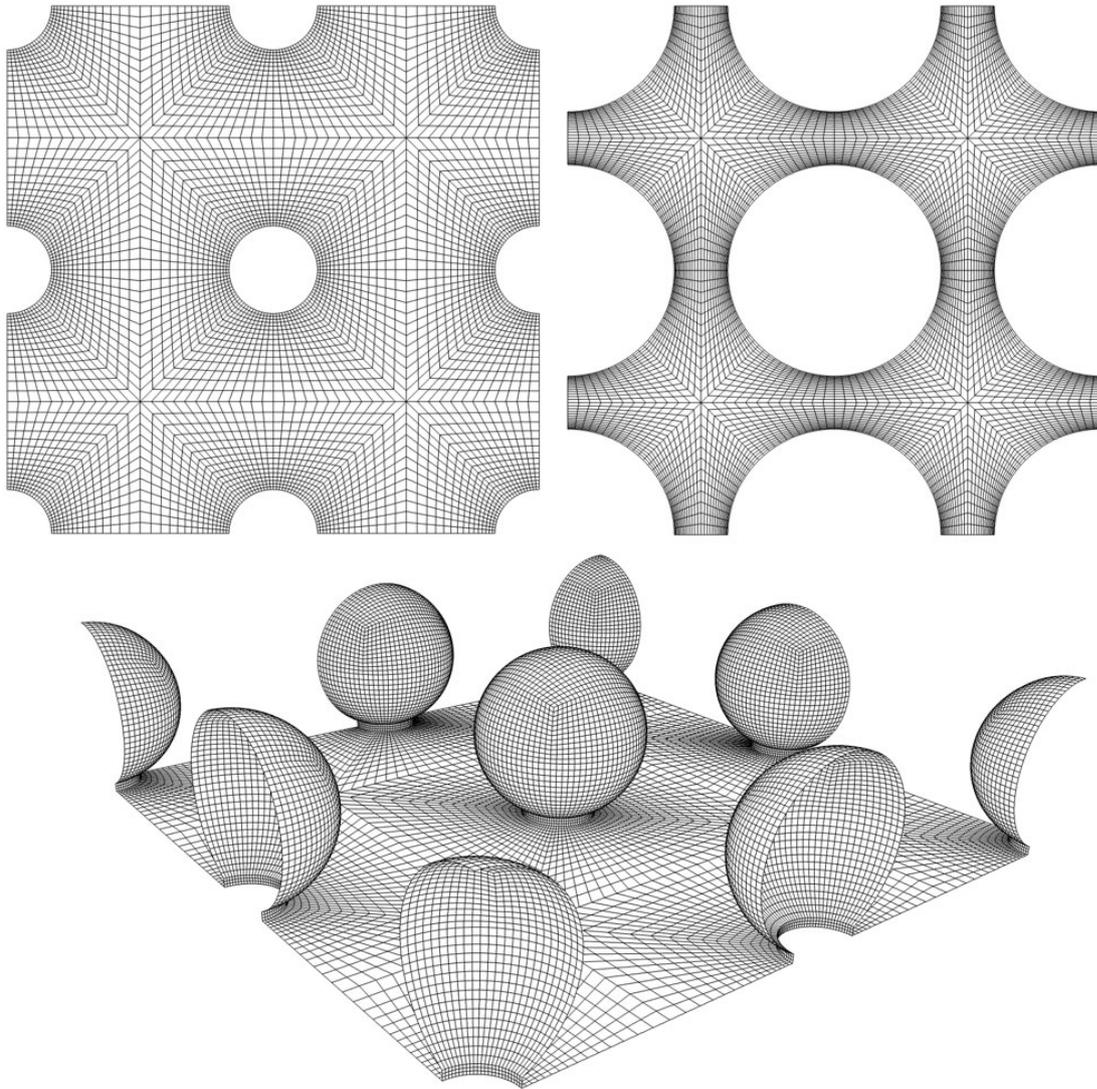


FIGURE 7.19: Domaines de calcul pour une sphère entourée de huit sphères. Les sphères environnantes ne sont pas maillées en entier puisque nous définissons des conditions aux limites périodiques.

FIGURE 7.20: Résultats des 96 simulations : Coefficients de portance et de traînée en fonction du nombre de Reynolds local, pour chaque valeur du ratio ; et en fonction du ratio, pour chaque valeur du coefficient de Reynolds local.

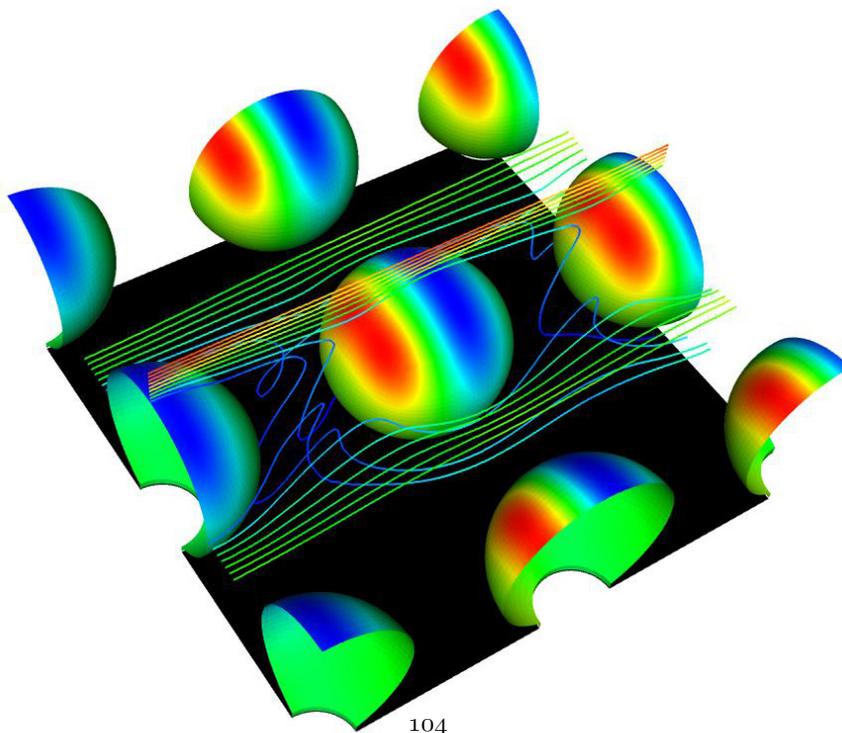
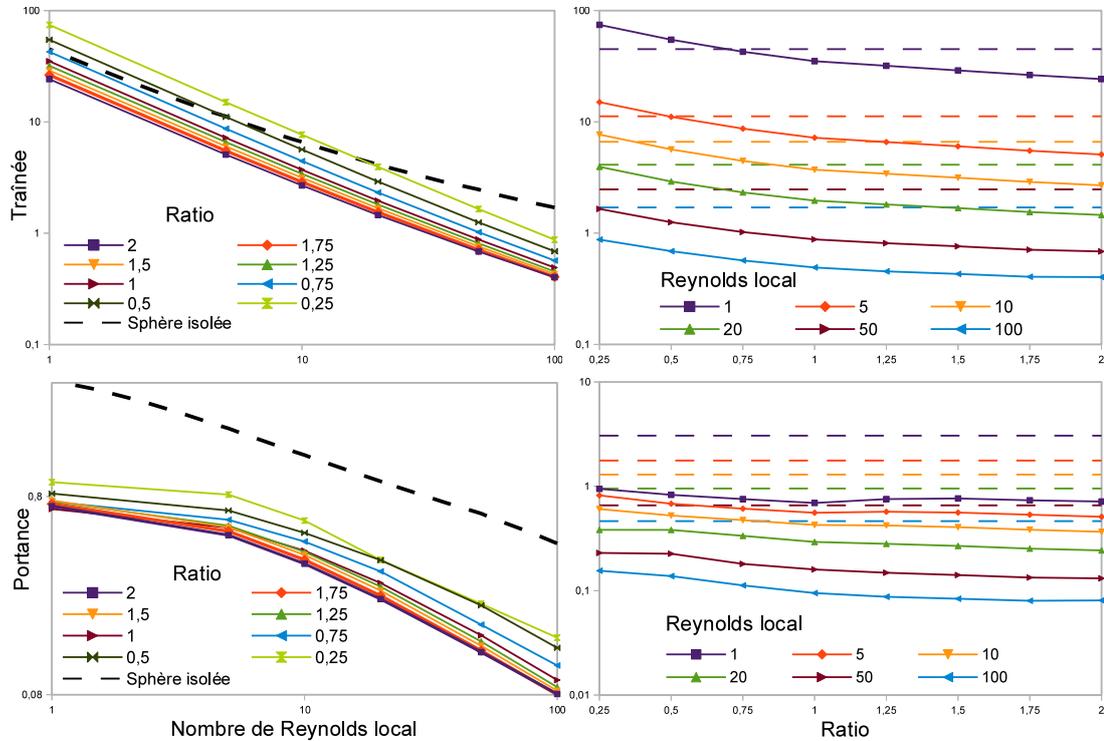


FIGURE 7.21: Écoulement autour d'une infinité de sphères, de nombre de Reynolds local égal à 100. La pression est représentée sur les sphères et la vitesse sur les lignes de courant.

Chapitre 8

Résultats théoriques et applications pratiques

8.1 Critère de détachement

La force d'adhésion résulte de la somme des interactions électrostatiques et de van der Waals. Leur intensité dépend de la rugosité de la surface et pour être tout à fait rigoureux, il faudrait tenir compte également de la probabilité d'impact avec des particules détachées en amont sur la particule considérée. Nous simplifions notre étude à une particule isolée sur une surface parfaitement lisse sous l'influence unique des forces d'attraction de van der Waals.

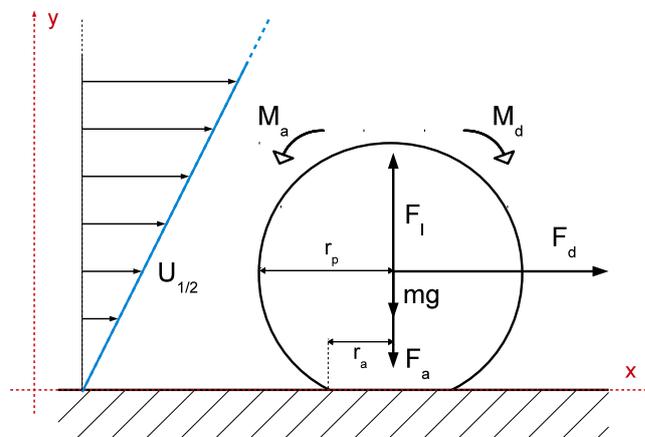


FIGURE 8.1: Bilan des forces et des moments s'exerçant sur une sphère posée sur un plan et soumise à un écoulement tangentiel [26]

Commençons par préciser ce que nous entendons par détachement de la particule. Détachement signifie que la particule est décollée de la surface, ce qui peut survenir selon trois mécanismes : l'arrachement, le glissement et le roulement. Le détachement ne présage en rien du futur réenvol

de la particule : cette dernière peut tout à fait se recoller un peu plus loin. Cependant le détachement est un préalable au réenvol ultérieur, ou réentraînement, de la particule. Les conditions de détachement sont les suivantes :

$$\begin{cases} F_l > F_a + mg & \text{(arrachement)} \\ F_d > k_s(F_a + mg - F_l) & \text{(glissement)} \\ M_d > M_a & \text{(roulement)} \end{cases} \quad (8.1)$$

k_s est le coefficient de frottement statique, c'est un nombre adimensionnel. Il est attesté que le détachement par roulement se produit à des vitesses bien plus faibles que le glissement et l'arrachement [131, 147, 150], voir à ce titre la figure 8.2. Nous commencerons donc par exhiber un critère de roulement, avant de montrer qu'il est effectivement satisfait avant les critères de glissement et d'arrachement.

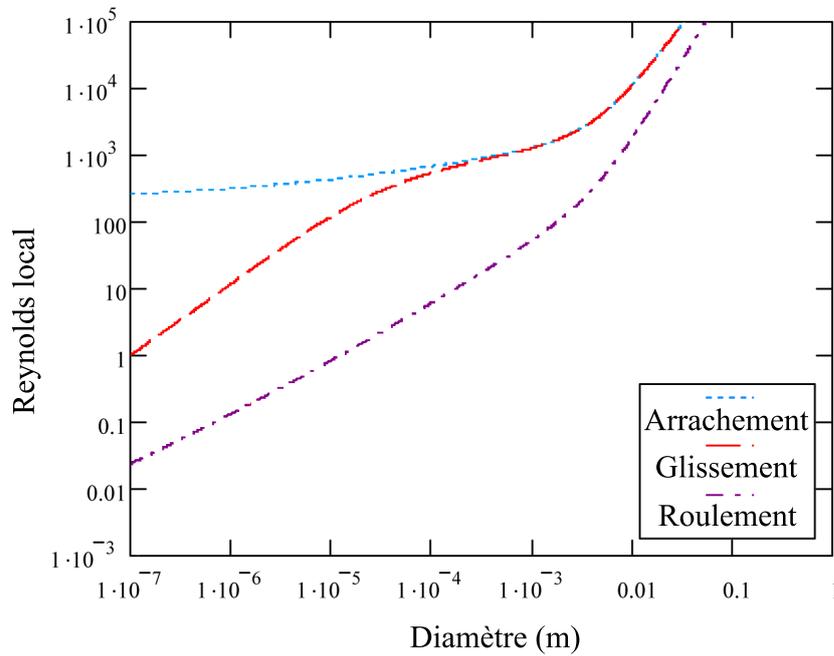


FIGURE 8.2: Modes de détachement de particules de verre sur un substrat en verre, en fonction de leur diamètre et du nombre de Reynolds local [150]

Condition de roulement

À l'équilibre, c'est à dire en l'absence de flux (et donc de force d'arrachement F_l), si l'on considère que la force d'adhésion s'applique au centre de la particule, le moment d'adhésion s'exprime ainsi :

$$M_{ae} = F_a \cdot r_{ae} \quad (8.2)$$

Hors équilibre, et donc sous l'action du flux, l'approche la plus simple pour exhiber un critère de détachement consiste à supposer que la particule commence à rouler dès que le moment de

trainée M_d dépasse en intensité le moment d'adhésion à l'équilibre M_{ae} :

$$M_d > M_{ae} \quad (8.3)$$

Cette approche ne tient pas compte du fait que sous l'action du flux, la force d'adhésion doit être diminuée de la force d'arrachement F_l qui entre en jeu par l'intermédiaire du gradient de vitesse. La conséquence est que le rayon du disque de contact est diminué. Si l'on suppose que la force d'adhésion est constante, le moment d'adhésion hors-équilibre s'écrit :

$$M_a = (F_a - F_l) \cdot r_a(F_l) \quad (8.4)$$

Le rayon du disque d'adhésion va diminuer lorsque F_l va croître, diminuant d'autant le moment d'adhésion. Ne pas tenir compte de ce phénomène mènerait à surestimer le moment requis pour détacher la particule, qui est, nous allons le démontrer, inférieur au moment d'adhésion à l'équilibre. La valeur à dépasser pour le moment de trainée M_d n'est donc pas celle du moment d'adhésion à l'équilibre M_{ae} , mais la valeur maximale M_A de M_a hors équilibre. Il nous faut donc chercher une expression de M_a en fonction des paramètres de l'écoulement afin d'en déterminer la valeur maximale, de façon à expliciter le critère de détachement (8.5). Nous avons pour cela besoin d'un modèle d'adhésion.

$$M_d > M_A \quad (8.5)$$

Les modèles d'adhésion JKR et DMT

Lorsque la particule et la paroi entrent en contact, les forces d'adhésion qui les lient impliquent nécessairement une déformation mutuelle. Cette déformation peut-être prise en compte ou pas dans le modèle d'adhésion adopté, en fonction de son importance et de ses effets. Si l'on ne tient pas compte de cette déformation, et que l'on suppose le contact ponctuel, alors le moment induit par l'écoulement autour de la sphère devrait entraîner son roulement immédiat. Ce n'est pas ce que l'on observe expérimentalement. Il existe donc un moment résistant, dont l'existence ne s'explique que par le fait que le contact entre la particule et le plan soit surfacique et non ponctuel.

Lorsque deux surfaces solides sont proches l'une de l'autre, elles subissent des forces d'attraction de van der Waals, nommées ainsi en hommage au physicien néerlandais Johannes Diderik van der Waals (1837-1923). Il fut en effet le premier à introduire leurs effets dans ses équations d'état des gaz, dans sa thèse publiée en 1873. Le modèle proposé en 1932 par Bradley [21] fournit un moyen de calculer les forces élastiques entre deux sphères rigides lisses. Le modèle de contact Hertzien ne considère pas leur adhésion possible [58]. Cependant, à la fin des années 60, de nombreuses contradictions émergèrent lorsque la théorie de Hertz fut comparée à des résultats expérimentaux. Ces derniers indiquent qu'il existe des forces en jeu, que les modèles de Johnson, Kendall et Roberts en 1971 (JKR, [70]) et de Derjaguin, Muller et Toporov en 1975 (DMT, [42]) sont les premiers à incorporer au modèle de Hertz.

Ces modèles s'appliquent au contact entre une sphère et un plan. Le modèle JKR fait l'hypothèse d'une sphère déformable et suppose qu'il existe une interaction énergétique entre les deux surfaces. Il compare l'énergie élastique accumulée et l'énergie de surface perdue. Il considère que la pression de contact et l'adhésion n'agissent qu'à l'intérieur de la surface de contact. Les forces d'adhésion à l'extérieur de la surface de contact sont négligées et la contrainte élastique au bord de cette surface est infinie.

Nous sommes alors en pleine guerre froide et Boris Vladimirovich Derjaguin, déjà connu grâce à la théorie DLVO (Derjaguin, Landau, Verwey et Overbeek), décrivant les interactions entre particules, rejette le modèle JKR qu'il considère comme un « modèle occidental ». Il propose le modèle DMT, où le profil de contact reste identique au profil Hertzien mais avec des interactions attractives supplémentaires à l'extérieur de la surface de contact. Les forces d'adhésion sont prises en compte mais le profil est supposé Hertzien, comme si les forces d'adhésion ne pouvaient pas déformer la surface.

Aujourd'hui, il est admis que le modèle DMT décrit bien la déformation des particules petites ou dures, tandis que le modèle JKR s'applique mieux à la déformation de particules plus grandes ou moins dures [149]. Le module d'Young des spores d'*Aspergillus* étant de l'ordre du GPa [49], pour un diamètre moyen de $3,5 \mu m$, nous allons baser la suite de nos calculs sur le modèle DMT.

Expression du moment d'adhésion maximal

Pour déterminer le moment maximal d'adhésion M_A , nous avons besoin d'explicitier la relation entre F_l et r_a . Le modèle DMT ne fournissant pas d'expression analytique reliant la force d'adhésion et le rayon de contact, Daniel Maugis a proposé l'approximation suivante en 1991 [89] :

$$\frac{r_a^3 \kappa}{r_p} = N + 2\pi\sigma r_p \quad (8.6)$$

Les caractéristiques intrinsèques et extrinsèques de la particule sont introduites ici par l'intermédiaire de son rayon r_p , de son module d'élasticité κ et de l'énergie surfacique d'adhésion entre la particule et la surface σ . Cette dernière dépend de la nature des matériaux mis en contact. N est la force normale appliquée à la particule. Afin de simplifier la présentation des calculs, nous introduisons les formes adimensionnelles N^* de la force normale appliquée à la particule et r_a^* de son rayon, qui nous permettent d'adimensionner l'équation (8.6).

$$N^* = \frac{-N}{3\pi\sigma r_p} ; r_a^* = \frac{r_a}{(3\pi\sigma r_p^2/\kappa)^{1/3}} \quad (8.7)$$

$$\Rightarrow r_a^* = (-N^* + \frac{2}{3})^{\frac{1}{3}} \quad (8.8)$$

Il est alors possible d'obtenir le rayon de contact adimensionnel à l'équilibre r_{ae}^* , en annulant la force normale N^* . De la même façon, en annulant le rayon de contact, nous obtenons la force N_{arr}^* nécessaire et suffisante à arracher la particule de son support :

$$r_{ae}^* = (\frac{2}{3})^{\frac{1}{3}} \simeq 0,87 \quad (8.9)$$

$$N_{arr}^* = \frac{2}{3} \simeq 0,67 \quad (8.10)$$

Ces deux résultats nous permettent d'en déduire la valeur du moment d'adhésion adimensionnel à l'équilibre M_{ae}^* .

$$M_{ae}^* = N_{arr}^* r_{ae}^* \simeq 0,58 \quad (8.11)$$

Le moment d'adhésion adimensionnel M_a^* s'exprime quand à lui comme le produit de la force normale appliquée N^* et du rayon du disque d'adhésion r_a^* . Pour trouver son maximum, il suffit de l'exprimer en fonction uniquement de l'une de ces variables puis d'annuler la dérivée de la fonction obtenue.

$$M_a^* = N^* r_a^* = (-N^{*4} + \frac{2}{3} N^{*3})^{\frac{1}{3}} = -r_a^{*4} + \frac{2}{3} r_a^* \quad (8.12)$$

$$N^* = \frac{1}{2}; r_a^* = \left(\frac{1}{6}\right)^3 \Rightarrow M_A^* = \left(\frac{1}{48}\right)^{\frac{1}{3}} \simeq 0,275 < M_{ae}^* \quad (8.13)$$

On constate que le moment d'adhésion maximal est bien inférieur au moment d'adhésion à l'équilibre. Ne pas tenir compte de la variation du rayon de contact en fonction de l'effort normal appliqué à la particule conduit bien à surestimer le moment d'arrachement. Nous pouvons en déduire la valeur du moment (dimensionnel) à dépasser pour faire rouler la particule [149] :

$$M_A = M_A^* [(3\pi)^4 \frac{\sigma^4 r_p^5}{\kappa}]^{\frac{1}{3}} \simeq 5,48 \left[\frac{\sigma^4 r_p^5}{\kappa} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (8.14)$$

Expression du moment de traînée

Afin d'exprimer le moment de traînée M_d , il faut savoir en quel point s'applique la force de traînée. Sharma *et al.* [121] supposent qu'elle s'applique approximativement en $1,4r_p$, où le facteur 1,4 est obtenu grâce à l'étude proposée par O'Neill en 1968 [98] :

$$M_d = 1,4 \cdot F_D \cdot r_p \quad (8.15)$$

En introduisant le nombre de Reynolds local dans l'expression du coefficient de traînée (7.5), nous pouvons exprimer la force de traînée uniquement en fonction du coefficient de traînée (qui caractérise l'obstacle), du nombre de Reynolds (qui caractérise l'écoulement), de la viscosité et de la masse volumique (qui caractérisent le fluide), puis en déduire une expression du moment de traînée.

$$F_D = \frac{\pi}{8} \cdot \rho_f \cdot \nu^2 \cdot C_D \cdot Re_L^2 \quad (8.16)$$

$$M_d = \frac{1,4 \cdot \pi}{8} \cdot r_p \cdot \rho_f \cdot \nu^2 \cdot C_D \cdot Re_L^2 \quad (8.17)$$

Critère de roulement

Rappelons la condition de roulement de la particule puis explicitons-la à la lumière des résultats (8.14) et (8.17) obtenus :

$$\begin{aligned} M_d &> M_A \\ \Leftrightarrow \frac{1,4 \cdot \pi}{8} \cdot r_p \cdot \rho_f \cdot \nu^2 \cdot C_D \cdot Re_L^2 &> \left[\frac{(3\pi)^4}{48} \cdot \frac{\sigma^4 r_p^5}{\kappa} \right]^{\frac{1}{3}} \\ \Rightarrow \boxed{C_D Re_L^2 > \Gamma} & \quad (8.18) \end{aligned}$$

$$\Gamma = \frac{4}{1,4 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{(3\pi)^4}{6} \cdot \frac{\sigma^4 r_p^2}{\kappa} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{1}{\rho_f \nu^2} \simeq \frac{10}{\rho_f \nu^2} \cdot \left[\frac{\sigma^4 r_p^2}{\kappa} \right]^{\frac{1}{3}}$$

8.2 Application numérique

Afin de déterminer une valeur numérique du coefficient Γ , nous avons besoin de connaître les valeurs numériques des modules d'élasticité de la spore κ , ainsi que de l'énergie surfacique d'adhésion entre la particule et la surface σ . Dans un article publié en 2011, Fang *et al.* [49] mesurent la réponse élastique et mécanique de spores d'*Aspergillus niger*, à l'aide d'un microscope à force atomique (AFM pour *atomic force microscope*). L'AFM est un type de microscope permettant de visualiser la topographie de la surface d'un échantillon. Cette opération est réalisée en mesurant la déviation d'une sonde locale, assimilable à une pointe effilée, qui parcourt l'échantillon. Fang *et al.* ont ainsi évalué le module d'élasticité des spores ainsi que la force d'adhésion F_a les liant à un substrat en verre sur lesquelles elles ont été collées, obtenant :

$$\begin{aligned} 0,1 \text{ GPa} < \kappa < 21,4 \text{ GPa} \\ 9 \text{ nN} < F_a < 28 \text{ nN} \end{aligned} \quad (8.19)$$

Le modèle d'adhésion DMT fournit la relation (8.20), qui permet d'exprimer l'énergie surfacique d'adhésion dans le cas qui nous intéresse :

$$\begin{aligned} \sigma &= -\frac{F_a}{2\pi r_p} \\ 82 \cdot 10^{-3} \text{ J.m}^{-2} < \sigma < 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ J.m}^{-2} \end{aligned} \quad (8.20)$$

Ayant estimé l'ordre de grandeur de κ et σ , nous pouvons en déduire l'ordre de grandeur de notre critère de roulement adimensionnel Γ .

$$0,1 < \Gamma < 2,8 \quad (8.21)$$

Critère d'arrachement

Bien que la littérature indique que le détachement se fait par roulement, il est simple d'exhiber un critère d'arrachement. Reprenons les conditions de détachement (8.1), la condition d'arrachement s'exprimait ainsi :

$$F_l > F_a + mg \quad (8.22)$$

La force d'arrachement peut s'exprimer en fonction du coefficient de portance et du nombre de Reynolds local, d'après l'équation (7.6). Le modèle DMT nous donne la relation suivante pour exprimer la force d'adhésion en fonction de l'énergie surfacique d'adhésion :

$$F_a = 2\pi\sigma r_p \quad (8.23)$$

En prenant une masse volumique égale à celle de l'eau pour la spore, on obtient alors :

$$\frac{\pi}{8} \rho_f \nu^2 C_L Re_L^2 > 2\pi\sigma r_p + \frac{4}{3} 10^3 g \quad (8.24)$$

Une rapide application numérique montre que, comme nous l'avons affirmé sans plus de détail plus tôt, le poids de la spore est négligeable devant la force d'adhésion. En négligeant le poids, on obtient donc le critère d'arrachement suivant :

$$C_L Re_L^2 > \frac{16\sigma r_p}{\rho_f \nu^2} \in [58; 180] \quad (8.25)$$

D'après les valeurs dont nous disposons pour σ , le second terme de cette inégalité serait compris entre 58 et 180, ce qui est supérieur aux valeurs de Γ à dépasser pour faire rouler la particule. Or, il se trouve que, comme le montrent les simulations que nous avons effectuées, le coefficient de portance C_L est toujours plus petit que le coefficient de traînée C_D . Il en résulte que le critère de roulement sera toujours satisfait avant le critère d'arrachement.

Critère de glissement

De même, si nous examinons la condition de glissement (8.1), nous constatons que nous pouvons négliger la force de portance ainsi que le poids devant la force de traînée. La condition se simplifie alors :

$$F_d > k_s F_a \quad (8.26)$$

Cette inégalité nous permet d'obtenir le critère de glissement suivant :

$$C_D Re_L^2 > k_s \cdot \frac{16\sigma r_p}{\rho_f \nu^2} \in [5.8; 18] \quad (8.27)$$

Nous ne connaissons pas le coefficient de frottement statique d'une spore sur du verre, mais nous pouvons choisir une valeur de 0,1, correspondant au glissement de deux métaux lubrifiés, ce qui est vraisemblablement une sous-estimation du coefficient dans notre cas. Le deuxième terme de l'inégalité varie alors entre 5,8 et 18, ce qui est supérieur aux valeurs de Γ . De plus, comme nous avons sous-estimé la valeur du coefficient de frottement statique, ces valeurs sont probablement plus grandes encore. Ainsi, le critère de roulement sera toujours satisfait avant le critère de glissement.

8.3 Comparaison avec l'expérience de réenvol

Nous avons à présent montré que le roulement est le mécanisme de détachement le plus probable pour une particule sphérique de la taille d'une spore soumise à un écoulement tangentiel, et nous avons exhibé un critère de roulement portant sur le coefficient de portance et le nombre de Reynolds local. Voyons si les valeurs obtenues cadrent avec les observations effectuées lors de nos expérimentations.

Nombre de Reynolds local

Les simulations que nous venons d'effectuer, en nous donnant la courbe caractéristique de l'évolution du nombre de Reynolds local en fonction du nombre de Reynolds global, nous permettent d'estimer *a posteriori* à quel nombre de Reynolds local nous avons travaillé durant nos expérimentations (voir chapitre 5). Si l'on reprend les caractéristiques du dispositif expérimental de notre expérience de réenvol, nous sommes capables de déterminer le nombre de Reynolds global durant les manipulations que nous avons effectuées. Les particules étaient soumises à un écoulement d'une vitesse d'environ 30 m/s. En prenant pour la viscosité cinématique de l'air $\nu = 1,81 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, il est alors possible d'obtenir le nombre de Reynolds global pour chaque diamètre de particule que nous avons utilisé. Une interpolation en utilisant la courbe 7.1 nous permet alors d'en déduire le nombre de Reynolds local correspondant.

Diamètre (μm)	2	3,5 (spores)	6	16	22	100	105	500
Re_G	3,31	5,8	9,94	26,5	36,5	165	174	829
Re_L	0,01	0,03	0,09	0,65	1,22	25,2	27,8	5385,6
$U_{1/2}$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0,09	0,16	0,27	0,73	1	4,6	4,8	19,5
C_D	1794	5826	552	68,5	55,2	3,7	3,5	0,69

Tableau 8.1: Nombre de Reynolds local, vitesse à mi-hauteur et coefficient de traînée en fonction du diamètre de la particules pour les expériences du chapitre (5)

Nous sommes de la même façon capables de déterminer les valeurs du coefficient de traînée pour chaque diamètre de sphère que nous avons utilisé lors de nos expériences. Ces valeurs sont présentées dans le tableau 8.1. Nous pouvons alors calculer la valeur correspondante du critère de roulement et voir s'il nous permet de prévoir les réentraînements que nous avons observés.

Diamètre (μm)	2	3,5 (spores)	6	16	22	100	105	500
$C_D Re_L^2$	0,6	1,7	4,6	28,6	82,8	2368	2726	201877
Détachement	Possible	Possible	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
$C_L Re_L^2$	-0,03	-0,08	-0,2	1,3	5,0	563	658	58683

Tableau 8.2: Prévision du réenvol de particules sphériques en fonction de leur diamètre, pour une vitesse de l'écoulement de $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

En deçà d'un diamètre de $4 \mu\text{m}$, notre critère ne nous permet pas de trancher. C'est le cas des spores d'*Aspergillus niger*, d'un diamètre de $3,5 \mu\text{m}$. Lors de nos expériences, nous observons à la fois des particules rester immobiles, se détacher et être réentraînées. Au-delà d'un diamètre de $4 \mu\text{m}$, notre critère prévoit un réenvol systématique. Nous devons ici souligner une des faiblesses les plus importantes de notre modèle, qui est de ne pas avoir tenu compte de la rugosité. Or, celle-ci joue très probablement un rôle important dans l'adhésion et le détachement de particules micrométriques. De plus, nous n'avons tenu compte ni de l'humidité de l'air, ni de l'existence de forces électrostatiques. Le détachement ou non de particules dont le diamètre les place à la limite du critère dépend sans doute fortement de présence ou non d'aspérités sur la paroi ou sur la particule elle-même. Les travaux de Mathieu Guingo, dans le cadre de sa thèse soutenue en 2008 [56], ont abordé de tels problèmes de rugosité.

Rappelons également que lors de nos expériences, nous avons remarqué que les chocs entre particules sont un phénomène prédominant dans le réenvol de particules, ce qui n'est pas pris en compte dans notre modèle. Nous avons observé que des particules d'un diamètre de $100 \mu\text{m}$ ne se réenvolent pratiquement pas si elles étaient en amont de l'écoulement, et se réenvolent presque toutes en aval, suite au choc avec les quelques particules décrochées en amont. Ce phénomène semble donc prédominant lors de l'étude du réenvol de groupes de particules. Afin de pouvoir faire une comparaison plus pertinente, il faudrait faire des expériences de réenvol avec des particules isolées.

La figure 8.3 présente l'évolution du produit $C_D Re_L^2$ en fonction du coefficient de traînée, pour toutes les simulations de sphères posées sur une paroi que nous avons réalisées.

L'ordre de grandeur B.13 nous permet d'estimer l'épaisseur de la couche limite :

$$\delta \sim \frac{\nu \cdot x_p}{U_\infty} \simeq 0,1 \text{ mm} \quad (8.28)$$

Nous en déduisons que les particules de $100 \mu\text{m}$ de diamètre étaient tout juste comprises dans la couche limite (et donc hors de la sous-couche visqueuse), et les particules de $500 \mu\text{m}$ hors de la couche limite, et donc soumises aux turbulences de l'écoulement. Nous ne pouvons donc pas appliquer notre critère de réenvol, qui suppose que les particules sont incluses dans la sous-couche visqueuse, aux particules de $100 \mu\text{m}$ de diamètre et plus.

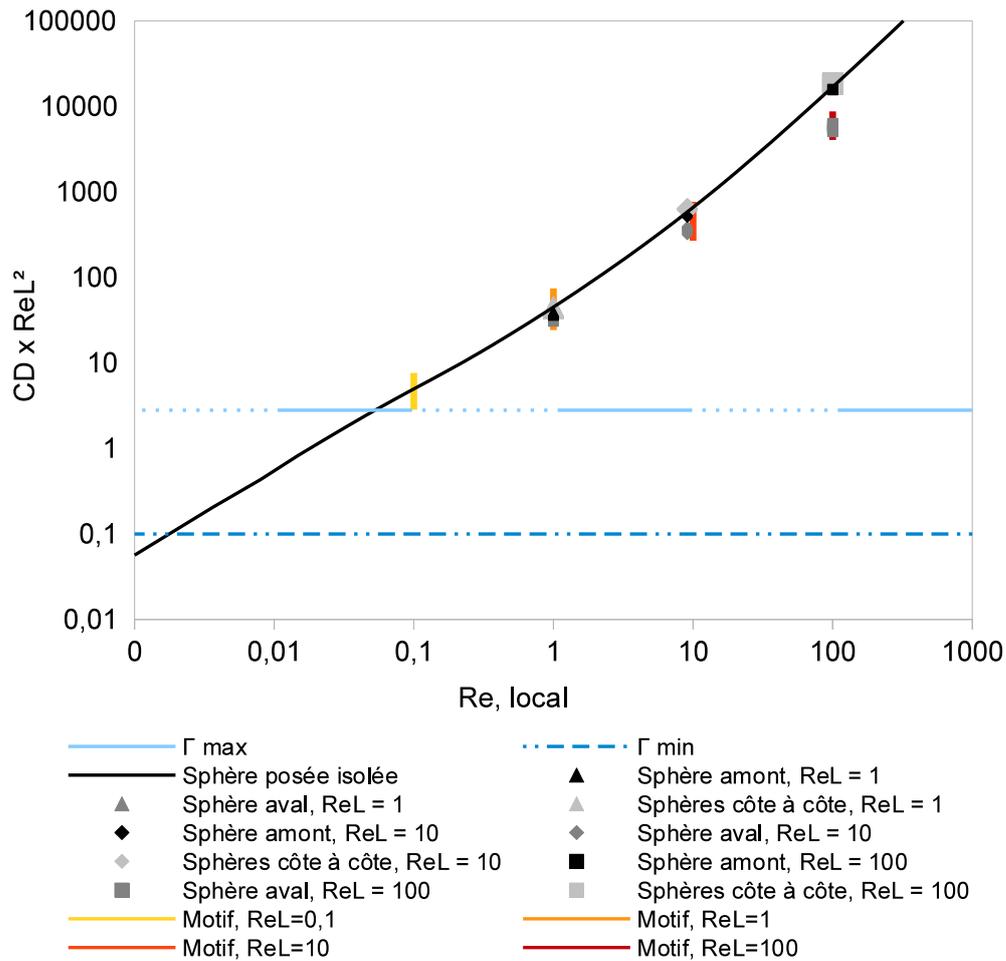


FIGURE 8.3: Produit $C_D \cdot Re_L^2$ en fonction du nombre de Reynolds local, pour différentes configurations de sphères posées sur une paroi : isolée, côte à côte, l'une devant l'autre et enfin un pavage ou motif infini de sphères ; pour un écartement de bord à bord variant de 0,2 à 1 rayon.

Épilogue

Qu'avons-nous fait ?

Autant que faire se peut, j'ai essayé tout au long de ce mémoire de donner à la quête erratique et aveugle du doctorant apprenti chercheur l'apparence d'un parcours réfléchi et prémédité. Non pas pour passer pour un chercheur accompli, puisque je crois que la démarche ne change pas fondamentalement de nature avec l'expérience — sans doute acquiert-elle plus de maturité et ce que l'on appellera de l'intuition, que je vous laisse définir selon vos propres affinités philosophiques et méthodologiques. Non, plutôt parce que présenter les résultats de la façon dont ils ont été obtenus chronologiquement aurait nuit à l'intelligibilité d'un tel manuscrit (ou tapuscrit, devrait-on écrire). Parce qu'il est plus agréable de se laisser porter par une histoire, que par un compte-rendu factuel. Et cela fait évidemment partie de l'exercice que d'être capable de synthétiser les acquis d'un parcours qui fut tout sauf linéaire.

Pendant ces années de thèse, il me fallait systématiquement plusieurs phrases maladroites pour expliquer pourquoi, si je m'intéressais aux maladies nosocomiales, je ne faisais pas de biologie, et pourquoi, si je travaillais chez EDF, je ne fabriquais pas d'électricité. C'est sans aucun doute parce que les problèmes que nous avons abordés ne l'on jamais été sous cet angle, du moins pas à notre connaissance. Nous avons analysé des problématiques médicales avec nos méthodes de physiciens, et utilisé un code industriel de mécanique des fluides pour étudier le réenvol de spores fongiques. Chemin faisant, plus le champ de recherche potentiel se révélait à moi, plus j'avais l'impression qu'il n'avait jamais été foulé... et par moment on se sent bien seul. L'originalité de ce travail réside ainsi principalement dans le fait d'approcher des problématiques à l'origine purement médicales par des méthodes de physique expérimentale et avec des outils de numériciens.

Il ne me serait en tout cas pas venu à l'idée que je serais durant trois jours formé à l'utilisation de machines outils. C'est pourtant ce qui m'a permis de fabriquer, à peu de frais, l'aérosoliseur par voie sèche que nous avons poétiquement prénommé DAF (pour *Dry Aerosoliser of Fungal spores*). Nous n'avons rien inventé, puisque nous avons pris modèle sur un prototype déjà éprouvé par nos confrères coréens. Nous avons cependant montré que dans certains cas, le DAF représente une alternative très intéressante au classique nébuliseur Collison.

L'étude des traitements fongicides qui suit le chapitre sur l'aérosolisation peut paraître assez simple, et d'ailleurs elle l'est. Elle nous a cependant donné l'opportunité d'introduire des méthodologies originales pour évaluer l'efficacité de traitements fongicides, et de mettre en évidence qu'elles donnent des résultats significativement différents des méthodes préconisées par la plupart des normes. Nous avons en effet été surpris par le peu d'adéquation existant entre les protocoles utilisés de façon standard et la réalité du terrain. De plus, au-delà de l'efficacité immédiate des

traitements fongicides, leur rémanence n'est jamais évoquée, alors qu'elle présente un intérêt pratique majeur. L'un des résultats les plus intéressants de cette étude reste pour moi la différence de viabilité entre les spores nébulisées, et celles aérosolisées par voie sèche. Le fait que les traitements fongicides soient plus efficaces avec des spores aérosolisées de façon plus naturelle fut une surprise, qu'il serait intéressant de creuser. Cela remet clairement en question la pertinence d'utiliser le nébuliseur Collison pour aérosoliser des organismes vivants.

Tout ce qui s'envole finit inéluctablement par se déposer, mais l'inverse est-il vrai ? L'expérience de réenvol que nous avons mise au point représente, au cours de ma modeste expérience, le paroxysme du bricolage. Entre le démontage d'un vieux microscope pour en extraire le mécanisme de vis micrométriques, le montage d'un microscope neuf pièce par pièce, les heures passées au petit atelier pour emboîter tout cela, la configuration de la vieille camera rapide, les trous dans le mur, bref, toute la récupération, sans parler des raids à Castorama pour acheter un aspirateur, de la tuyauterie de cheminée et des ventilations mécaniques de sanitaires, cette expérience fut riche d'enseignements pratiques, ou comment faire beaucoup avec peu.

Nous avons utilisé une approche cinématique du réenvol de particules, qui tranche avec les méthodes consistant à observer le réentraînement avant et après, et ne permettent pas de savoir ce qui s'est *réellement* passé entre. L'utilisation d'une caméra rapide nous a permis d'observer des phénomènes fascinants, à tel point que je me suis par moments pris pour un artiste, ne cherchant plus qu'à produire de belles images, sans me demander ce que je cherchais au final. Je ne pense pas que ce soit antinomique d'une démarche de recherche. La recherche du beau peut-être un moteur. Au final, nous en sommes sortis avec des conclusions majeures. Tout d'abord, la disposition des particules entre elles influence leur réenvol. Ensuite, détachement ne signifie pas réenvol, les particules pouvant réadhérer plus loin. Enfin, lorsque réenvol il y a, il est souvent dû à un impact avec une particule détachée en amont, avec un effet de cascade. Sans oublier le plus important, l'observation bien déconcertante au départ qui est qu'une fois que les spores sont déposées sur une surface, il est extrêmement difficile de les faire se réenvoler en soufflant dessus. Même pour un loup. Mais on y arrive quand même...

Il existe en effet des situations où le phénomène de réenvol se produit, même avec des particules aussi petites que des spores. L'une d'entre elles est l'écoulement autour de pales de ventilateurs. Cette étude sur les ventilateurs nous a permis d'illustrer ce que peut représenter l'apport de la physique à la médecine, et plus largement ce qui peut naître du mélange des genres. Issue d'une observation fortuite (nous y reviendrons), nous avons commencé par des expérimentations au laboratoire de physique, continué par des simulations numériques et fini par des prélèvements hospitaliers. Ce phénomène de déposition-réenvol qui a lieu sur les pales soulève de nombreuses questions intéressantes. Par exemple, si la particule se dépose, pourquoi se réenvole-t-elle alors que les conditions aérauliques n'ont pas changé ? Est-ce parce qu'elle se déplace le long de la pale, sous l'effet de la force centrifuge, vers des zones de plus grande célérité ? Est-ce parce qu'elle est impactée par d'autres particules ? Est-ce parce que le dépôt se fait par couches ? Est-ce à cause de phénomènes électrostatiques ? Voici une question qui en soulève des dizaines d'autres.

En réalité je pense que l'explication est beaucoup plus simple que cela, mais je ne possède aucun élément pour appuyer cette intuition qui n'engage que moi. Nous avons vu sur les vidéos de réenvol qu'à l'exception de certaines particules situées en amont, très peu de particules se réenvolent du seul fait de l'effort exercé par le flux. Tout au plus se détachent-elles. Cependant, le détachement d'une particule peut entraîner son impact avec une autre suivi du détachement

voire du réenvol de cette dernière. Et je pense que cet effet de « billard » est prédominant pour le réenvol de petites particules déposées sur des pales de ventilateur. On pourrait imaginer un protocole expérimental permettant de tester cette hypothèse, en filtrant l'air mis en mouvement par le ventilateur.

Nous aurions pu continuer à imaginer quantité d'expériences pendant le reste de la thèse, mais il a bientôt fallu entamer la partie numérique. Nous avons abordé des problèmes qui, à notre connaissance, et aussi étonnant que cela puisse paraître étant donné leur apparente simplicité, n'avaient pas encore été étudiés, à savoir l'écoulement autour de motifs de sphères posées sur une paroi. Nous avons obtenu de résultats intéressants, d'une part concernant une sphère isolée, dont le coefficient de portance devient négatif à très faibles Reynolds ; d'autre part avec les motifs de sphères, dont les coefficients de portance et traînée varient en fonction de l'écartement. Ces simulations nous ont donné accès à des paramètres dont la mesure était impossible expérimentalement avec le matériel dont nous disposions.

Dans la dernière partie de ce manuscrit, outre placer tous les calculs théoriques rébarbatifs, j'ai surtout cherché à faire le lien entre les parties expérimentale et numérique, qui sont complémentaires. Nous avons exhibé un critère théorique permettant de dire, en fonction des caractéristiques de l'écoulement et de la particule considérée, si cette dernière va être détachée de la surface sur laquelle elle est posée. Ce critère présuppose de nombreuses et violentes simplifications. Nous n'avons pas tenu compte de la viscosité, qui serait un paramètre intéressant à intégrer dans notre critère. Par essence, nous ne tenons pas non plus compte des interactions avec les particules environnantes. Ce critère fournit néanmoins des prédictions qui sont compatibles avec les observations faites durant nos expérimentations.

Voici donc les résultats de la thèse, ce que l'on peut ajouter au tableau après quatre années le nez dans le guidon, ce que ce travail a déposé en offrande sur l'autel de la science. Ce qu'il m'a apporté, à titre personnel, ne tient heureusement pas en quelques lignes, et dépasse largement le cadre de cet exercice conclusif.

Qu'allons-nous faire ?

Ce travail ouvre la voie à de nombreux approfondissements. Son côté pluridisciplinaire est ce qui m'a sans doute le plus plu, mais il ne faut pas nier que cela a aussi empêché d'approfondir beaucoup de choses, d'où une certaine frustration, mais aussi beaucoup de voies à explorer pour un futur doctorant ou post-doctorant. À peine commençait-on à obtenir des résultats intéressants qu'il fallait passer à l'étape suivante : en découlent de nombreuses pistes, parmi lesquelles nous allons en évoquer quelques-unes.

Nous avons effectué des expérimentations afin de mettre en évidence des effets thermiques sur la déposition des particules, mais ces dernières n'ont pas donné de résultats exploitables. Elles méritent toutefois d'être poursuivies car des concentrations élevées de spores fongiques sur des parois plus fraîches en milieu hospitalier nous ont été rapportées. La thermophorèse reste encore mal expliquée au niveau moléculaire. Nous n'avons pas eu le temps de réaliser des dispositifs expérimentaux élaborés, mais il ne devrait pas être trop compliqué ni coûteux de le faire. Quelques heures au petit atelier du laboratoire de physique de l'ENS de Lyon pour réaliser des plaques permettant de faire circuler de l'eau dont la température serait régulée par un bain thermostaté permettraient de réaliser d'intéressantes observations en contrôlant bien mieux la

température que nous ne l'avons fait en utilisant des plaques à effet Peltier. Elles mèneraient, j'en suis convaincu, à des questionnements riches d'enseignements. C'est véritablement une voie à creuser, étant donné que des différences de taux de déposition de spores fongiques sur des surfaces de températures différentes ont d'ores et déjà été observées et m'ont été rapportées par des collègues du milieu médical.

L'expérience de réenvol mériterait quand à elle d'être de nouveau montée et repensée au niveau de sa conception afin de tenir compte de tous les enseignements de la première. Je ne peux pas rentrer dans tous les détails techniques, mais nous avons été limités principalement par l'éclairage, qui est critique lorsque l'on filme à grande vitesse, ou lorsque l'on observe du très petit, et à fortiori lorsque l'on fait les deux à la fois. Nous n'avons pas été réellement capables d'observer de façon suffisamment détaillée le réenvol de spores fongiques, à notre grand dam puisque c'était tout de même le thème central. Je pense qu'il est possible d'y parvenir avec le matériel adéquat. Les observations faites sur des particules plus grosses laissent présager de magnifiques observations avec des spores fongiques. De récentes discussions avec un collègue ayant soutenu sa thèse dans le domaine de la microfluidique me laisse penser que ce domaine peut nous fournir des outils nous permettant de contrôler les spores déposés ainsi que les flux auxquels elles sont soumises. J'encourage fortement toute personne souhaitant poursuivre ces travaux à explorer cette voie.

Concernant les simulations numériques, outre toutes les configurations de motifs de sphères qu'ils nous reste à explorer, l'une des applications les plus directes de notre travail et qu'il faudrait réaliser en priorité serait l'application de notre critère de réenvol à un modèle lagrangien de déposition-réenvol. C'était à la base l'un des objectifs de cette thèse, sans doute un peu ambitieux en terme de temps, notamment d'apprentissage de l'outil numérique. Le critère que nous avons exhibé pourrait alors être affiné en tenant compte de plus de phénomènes physiques comme la rugosité, les interactions électrostatiques, l'humidité, *etc.* On peut alors imaginer aller encore plus loin en mettant en œuvre des simulations lagrangiennes de déposition-réenvol de particules sur des maillages tournants, afin de simuler ce qui se produit sur les pales des ventilateurs.

De façon plus générale, les différents travaux que j'ai effectués durant cette thèse l'ont été de façon séquentielle. D'abord les expérimentations, puis ensuite les simulations. C'est au moment de la rédaction que les ponts se sont révélés, et que j'ai pris conscience que ces deux parties auraient pu être menées de façon plus optimales si elles avaient été menées en parallèle. Nous aurions ainsi pu viser plus juste, que ce soit au niveau des nombres de Reynolds mis en jeu dans les simulations, qu'au niveau de la conception des expérimentations.

Le champ à explorer est encore immense, et à vrai dire, les suggestions précédentes ne sont qu'un infime aperçu, et mèneront sans nul doute à des interrogations bien plus vastes. Pour conclure, il serait dommage de s'arrêter là, et il faut absolument continuer à travailler à la croisée des domaines. Cette démarche apporte des éclairages différents et nouveaux, qui portent en germe, j'en suis convaincu, des innovations inattendues.

Le processus de recherche

Je l'écrivais plus tôt, en citant mon directeur de thèse Vance Bergeron, la recherche est un domaine fortement non-linéaire. On ne peut pas attendre de la recherche qu'elle remplisse des objectifs précis et à court terme, au risque d'être déçu. À chaque chose que l'on questionne, peu importe la méthode, on obtient rarement des réponses, mais au contraire souvent beaucoup

d'autres questions... au point de s'y perdre, par moments. La recherche ne se fait pas là où il y a de la lumière, mais là où l'on ne voit rien, là où il fait noir et où l'on ne sait pas ce que l'on va trouver. On peut toujours essayer de viser, on va certainement trouver des choses, mais il est vain de prétendre prédire quoi.

À ce titre, l'histoire des travaux qui nous ont amené à découvrir que les ventilateurs électroniques sont un réservoir de pathogènes est je le crois un bel exemple. Elle commence durant nos tout premiers essais il y a deux ou trois ans, lorsque nous essayions de créer un aérosol maîtrisé de spores fongiques. Nous souhaitions obtenir un mélange de concentration homogène, et nous avons naturellement pensé à utiliser de petits ventilateurs. Bien mal nous en a pris, puisque ces derniers, une fois en marche, faisaient immédiatement chuter la concentration particulière. Mais où étaient passées toutes ces spores ? Se déposaient-elles sur les surfaces en Plexiglas de la cuve ? Étaient-elles chargées électriquement par le passage au travers des pales du ventilateur ? Le mystère n'a pas duré longtemps puisqu'un simple prélèvement par boîte contact nous appris que toutes les pales étaient littéralement surpeuplées de spores.

Mais alors, cela veut dire que les ventilateurs agissent comme des filtres, capturant les spores fongiques par impaction inertielle ? C'est déjà intéressant. C'est à ce moment que Vance se posa la question fondamentale : si les ventilateurs capturent les spores, peuvent-ils également les relarguer ? Si vous lisez ces lignes, c'est que vous connaissez la réponse. La suite, c'est les prélèvements au sein des services de pneumologie et de greffe de l'hôpital Saint-Louis, puisqu'ils nous restait à vérifier que les ventilateurs contenaient effectivement en milieu hospitalier les spores qu'ils sont capables de relarguer, et représentent donc effectivement un risque de contamination.

Cet exemple est typique de la façon dont la recherche scientifique fonctionne, à mon sens du moins, et de ce que j'en retiens de ma modeste expérience. On peut trouver ce que l'on recherche, où trouver quelque chose complètement à côté, qui n'en est pas moins intéressant. Il faut rester vigilant, à l'affût, garder les yeux ouverts pour ne pas passer à côté de quelque chose. Ne surtout pas chercher à tout prix à démontrer ce dont on est convaincu, et au contraire n'être sûr de rien. Et, pour paraphraser à nouveau Vance, *tout questionner*. Cette petite phrase qu'il tient de son père introduisait sa propre thèse, soutenue il y a quelques années à Berkeley. Je suis heureux qu'elle conclue aujourd'hui la mienne.

Question Everything!



Le mur du silence, Jean-Pierre Petit
<http://www.savoir-sans-frontieres.com/>

Bibliographie

- [1] E. Achenbach. Vortex shedding from spheres. *Journal of Fluid Mechanics*, 69(2) :209–221, 1974.
- [2] AFNOR. Essai quantitatif de suspension pour l'évaluation de l'activité fongicide ou levuricide des antiseptiques et des désinfectants chimiques utilisés dans le domaine de l'agroalimentaire, dans l'industrie, dans les domaines domestiques et en collectivité, 2008.
- [3] V. Aimanianda, J. Bayry, S. Bozza, O. Knemeyer, K. Perruccio, S.R. Elluru, C. Clavaud, S. Paris, A.A. Brakhage, S.V. Kaveri, L. Romani, and J.-P. Latgé. Surface hydrophobin prevents immune recognition of airborne fungal spores. *Nature*, 460 :1117–1123, 2009.
- [4] C. Alberti, A. Bouakline, P. Ribaud, C. Lacroix, P. Rousselot, T. Leblanc, and F. Derouin. Relationship between environmental fungal contamination and the incidence of invasive aspergillosis in haematology patients. *Journal of Hospital Infection*, 48 :198–206, 2001.
- [5] S. Alfandari, O. Bajolet, C. Bernet, B. Coignard, C. Gautier, M. Giard, S. Georges, P. Jarno, L. Léon, B. Miguères, K. Miliari, L. Simon, J.-M. Thiolet, S. Vaux, and D. Verjat-Trannoy. Enquête nationale de prévalence 2012 des infections nosocomiales et des traitements anti-infectieux en établissement de santé - Protocole / Guide de l'enquêteur. Technical report, InVS, 2012.
- [6] Grégoire Allaire. *Analyse numérique et optimisation*, chapter Introduction à la modélisation mathématique et à la simulation numérique. Éditions de l'École Polytechnique, 2005.
- [7] ANOFEL. Aspergilloses. Cours de l'Université Médicale Virtuelle Francophone, 2010-2011.
- [8] S.A. Balajee, J. Houbraken, P.E. Verweij, S.B. Hong, T. Yaguchi, J. Varga, and R.A. Samson. Aspergillus species identification in the clinical setting. *Studies in Mycology*, 59 :39–46, 2007.
- [9] Serge Baux. *La brûlure*. Hermann, 2000.
- [10] C. Beauchêne, N. Laudinet, F. Choukri, J.-L. Rousset, S. Benhamadouche, J. Larbre, M. Chaouat, M. Benbunan, M. Mimoun, J.-P. Lajonchère, V. Bergeron, and F. Derouin. Accumulation and transport of microbial-size particles in a pressure protected model burn unit : Cfd simulations and experimental evidence. *BMC Infectious diseases*, 11 :58, 2011.
- [11] T. Bénet, M.-C. Nicolle, A. Thiebaut, M.-A. Piens, F.-E. Nicolini, X. Thomas, S. Picot, M. Michallet, and P. Vanhems. Reduction of invasive aspergillosis incidence among immunocompromised patients after control of environmental exposure. *Clinical Infectious Diseases*, 45 :682–686, 2007.
- [12] J.E. Bennet. *Mandell, Douglas and Bennett's principle and practice of infectious diseases*, chapter Aspergillus Species. Churchill Livingstone, 1995.
- [13] V. Bergeron, A. Metani, and F. Derouin. Electronic fans : A pathogen reservoir and potential cross-contamination source. *New England Journal of Medicine*, Soumis, 2013.

- [14] Bergeron, Vance. «la recherche est un domaine fortement non-linéaire». Conversation pendant un déjeuner, 2011.
- [15] V. Bex, M. Boissier, C. Fabre, O. Meunier, A. Mouilleseaux, N. Nolard, M. Ott, G. Reboux, E. Robine, and M.-F. Roquebert. Contaminations fongiques en milieux intérieurs. Technical report, Conférences d'actualisation SFAR, 1997.
- [16] BGI, INC. Collison nebulizer - instructions. Instruction manual, 2002.
- [17] M. Blackwell. The fungi : 1, 2, 3 ... 5.1 million species? *American Journal of Botany*, 98(3) :426–438, 2011.
- [18] G.P. Bodey. The emergence of fungi as major hospital pathogens. *Journal of Hospital Infection*, 11(A) :411–426, 1988.
- [19] John P. Boyd. The blasius function : computations before computers, the value of tricks, undergraduate projects, and open research problems. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 50(4) :791–804, 2008.
- [20] D.A. Braaten, R.H. Shaw, and U.K.T. Paw. Particle resuspension in a turbulent boundary layer. *Journal of Aerosol Science*, 21 :613–628, 1990.
- [21] R. S. Bradley. The cohesive force between solid surfaces and the surface energy of solids. *Philosophical Magazine*, 13(86) :853–862, 1932.
- [22] M.-P. Brenier-Pinchart, B. Lebeau, J.-L. Borel, J.-L. Quesada, M.R. Mallaret, F. Garban, J.-P. Brion, L. Molina, J.-L. Bosson, A. Thiebaut-Bertrand, R. Grillot, and H. Pelloux. Community-acquired invasive aspergillosis and outdoor filamentous fungal spore load : a relationship? *Mycology*, 17 :1387–1390, 2011.
- [23] Phillip P. Brown and Desmond F. Lawler. Sphere drag and settling velocity revisited. *Journal of Environmental Engineering*, 129(3) :222–231, 2003.
- [24] P. Bulpa, A. Dive, and Y. Sibille. Invasive pulmonary aspergillosis in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *European Respiratory Journal*, 30 :782–800, 2007.
- [25] G. Burghi, V. Lemiale, H. Bagnulo, E. Bodega, and E. Azoulay. Invasive pulmonary aspergillosis in a hematological patient in the intensive care units. *Medicina Intensiva*, 34 :459–466, 2010.
- [26] J. Cardot, N. Blond, and P. Schmitz. Adhesion and removal of particles from surfaces under humidity controlled air stream. *The Journal of Adhesion*, 75(3) :351–368, 2001.
- [27] J.J. Castón-Osorio, A. Rivero, and J. Torre-Cisneros. Epidemiology of invasive fungal infection. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 32(2) :103–109, 2008.
- [28] T. Cavalier-Smith. A revised six-kingdom system of life. *Biological Reviews*, 73 :203–266, 1998.
- [29] S.C. Ciecko and Scher R. Invasive fungal rhinitis caused by paecilomyces lilacinus infection : Report of a case and a novel treatment. *Ear, Nose & Throat Journal*, 89(12) :594–595, 2010.
- [30] J.W. Cleaver and B. Yates. Mechanism of detachment of colloidal particles from a flat substrate in a turbulent flow. *Journal of Colloid and Interface Science*, 44 :464–473, 1973.
- [31] B. Coignard, L. Lacavé, S. Maugat, J.-M. Thiolet, and A. Fischer. Enquête nationale de prévalence des infections nosocomiales 2006 - Synthèse des résultats. Technical report, InVS, 2009.
- [32] W.E. Collison. *Inhalation Therapy Technique*. Heinemann, London, 1935.

- [33] A. Combes, M. Mokhtari, A. Couvelard, J.-L. Trouillet, J. Baudot, D. Hémin, C. Gibert, and J. Chastre. Clinical and autopsy diagnoses in the intensive care unit : a prospective study. *Archives of Internal Medicine*, 23 :608–615, 2004.
- [34] M. Corn and F. Stein. Re-entrainment of particules from a plane surface. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 26 :325–336, 1965.
- [35] M. Cornet, L. Fleury, C. Maslo, J.-F. Bernard, and G. Brucker. Epidemiology of invasive aspergillosis in france : a six-year multicentric survey in the greater paris area. *Journal of Hospital Infection*, 51 :288–296, 2002.
- [36] J. Cousteix. *Couche limite laminaire*. Cepadues editions, 1989.
- [37] C.S. Cox and C.M. Wathes. *Bioaerosol Handbook*. Lewis Publishers, 1995.
- [38] T.R.T. Dagenais and N.P. Keller. Pathogenesis of aspergillus fumigatus in invasive aspergillosis. *Clinical Microbiology Reviews*, 22(3) :447–465, 2009.
- [39] Jean-Sylvestre Darrozès and Claude François. *Mécanique des fluides incompressibles*. École Nationale Supérieure de Techniques Avancées, 1998.
- [40] E.J. Dasbach, G.M. Davies, and S.M. Teutsch. Burden of aspergillosis-related hospitalizations in the united-states. *Clinical Infectious Diseases*, 31 :1524–1528, 2000.
- [41] D.W. Denning. Invasive aspergillosis. *Clinical Infectious Diseases*, 26 :781–805, 1998.
- [42] B. V. Derjaguin, V. M. Muller, and Yu. P. Toporov. Effect of contact deformations on the adhesion of particles. *Journal of Colloid and Interface Science*, 53(2) :314–326, 1975.
- [43] J.-C. Desenclos. La transmission aérienne des agents infectieux. *Médecine et maladies infectieuses*, 38 :449–451, 2008.
- [44] G. Desoubieux and J. Chandenier. Aspergillus et maladies aspergillaires. *Feuillets de Biologie*, 51(293) :53–63, 2010.
- [45] G. Desoubieux and J. Chandenier. Diagnostic biologique d’une infection aspergillaire. *Feuillets de Biologie*, 51(294) :33–40, 2010.
- [46] J.B. Dufourcq, P. Marsol, F. Gaba, and M. Granados. Brûlures graves chez l’enfant. Technical report, Conférences d’actualisation SFAR, 1997.
- [47] H. Dupont. Infections fongiques en réanimation. enquête transversale. *Annales Françaises d’Anesthésie et de Réanimation*, 20 :413–417, 2001.
- [48] C. Echinard and C. Vescovali. L’immunité du grand brûlé. *Annals of the MBC*, 4(1), 1991.
- [49] Te-Hua Fang, Shao-Hui Kang, Zheng-Han Hong, and Cheng-Da Wu. Elasticity and nanomechanical response of aspergillus niger spores using atomic force microscopy. *Micron*, 2011.
- [50] W.H. Finlay. *The mechanics of inhaled pharmaceutical aerosols*. Academic Press, 2001.
- [51] A. Fromentin. Time dependent particle resuspension from a multi-layer deposit by turbulent flow. *Journal of Aerosol Science*, 20 :911–914, 1989.
- [52] G.P. Garnett, S. Gregson, and K.A. Stanecki. Criteria for detecting and understanding changes in the risk of hiv infection at a national level in generalised epidemics. *Sexually Transmitted Infections*, 82 :48–51, 2006.
- [53] R.L. Górný. Filamentous microorganisms and their fragments in indoor air - a review. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 11 :185–197, 2004.
- [54] R.L. Górný, T. Reponen, K. Willeke, D. Schmechel, E. Robine, M Boissier, and S.A. Grinshpun. Fungal fragments as indoor air biocontaminants. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(7) :3522–3531, 2002.

- [55] K. Graf, S. Mohammad Khani, E Ott, F. Mattner, P. Gastmeier, D. Sohr, S. Ziesing, and I.F. Chaberny. Five-years surveillance of invasive aspergillosis in a university hospital. *BioMed Central Infectious Diseases*, 11 :163, 2011.
- [56] Mathieu Guingo. *Modélisation stochastique du dépôt et du réentraînement de particules dans un écoulement turbulent*. PhD thesis, Université Henri Poincaré, Nancy 1; École Doctorale EMMA, 2008.
- [57] D. Hall. The time dependence of particle resuspension. *Journal of Aerosol Science*, 20 :389–842, 1989.
- [58] H. Hertz. Ueber die berührung fester elastischer körper. *Journal für die Reine und Angewandte Mathematik*, 92 :156–171, 1882.
- [59] William C. Hinds. *Aerosol Technology*. Wiley, seconde edition, 1999.
- [60] F. Holsteyns, K. Lee, S. Graf, R. Palmans, G. Vereecke, and P.W. Mertens. Megasonics : a cavitation driven process. *Ultra Clean Processing of Silicon Surfaces VII Solid State Phenomena*, 103-104 :159–162, 2005.
- [61] L. Howarth. On the solution of the laminar boundary layer equations. *Proceedings of the Royal Society of London - Mathematical and Physical Sciences*, 164(A) :547–579, 1938.
- [62] A.H. Ibrahim and P.F. Dunn. Effects of temporal flow acceleration on the detachment of microparticles from surfaces. *Aerosol Science*, 37 :1258–1266, 2006.
- [63] A.H. Ibrahim, P.F. Dunn, and R.M. Brach. Microparticle detachment from surfaces exposed to turbulent airflow : controlled experiments and modeling. *Aerosol Science*, 34 :765–782, 2003.
- [64] A.H. Ibrahim, P.F. Dunn, and R.M. Brach. Microparticle detachment from surfaces exposed to turbulent airflow : effects of flow and particle deposition characteristics. *Aerosol Science*, 35 :805–821, 2004.
- [65] A.H. Ibrahim, P.F. Dunn, and R.M. Brach. Microparticle detachment from surfaces exposed to turbulent airflow : microparticle motion after detachment. *Aerosol Science*, 35 :1189–1204, 2004.
- [66] A.H. Ibrahim, P.F. Dunn, and M.F. Qazi. Experiments and validation of a model for microparticle detachment from a surface by turbulent air flow. *Aerosol Science*, 39 :645–656, 2008.
- [67] Abdelmaged Hafez Ibrahim Essawey. *Microparticle detachment from surfaces by fluid flow*. PhD thesis, University of Notre Dame, 2004.
- [68] BGI Incorporated. Collison nebulizers. <http://www.bgiusa.com/agc/collison.htm>, 2012.
- [69] W. John, D.N. Fritter, and W. Winklmayr. Resuspension induced by impacting particles. *Journal of Aerosol Science*, 22 :723–736, 1991.
- [70] K. L. Johnson, K. Kendall, and A. D. Roberts. Surface energy and the contact of elastic solids. *Proceedings of the Royal Society of London*, 324(A) :301–313, 1971.
- [71] H. Kanaani, M. Hargreaves, Z. Ristovski, and L. Morawska. Fungal spore fragmentation as a function of airflow rates and fungal generation methods. *Atmospheric Environment*, 43 :3725–3735, 2009.
- [72] Hussein Fadhl Remathie Kannani. *Real time detection of airborne fungal spores and investigation into their dynamics in indoor air*. PhD thesis, Queensland University of Technology, School of Physical and Chemical Sciences, 2009.

- [73] K. Kendall. *Molecular adhesion and its application - The sticky universe*. Kluwer Academics / Plenum Publishers, 2001.
- [74] J. Kildeso, H. Würtz, K.F. Nielsen, P. Kruse, K. Wilkins, U. Thrane, S. Gravesen, P.A. Nielsen, and T. Schneider. Determination of fungal spore release from wet building materials. *Indoor Air*, 13 :148–155, 2003.
- [75] D.P. Kontoyiannis and G.P. Bodey. Invasive aspergillosis in 2002 : an uupdate. *European Journal of Clinical Microbiology & Infectious Diseases*, 21 :161–172, 2002.
- [76] D.P. Kontoyiannis, K.A. Marr, B.J. Park, B.D. Alexander, E.J. Anaissie, T.J. Walsh, J. Ito, D.R. Andes, J.W. Baddley, J.M. Brown, L.M. Brumble, A.G. Freifeld, S. Hadley, L.A. Herwaldt, C.A. Kaufmann, K. Knapp, G.M. Lyon, V.A. Morrison, G. Papanicolaou, T.F. Patterson, T.M. Perl, M.G. Schuster, R. Walker, K.A. Wannemuehler, J.R. Wingard, T.M. Chiller, and P.G. Pappas. Prospective surveillance for invasive fungal infections in hematopoietic stem cell transplant recipients, 2001-2006 : overview of the transplant-associated infection surveillance network (transnet) database. *Clinical Infectious Diseases*, 50 :1091–1100, 2010.
- [77] Y. Kousaka, K. Okuyama, and Y. Endo. Re-entrainment of small aggregate particles from a plane surface by air stream. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 13 :143–147, 1980.
- [78] H Kume, T Yamazaki, T Togano, M Abe, H Tanuma, S Kawana, and M Okudaira. Epidemiology of visceral mycoses in autopsy cases in japan : Comparison of the data from 1989, 1993, 1997, 2001, 2005 and 2007 in annual of pathological autopsy cases in japan. *Journal of Medical Mycology*, 52 :117–127, 2011.
- [79] Adam Larat. *Conception et analyse de schémas d'ordre très élevé distribuant le résidu. Application à la mécanique des fluides*. PhD thesis, Université de Bordeaux 1, École doctorale de Mathématiques et d'Informatique, 2009.
- [80] Cornelia Lass-Flörl. The changing face of epidemiology of invasive fungal disease in Europe. *Mycoses*, 52 :197–205, 2008.
- [81] J.-P. Latgé. *Aspergillus fumigatus and aspergillosis*. *Clinical Microbiology Reviews*, 12(2) :310–350, 1999.
- [82] J.H. Lee, G.B. Hwang, J.H Jung, D.H. Lee, and B.U. Lee. Generation characteristics of fungal spore and fragment bioaerosols by airflow control over fungal cultures. *Journal of Aerosol Science*, 41 :319–325, 2010.
- [83] J.H. Lee, C.H. Lee, J.E Lee, J.H Lee, S.S. Kim, and B.U. Lee. Design and characterization of a fungal bioaerosol generator using multi-orifice air jets and a rotating substrate. *Aerosol Science*, 40 :72–80, 2009.
- [84] Christopher Leleu. *Évaluation du risque lié à l'exposition aérienne à Aspergillus fumigatus*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, École Doctorale Pierre Louis de Santé Publique : Épidémiologie et Sciences de l'Information Biomédicale, 2012.
- [85] Ligue pulmonaire suisse. Structure et fonction du poumon et des voies respiratoires. <http://www.liguepulmonaire.ch/fr/themes-principaux/poumon-et-voies-respiratoires.html>, 2012.
- [86] O. Lorthoraly, J.-P. Gangneux, K. Sitbon, B. Lebeau, F. de Monbrison, Y. Le Strat, B. Coignard, F. Dromer, and S. Bretagne. Epidemiological trends in invasive aspergillosis in france : the saif network. *Mycology*, 17 :1882–1889, 2011.
- [87] Abdelaziz Maougal. *Optimisation d'un écoulement de couche limite par la méthode EGM (Entropy Generation Minimization)*. PhD thesis, Université Mentouri-Constantine, Faculté des sciences exactes, Département de Physique, 2010.

- [88] F. Mattner, I.F. Chaberny, H. Weißbrodt, S. Fischer, P. Gastmeier, B. Haubitz, J. Gottlieb, L. Mattner, and M. Strueber. Surveillance of invasive mold infections in lung transplant recipients : effect of antimycotic prophylaxis with itraconazole and voriconazole. *Mycoses*, 48(1) :51–55, 2005.
- [89] Daniel Maugis. Adhesion of spheres : the JKR-DMT transition using a dugdale model. *Journal of Colloid and Interface Science*, 150(1) :243–269, 1991.
- [90] K.R. May. The collison nebulizer : description, performance and application. *Aerosol Science*, 4 :235–243, 1972.
- [91] W. Meersseman, K. Lagrou, and E. Van Wijngaerden. Invasive aspergillosis in the intensive care unit. *Clinical Infectious Diseases*, 45 :205–216, 2007.
- [92] A. Metani, F. Derouin, C. Beauchêne, V. Bergeron, M. Chaouat, S. Benhamadouche, and M. Mimoun. Apport de la simulation numérique à la maîtrise de l’aérocontamination chez le grand brûlé. *Brulures*, Accepté, 2013.
- [93] Amine Metani. Observations au microscope électronique à balayage, plateforme de microscopie de l’Université Claude Bernard - Lyon 1. Images personnelles, 2010.
- [94] T.C. Mort and N.S. Yeston. The relationship of pre mortem diagnoses and post mortem findings in a surgical intensive care unit. *Critical Care Medicine*, 27 :299–303, 1999.
- [95] M.O. Moss. Risk assessment for aflatoxins in foodstuffs. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 50 :137–142, 2002.
- [96] T.T.C. Ng, G.D. Robson, and D.W. Denning. Hydrocortisone-enhanced growth of aspergillus spp : implications for pathogenesis. *Microbiology*, 140 :2475–2480, 1994.
- [97] Andrew F. Oberta. The truth about hepa filters. <http://www.asbestosguru-oberta.com/hepa.htm>, 2012.
- [98] M. E. O’Neill. A sphere in contact with a plane wall in a slow linear shear flow. *Chemical Engineering Science*, 23 :1293–1298, 1968.
- [99] B. Orth, R. Frei, P.H. Itin, M.G. Rinaldi, B. Speck, A. Gratwohl, and A.F. Widmer. Outbreak of invasive mycoses caused by paecilomyces lilacinus from a contaminated skin lotion. *Annals of internal medicine*, 125(10) :799–806, 1996.
- [100] P.G. Pappas, B.D. Alexander, D.R. Andes, S. Hadley, C.A. Kaufmann, A. Freitfeld, E.J. Anaissie, L.M. Brumble, L. Herwaldt, J. Ito, D.P. Kontoyiannis, G.M. Lyon, K.A. Marr, V.A. Morrison, B.J. Park, T.F. Patterson, T.M. Perl, R.A. Oster, M.G. Schuster, R. Walker, T.J. Walsh, K.A. Wannemuehler, and T.M. Chiller. Invasive fungal infections among organ transplant recipients : results of the transplant-associated infection surveillance network (TRANSNET). *Clinical Infectious Diseases*, 50 :1101–1111, 2010.
- [101] S. Paris, J.P. Debeaupuis, R. Cramer, M. Carey, Franck Charlès, M.C. Prévost, C. Schmitt, B. Philippe, and J.P. Latgé. Conidial hydrophobins of aspergillus fumigatus. *Applied and Environmental Microbiology*, 69 :1581–1588, 2003.
- [102] F. Perdelli, M.L. Christina, M. Sartini, A.M. Spagnolo, M. Dallera, G. Ottria, R. Lombardi, M. Grimaldi, and P. Orlando. Fungal contamination in hospital environments. *Infection Control and Hospital Epidemiology*, 27(1) :44–47, 2006.
- [103] D.J. Phares, J.K. Holt, G.T. Smedley, and R.C. Flagan. Method for characterization of adhesion properties of trace explosives in fingerprints and fingerprints simulations. *Journal of Forensic Science*, 45 :774–784, 2000.
- [104] J.I. Pitt. The current role of aspergillus and penicillium in human and animal health. *Journal of Medical and Veterinary Mycology*, 32(1) :17–32, 1994.

- [105] M.B. Ranade. Adhesion and removal of fine particule on surfaces. *Aerosol Science and Technology*, 7 :161–176, 1987.
- [106] N.D. Read. *Electron Microscopy of Plant Pathogens*. K. Mendgen & D.-E. Lesemann, 1991.
- [107] M.W. Reeks and D. Hall. Kinetic models for particle resuspension in turbulent flows : theory and measurement. *Journal of Aerosol Science*, 32 :1–31, 2001.
- [108] M.W. Reeks, J. Reed, and D. Hall. On the resuspension of small particles by a turbulent flow. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 21 :574–589, 1988.
- [109] P. Ribaud, C. Chastang, J.P. Latgé, L. Baffroy-Laffite, N. Parquet, A. Devergie, H. Espérou, F. Sélimi, V. Rocha, F. Derouin, G. Socié, and E. Gluckman. Survival and prognostic factors of invasive aspergillosis after allogeneic bone marrow transplantation. *Clinical Infectious Diseases*, 28(2) :322–330, 1999.
- [110] C.T. Rieger. Cost of treating an invasive fungal infection in patients with acute myelogenous leukemia or myelodysplastic syndrome in german hospitals. Technical report, Annual Germany Hematology convention, 2008.
- [111] J.-M. Robert, S. Vichova, B. Delannoy, T. Quadiri, and J.-J. Lehot. Le patient immuno-déprimé. *Odontologie*, 23-760-A-11, 2009.
- [112] E. Robine, L. Boulangé-Petermann, and D. Derangère. Assessing bactericidal properties of materials : the case of metallic surfaces in contact with air. *Journal of Microbiological Methods*, 49 :225–234, 2002.
- [113] T. Rosebury. *Experimental Airborne Infection*. Williams & Witlkins, Baltimore, 1947.
- [114] I. Ruiz-Camps, J. Agado, and B. Almirante. Recommendations of the spanish society of infectious diseases and clinical microbiology (seimc) on the prevention of invasive fungal infection due to filamentous fungi. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, 83 :709–718, 2010.
- [115] G.Ö. Sahin and M. Akova. Invasive fungal infections. Technical report, Business Briefing, European Pharmacotherapy, 2005.
- [116] H. Sakamoto and H. Haniu. A study on vortex shedding from spheres in a uniform flow. *Transaction of the ASME*, 112 :386–392, 1990.
- [117] R.A. Samson and E.S. van Reenen-Hoekstra. *Introduction to food-borne fungi*. Baarn : Centraalbureau voor Schimmelcultures, Institute of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, troisième édition, 1988.
- [118] M. Sautour, N. Sixt, F. Dalle, C. L’Ollivier, V. Fourquenet, C. Calinon, K. Paul, S. Valvin, A. Maurel, S. Aho, G. Couillault, C. Cachia, O. Vagner, B. Cuisenier, D. Caillot, and A. Bonnin. Profiles and seasonal distribution of airborne fungi in indoor and outdoor environments at a french hospital. *Science of the Total Environment*, 407(12) :3766–3771, 2009.
- [119] E. Scheermeyer and I.E. Agranovski. Design and evaluation of a new device for fungal spore aerosolization for laboratory applications. *Aerosol Science*, 40 :879–889, 2009.
- [120] SFETB. Référentiels et fiches de recommandation sfetb. http://www.sfetb.org/index.php?rub=textes-officiels&art=doc_ref_3, consulté le 21 Octobre 2012.
- [121] Mukul M. Sharma, Habib Chamoun, D. S. H. Sita Rama Sarma, and Robert S. Schechter. Factors controlling the hydrodynamic detachment of particles from surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*, 149(1) :121–134, 1992.
- [122] T. Silvfast, O. Takkunen, E. Kolho, L. Andersson, and P. Rosenberg. Characteristics of discrepancies between clinical and autopsy diagnoses in the intensive care unit : a five-year review. *Intensive Care Medicine*, 29 :321–324, 2003.

- [123] X. Simon, L. Betelli, V Koehler, C. Coulais, and P. Duquenne. Generation of actinomycetes aerosols containing spores and mycelium : Performances of a liquid bubbling aerosolizer. *Aerosol Science and Technology*, 47(2) :158–168, 2013.
- [124] N. Singh and S. Husain. Invasive aspergillosis in solid organ transplant. *American Journal of Transplantation*, 51(4) :180–191, 2009.
- [125] N. Sixt, F. Dalle, I. Lafon, S. Aho, G. Couillault, S. Valot, C. Calinou, V. Danaire, O. Vagner, B. Cuisenier, M. Sautour, J.P. Besancenot, C. L’Ollivier, D. Caillot, and A. Bonnin. Reduced fungal contamination of the indoor environment with the plasmair(tm) system (airinspace). *Journal of Hospital Infection*, 65 :156–162, 2007.
- [126] W.J. Steinbach, D.A. Stevens, D.W. Denning, and R.B. Moss. Advances against aspergillosis. *Clinical Infectious Diseases*, 37(3) :155–156, 2003.
- [127] L.G. Sweeney and W.H. Finlay. Lift and drag forces on a sphere attached to a wall in a blasius boundary layer. *Journal of Aerosol Science*, 38 :131–135, 2007.
- [128] D. Tabor. Surface forces and surface interactions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 58 :2–13, 1977.
- [129] M.F.Q. VandenBergh, P.E. Verweij, and A. Voss. Epidemiology of nosocomial fungal infections : invasive aspergillosis and the environment. *Diagnostic Microbiology and Infectious Disease*, 34 :221–227, 1999.
- [130] A. Vasselle. Rapport sur la politique de lutte contre les infections nosocomiales. Technical report, OPEPS, 2006.
- [131] H.-C. Wang. Effects of inceptive motion on particle detachment from surfaces. *Aerosol Science and Technology*, 13 :386–393, 1990.
- [132] D.W. Warnock. Trends in the epidemiology of invasive fungal infections. *Japanese Journal of Medical Mycology*, 48 :1–12, 2007.
- [133] A. Warris and P.E. VerWeij. Clinical implications of environmental sources for aspergillus. *Medical Mycology Supplement*, 43(1) :59–65, 2005.
- [134] H.Y. Wen and G. Kasper. On the kinetics of particle reentrainment from surfaces. *Journal of Aerosol Science*, 20(483) :483–498, 1989.
- [135] Wikipedia. Aspergillus. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Aspergillus>, 2012.
- [136] Wikipedia. Burn. <http://en.wikipedia.org/wiki/Burn>, 2012.
- [137] Wikipedia. Cladosporium. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Cladosporium>, 2012.
- [138] C.R. Woese, W.E. Balch, L.J. Magrum, G.E. Fox, and R.S. Wolfe. An ancient divergence among the bacteria. *Journal of Molecular Evolution*, 9 :305–311, 1977.
- [139] C.R. Woese, O. Kandler, and M.L. Wheelis. Towards a natural system of organisms : Proposal for the domains archaea, bacteria, and eucarya. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 87 :4576–4579, 1990.
- [140] H.A.B. Wösten and M.L. de Vocht. Hydrophobins, the fungal coat unravelled. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1469 :79–86, 2000.
- [141] W.D.G. Yates, G.C. Kozub, and A.R. Lejeune. Comparison of collision and devilbiss 65 nebulizers in the generation of aerosols for respiratory diseases studies. *Canadian Journal of Comparative Medicine*, 45 :406–409, 1981.
- [142] R.C. Young, J.E. Bennett, C.L. Vogel, P.P. Carbone, and V.T. DEVITA. Aspergillosis - the spectrum of the disease in 98 patients. *Medicine*, 49(2) :147–173, 1970.

- [143] T.E. Zaoutis, K. Heydon, J.H. Chu, T.J Walsh, and W.J. Steinbach. Epidemiology, outcomes, and costs of invasive aspergillosis in immunocompromised children in the usa. *Pediatrics*, 117(4) :e711–e716, 2006.
- [144] F. Zhang, M. Reeks, and M. Kissane. Particle resuspension in turbulent boundary layers and the influence of non-gaussian removal forces. *arXiv*, page 1204.6113, 2012.
- [145] F. Zhang, M. Reeks, M. Kissane, and R.J. Perkins. Particle resuspension in turbulent boundary layers and the influence of non-gaussian removal forces. *arXiv*, page 1206.1939, 2012.
- [146] Fan Zhang. *The Modelling of Particle Resuspension in a Turbulent Boundary Layer*. PhD thesis, School of Mechanical and Systems Engineering, Newcastle University, 2011.
- [147] G. Ziskind. Particle resuspension from surfaces : revisited and re-evaluated. *Journal of Aerosol Science*, 22(1-2) :1–123, 2006.
- [148] G. Ziskind, M. Fichman, and C. Gutfinger. Resuspension of particulates from surfaces to turbulent flows - review and analysis. *Journal of Aerosol Science*, 26(4) :613–644, 1995.
- [149] G. Ziskind, M. Fichman, and C. Gutfinger. Adhesion moment model for estimating particle detachment from a surface. *Journal of Aerosol Science*, 28(4) :623–634, 1997.
- [150] M.L. Zoetewij, J.C.J. van der Donck, and R. Versluis. Particle removal in linear shear flow : model prediction and experimental validation. *Journal of Adhesion*, 23 :899–911, 2009.

Annexes

Annexe A

Introduction au calcul numérique

A.1 Modélisation mathématique et mécanique des fluides

Un modèle mathématique est une représentation abstraite, accessible à l'analyse et au calcul de la réalité physique. Gardons par conséquent à l'esprit que les équations qui vont suivre ne sont que des interprétations mathématiques de phénomènes observables. La modélisation représente une part considérable du travail du mathématicien appliqué et nécessite une connaissance approfondie, non seulement des mathématiques appliquées, mais aussi de la discipline scientifique à laquelle elles s'appliquent. Le présent chapitre n'est pas un cours de modélisation mathématique, et vise simplement à introduire le lecteur néophyte à des notions fondamentales pour la compréhension du problème posé et des outils qui vont être mis en place pour l'étudier, en particulier la simulation numérique.

Approximation des milieux continus

À l'oeil nu, un objet solide ou fluide semble être continu. Ses propriétés varient sans discontinuités. Pourtant, si l'on regarde de très près, à l'échelle nanoscopique, la matière est granulaire, faite d'atomes, et ses propriétés sont discontinues. L'hypothèse des milieux continus consiste à considérer la moyenne d'un grand nombre de particules sur un volume dont l'échelle de longueur est très grande devant le libre parcours moyen des particules, permettant de supposer les propriétés du milieu continues. Cette approximation nous permet d'avoir recours aux outils de la théorie des champs, telles les notions de continuité ou de dérivabilité. Lorsqu'il s'agit d'un fluide, on y ajoute souvent les hypothèses d'homogénéité et d'isotropie.

Il peut arriver que l'approximation des milieux continus soit mise en défaut lorsque les objets étudiés deviennent très petits. C'est le cas par exemple lors de l'étude de la sédimentation de particules d'un diamètre aérodynamique inférieur au micromètre, comme nous l'avons vu au chapitre 3.3 en corrigeant la loi de Stokes par le facteur de correction de Cunningham afin d'obtenir la vitesse de sédimentation .

Fluide newtonien

En hommage aux travaux d'Isaac Newton (1643-1727) sur les fluides, on appelle fluide newtonien un fluide dont la vitesse de déformation est proportionnelle à la contrainte qu'il subit. Le coefficient de proportionnalité n'est autre que la viscosité dynamique. S'il est isotrope, c'est

à dire si ses propriétés ne dépendent pas de la direction, un fluide newtonien vérifie l'équation suivante :

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

où τ est la contrainte de cisaillement exercée par le fluide, μ la viscosité dynamique du fluide, et $\frac{du}{dy}$ le gradient de vitesse perpendiculaire à la direction de cisaillement. Sous ces conditions, la viscosité du fluide ne dépend que de la température et de la pression, mais pas des forces extérieures agissant sur le fluide. On adjoint souvent l'hypothèse d'incompressibilité du fluide. Elle signifie que son volume demeure constant sous l'action d'une pression externe. En réalité, cela signifie que les vitesses mises en jeu restent faibles par rapport à la célérité du son. En termes mathématiques, l'incompressibilité se caractérise par une masse volumique constante. Sous forme locale, cela se traduit par une condition sur la vitesse du fluide :

$$\operatorname{div} \vec{U} = 0$$

Contrairement à ce que l'on pourrait croire, les fluides non newtoniens sont nombreux dans notre quotidien : crème, dentifrice, pâtes, yaourt, miel, mousse à raser, encre *etc.* sont autant de fluides potentiellement non-newtonien. Une suspension de farine de maïs (Maïzena[®]), par exemple, a une viscosité qui augmente avec le gradient de vitesse : on peut aisément y pénétrer à faible vitesse mais difficilement à grande vitesse. C'est un fluide rhéoépaississant. Les propriétés non-newtoniennes peuvent avoir des applications pratiques, par exemple pour fabriquer des peintures faciles à étaler mais plus visqueuses une fois étalées. Il s'agit alors de fluides rhéofluidifiants.

Équations de Navier-Stokes

Les équations de Navier-Stokes sont des équations aux dérivées partielles qui décrivent le mouvement des fluides newtoniens dans l'approximation des milieux continus. Elles résultent des travaux du physicien Adhémar Barré de Saint-Venant (1797-1886), du mathématicien Claude Navier (1785-1836) et du physicien George Gabriel Stokes (1819-1903). Leur champ d'application est très vaste. Il va de la propulsion aérospatiale aux prédictions météorologiques, en passant par le dessin des coques de bateaux et des profils d'avions, sans oublier l'océanographie, le domaine de l'énergie, *etc.*

Les équations de Navier-Stokes sont non-linéaires dans pratiquement toutes les situations réelles. Dans certains cas, comme les écoulements unidimensionnels ou encore ceux où les effets visqueux dominent sur les effets inertiels (appelés écoulements de Stokes), elles peuvent être linéarisées, rendant parfois possible leur résolution analytique. En effet, la non-linéarité rend la plupart des problèmes difficiles voire impossibles à résoudre, et aussi surprenant que cela puisse paraître étant donné l'importance majeure qu'elles ont acquis dans le monde de l'ingénierie, ces équations n'ont toujours pas été résolues dans le cas général. Pire encore, il n'a pas été prouvé mathématiquement qu'elles admettent toujours une solution. Le problème de l'existence d'une solution aux équations de Navier-Stokes dans leur forme générale constitue l'un des problèmes du prix du millénaire, compilant sept problèmes mathématiques réputés insurmontables.

La non linéarité des équations de Navier-Stokes est le contributeur principal à la turbulence, qui est le comportement chaotique de la plupart des écoulements. Elle rend la résolution numérique de ces équations complexe, car de nombreuses échelles de longueur et de temps sont impliquées dans un écoulement turbulent, nécessitant une finesse de discrétisation telle que les calculs seraient beaucoup trop longs et coûteux en mémoire. Pour pallier à cela, des modèles de turbulence sont utilisés.

Les équations de Navier-Stokes sont obtenues en appliquant des lois de conservation à une particule fluide, c'est à dire un volume de contrôle dont la taille caractéristique est très grande devant le libre parcours moyen des particules qui composent la matière. Une loi de conservation exprime le fait qu'une propriété mesurable particulière d'un système physique reste constante au cours de l'évolution de ce système. En appliquant les principes de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie à une particule fluide, on obtient les équations de Navier-Stokes dans leur expression la plus générale, dont voici une formulation différentielle :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_f \vec{U}) = 0 \\ \qquad \qquad \qquad \text{Conservation de la masse (ou équation de la continuité)} \\ \frac{\partial (\rho_f \vec{U})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_f \vec{U} \otimes \vec{U}) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \vec{\bar{\tau}} + \rho_f \vec{f} \\ \qquad \qquad \qquad \text{Quantité de mouvement} \\ \frac{\partial (\rho_f e)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [(\rho_f e + p)\vec{U}] = \vec{\nabla} \cdot (\vec{\bar{\tau}} \cdot \vec{U}) + \rho_f \vec{f} \cdot \vec{U} - \vec{\nabla} \cdot (\vec{q}) + r \\ \qquad \qquad \qquad \text{Conservation de l'énergie totale} \end{array} \right. \quad (\text{A.1})$$

Dans ces équations :

- t représente le temps
- ρ_f représente la masse volumique du fluide
- $\vec{U} = (u, v, w)$ désigne la vitesse d'une particule fluide
- p désigne la pression dans une particule fluide
- $\vec{\bar{\tau}} = (\tau_{i,j})$ est le tenseur des contraintes visqueuses
- \vec{f} désigne la résultante des forces volumiques s'exerçant dans le fluide
- e est l'énergie totale par unité de masse
- \vec{q} est le flux de chaleur perdu par conduction thermique
- r représente la perte de chaleur volumique due au rayonnement

Nous allons nous intéresser dans la suite à des écoulements isothermes : on résoudra donc pas l'équation de l'énergie totale. Le fluide sera considéré incompressible, sa viscosité sera donc prise constante. Il sera de même considéré newtonien : $\vec{\bar{\tau}} = 2\mu\vec{s}$. Enfin, on ne tiendra compte pour les forces volumiques que du poids de la particule fluide : $f = g$. On résoudra donc le système suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{U} \otimes \vec{U}) = \frac{-1}{\rho_f} \vec{\nabla} p + \mu \Delta \vec{U} + \vec{g} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{U} = 0 \end{array} \right. \quad (\text{A.2})$$

A.2 La simulation numérique en mécanique des fluides

Lorsqu'il est impossible de calculer explicitement les solutions des modèles mathématiques, notamment dans le cas d'équations non-linéaires comme celles de Navier-Stokes. Il est nécessaire d'avoir recours au calcul numérique sur ordinateur pour estimer qualitativement et quantitativement ces solutions. Le principe de toutes les méthodes de résolution numérique des équations aux dérivées partielles est d'obtenir des valeurs numériques discrètes (c'est à dire en nombre fini) qui approchent la solution exacte. Dans ce procédé, il faut bien être conscient de deux points fondamentaux : premièrement, on ne calcule pas des solutions exactes mais approchées ; deuxièmement, on discrétise le problème en représentant des fonctions par un nombre fini de valeurs,

c'est à dire que l'on passe du continu au discret [6]. La simulation numérique en mécanique des fluides, ou mécanique des fluides numérique, est plus souvent désignée par son acronyme anglais CFD (pour *computational fluid dynamics*). Elle consiste à étudier les mouvements d'un fluide, ou ses effets, par la résolution numérique des équations régissant le fluide. C'est aujourd'hui un outil essentiel dans toutes les branches de la mécanique des fluides.

Du continu au discret

La résolution d'un problème de CFD passe par trois étapes. La première consiste à définir une géométrie et un domaine d'étude, ainsi qu'un maillage. Le maillage est une discrétisation du domaine de calcul, c'est à dire son découpage en petits éléments dans lesquels les équations seront résolues de proche en proche, ce qui constitue la deuxième étape. La troisième étape consiste à exploiter les résultats, par exemple à les visualiser à l'aide de logiciels dédiés.

La discrétisation est une notion centrale en calcul numérique. C'est une réponse à notre incapacité à résoudre les équations étudiées dans un espace continu. L'idée maîtresse est d'approcher la solution autant que possible en certains points, d'où la discrétisation de l'espace continu. Cette idée s'est par la suite prolongée par le découpage de l'espace continu en un partitionnement sur lequel on réalise une approximation par morceaux.

Schéma numérique

Nous allons illustrer cela par un exemple simple. Considérons l'équation linéaire d'advection (A.3). Nous allons la discrétiser selon la méthode des *différences finies* unidimensionnelle. Elle consiste à remplacer les dérivées partielles par des différences divisées ou une combinaison de valeurs ponctuelles de la fonction en chaque cellule du maillage.

$$\frac{\partial u}{\partial t}(x, t) + a \cdot \frac{\partial u}{\partial x}(x, t) = 0, \quad x \in [0, 1] \quad (\text{A.3})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{avec la condition aux limites : } u(0, t) = u(1, t) \quad \forall t \\ \text{et la condition initiale : } u(x, 0) = u_0(x) \quad \forall x \end{array} \right.$$

L'advection correspond au transport d'une quantité par un champ vectoriel. C'est une notion courante en mécanique des fluides car toutes les caractéristiques d'une particule fluide sont advectées lors de son déplacement au sein de l'écoulement. Nous allons développer un schéma numérique sur cette équation aux dérivées partielles. Un schéma numérique peut-être défini comme la formulation algébrique d'un problème discret. Les termes de l'équation d'advection sont des dérivées unidirectionnelles, ce qui se traduit par :

$$\frac{du}{dt}(x, t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{u(x, t + h) - u(x, t)}{h} \quad (\text{A.4})$$

$$\frac{du}{dx}(x, t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{u(x + h, t) - u(x, t)}{h}$$

Si l'on fixe h à la taille de discrétisation Δt ou Δx choisie suffisamment petite, on peut écrire :

$$\frac{du}{dt}(x, t) \simeq \frac{u(x, t + \Delta t) - u(x, t)}{\Delta t} \quad (\text{A.5})$$

$$\frac{du}{dx}(x, t) \simeq \frac{u(x + \Delta x, t) - u(x, t)}{\Delta x}$$

Appelons $u_i^n = u(i \cdot \Delta x, n \cdot \Delta t)$ la solution au temps $n \cdot \Delta t$ dans la cellule de discrétisation d'abscisse $i \cdot \Delta x$. En remplaçant les termes de l'équation d'advection (A.3) par leur valeurs approchées (A.5), on obtient le schéma numérique recherché :

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} + a \cdot \frac{u_i^n - u_{i-1}^n}{\Delta x} = 0 \tag{A.6}$$

$$u_i^{n+1} = (1 - \lambda)u_i^n + \lambda u_{i+1}^n \text{ avec } \lambda = a \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x}$$

Le schéma numérique ainsi défini par la méthode des différences finies nous permet de calculer de façon algorithmique, et donc implémentable informatiquement, toutes les valeurs de u de proche en proche, étant donné des conditions initiales adéquates.

Méthode de discrétisation

Il existe de nombreuses méthodes d'approximation numérique des solutions d'équations aux dérivées partielles. Les plus utilisées sont la méthode des *différences finies*, la méthode des *volumes finis* et la méthode des *éléments finis*. La première, dont nous venons de voir une application est une des plus anciennes. C'est également la plus simple, et son utilisation est limitée à des géométries simples car elle est très contraignante en terme de maillages admissibles. Elle est encore utilisée pour certaines applications, comme la propagations d'ondes ou la mécanique des fluides compressibles. Pour d'autres applications, comme la mécanique du solide ou celle des fluides incompressibles, on lui préfère souvent la méthode des éléments finis. Néanmoins, de nombreux concepts en différences finies se retrouvent dans toutes les autres méthodes numériques.

La méthode des *volumes finis* intègre, sur des volumes élémentaires, les équations écrites sous forme de lois de conservations. Elle fournit des approximations particulièrement bien adaptées aux équations de la mécanique des fluides et permet de traiter des géométries complexes. C'est à ce titre l'approche la plus couramment utilisée par les logiciels de CFD. Elle est particulièrement bien adaptée pour les équations hyperboliques, qui sont la généralisation des équations de transport, parce qu'elles sont décentrées. La méthode des *éléments finis* consiste à approcher, dans un sous-espace de dimension finie, un problème écrit sous forme variationnelle dans un espace de dimension finie. Elle permet de traiter des géométries complexes mais la complexité de sa mise en oeuvre et son grand coût en temps de calcul limitent son utilisation. Elle est applicable à la mécanique des fluides mais est surtout utilisée en analyse structurale des solides. Elle est particulièrement bien adaptée aux équations elliptiques, qui sont les équations d'équilibre des contraintes, parce qu'elles sont centrées.

Ordre et précision

La discrétisation des opérateurs différentiels peut-être obtenue par les formules de Taylor. Brook Taylor (1685-1731), inventeur notamment de l'intégration par parties, établit en 1715 qu'une fonction plusieurs fois dérivable au voisinage d'un point peut être approximée par une fonction polynomiale dont les coefficients dépendent uniquement des dérivées de la fonction en ce point.

Par exemple, en un point x et pour une valeur h du pas de discrétisation tels que la fonction $u(x)$ soit trois fois dérivable sur l'intervalle $[x - h, x + h]$, la formule de Taylor-Young conduit

aux deux relations :

$$\begin{aligned} u(x+h) &= u(x) + hu'(x) + \frac{h^2}{2}u''(x) + o(h^2), \forall h \in \mathbb{R} \\ u(x-h) &= u(x) - hu'(x) + \frac{h^2}{2}u''(x) + o(h^2), \forall h \in \mathbb{R} \end{aligned} \tag{A.7}$$

qui sont deux approximations de $u'(x)$ du premier ordre en h . $o(h^2)$ est la notation de Landau (Edmund Landau, 1877-1938) désignant une quantité négligeable devant h^2 . En soustrayant les développements précédents (A.7), ce qui revient à faire la moyenne des deux différences finies antérieure et postérieure à $u(x)$, on obtient une approximation de $u'(x)$ du second ordre en h :

$$\frac{u(x+h) - u(x-h)}{2h} = u'(x) + o(h^2), \forall h \in \mathbb{R}$$

De façon similaire, on peut obtenir des schémas de discrétisation d'ordres supérieurs. L'intérêt d'utiliser un schéma d'ordre élevé est, d'une part, d'obtenir une solution plus précise. Ne perdons pas de vue que nous calculons des solutions approchées, et qu'il existe donc une erreur d'approximation ϵ . Si notre schéma est d'ordre k , il existe une constante de proportionnalité C_k telle que :

$$\epsilon \leq C_k h^k \text{ [79]}$$

D'autre part, un schéma d'ordre k est tel que le nombre d'éléments requis est proportionnel à $\epsilon^{-d/k}$, quantité qui tend vers 1 lorsque k tend vers $+\infty$. Augmenter l'ordre nous permet donc de diminuer le nombre d'éléments de notre maillage. De ce point de vue, on pourrait penser qu'il y a tout intérêt à utiliser des schémas d'ordre le plus élevé possible. Cependant, plus l'ordre est élevé, plus le nombre d'opérations à faire pour chaque élément du maillage est élevé. Il existe donc pour chaque problème un ordre optimal.

Consistance, stabilité et convergence

La *convergence* d'un schéma numérique est une propriété théorique globale assurant que l'écart entre la solution exacte et la solution approchée tend vers zéro lorsque les pas de discrétisation ($\Delta t, \Delta x, \text{etc.}$) tendent vers zéro. Cet écart se manifeste par une combinaison de deux phénomènes : l'écart induit localement par les approximations inhérentes à l'opérateur discrétisé (c'est la notion de *consistance* ou de *robustesse* du schéma) ; la propagation des écarts qui, au cours des étapes de calcul, se combinent aux écarts précédents et peuvent s'amplifier (c'est la notion de *stabilité* du schéma). Ces notions ne considèrent pas les erreurs d'arrondi numérique qui peuvent encore compliquer les choses.

La *stabilité* d'un schéma numérique est une propriété globale de l'algorithme qui en découle. Elle concerne le comportement numérique qui se manifeste lorsque les pas de discrétisation tendent tous vers zéro. La stabilité du schéma ne doit pas être confondue avec la stabilité de la solution du problème d'origine. De plus, l'instabilité d'un schéma n'implique pas nécessairement que son application dans un cas particulier conduit à une divergence. La *consistance* d'un schéma numérique est une propriété locale de l'algorithme. Elle concerne la capacité du schéma à représenter une solution régulière satisfaisant localement les équations aux dérivées partielles lorsque les pas de discrétisation tendent vers zéro. C'est une propriété distincte de la convergence, et elle peut être vue comme l'expression de la continuité de l'opérateur de discrétisation. Dans le cas d'un schéma linéaire, le théorème de Lax–Richtmyer montre que sous certaines hypothèses, consistance et stabilité sont une condition nécessaire et suffisante de convergence du schéma numérique.

A.3 Le maillage

Un maillage est la discrétisation spatiale d'un milieu continu. Mathématiquement, il s'agit d'une partition d'un domaine Ω en cellules Ω_i . La partition est à l'espace ce que le pavage est au plan : un découpage du domaine de façon à ce qu'aucune cellule ne se recoupe (leur intersection est nulle) et à ce que l'union de toutes les cellules forment exactement le domaine complet (A.8). Le but d'un maillage est de procéder à une simplification du système par un modèle représentant ce système, dans l'optique de simulations ou de représentations graphiques. Un maillage est défini par son repère, les points le constituant et les arêtes reliant ces points. Il peut être caractérisé notamment par sa dimension (2D ou 3D), son volume, sa finesse, la géométrie de ses cellules, *etc.*

$$\begin{cases} \bigcap_i \Omega_i = \emptyset \\ \bigcup_i \Omega_i = \Omega \end{cases} \quad (\text{A.8})$$

Un maillage peut être *structuré* ou *non-structuré*. Un maillage non-structuré est un assemblage quelconque d'éléments de formes arbitraires. Un maillage structuré est un assemblage de parallépipèdes. Il peut également être *conforme* ou *non-conforme*. Dans un maillage non-conforme, le sommet d'un élément peut être situé sur l'arête d'un autre élément. Dans un maillage conforme, tous les nœuds du maillages se trouvent sur des sommets, et jamais au milieu d'une arête.

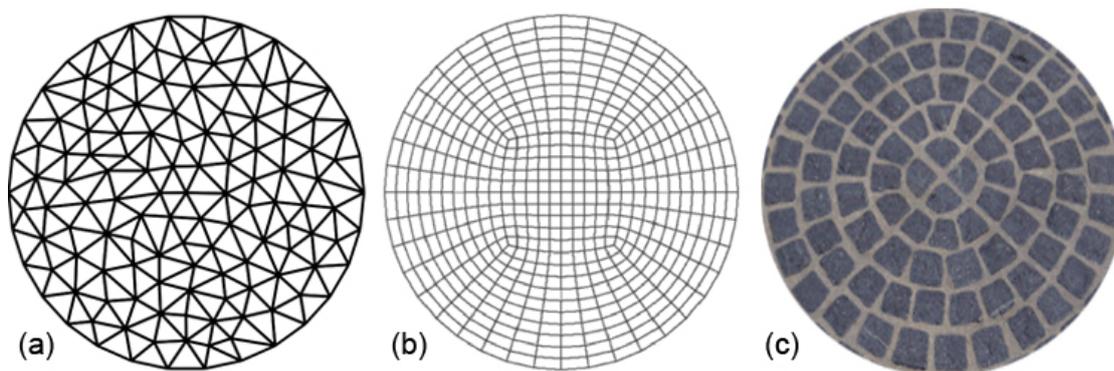


FIGURE A.1: Exemples de différents maillages d'un disque (a) non-structuré conforme (b) structuré conforme (c) non-structuré non-conforme

En théorie, plus un maillage est raffiné, plus la solution finale est précise. Cependant une telle précision a un coût en terme de temps de calcul, qui dans certains cas si l'on n'y prend pas garde peut atteindre plusieurs années. C'est pourquoi il est nécessaire de trouver un compromis entre précision et durée du calcul, qui requiert souvent un maillage moins précis là où c'est possible. Par exemple, on aura tendance à allonger les cellules selon le sens de l'écoulement, et à ne raffiner que localement, dans les zones où l'on s'attend à des variations rapides du champ calculé.

Il existe de nombreux critères, parfois empiriques, permettant d'évaluer la qualité d'un maillage. D'une façon générale, il est recommandé d'éviter d'avoir des cellules aux angles trop aigus, ainsi que des variations trop importantes de tailles entre cellules voisines. Le lecteur pourra à se su-

jet se référer aux travaux de Boris Delaunay (1890-1980) et Gueorgui Feodossievitch Voronoï (1868-1908). Le maillage, à ce titre, s’approche bien souvent d’un art.

A.4 *Code_Saturne*

Code_Saturne est un code de calcul qui résout numériquement les équations de Navier-Stokes. Depuis 2008, il est libre, ouvert et téléchargeable à l’adresse suivante : <http://code-saturne.org>. Il s’applique à des écoulements bi et tridimensionnels, stationnaires et instationnaires, laminaires et turbulents, newtoniens, incompressibles ou faiblement dilatables, isothermes ou non, avec prise en compte de scalaires passifs et la possibilité de modéliser les fluctuations de scalaires. Le code comprend différents modules : un module lagrangien, un module de rayonnement semi-transparent, un module de combustion pour les gaz, un module pour le charbon pulvérisé et un module pour les applications comprenant des phénomènes électriques (effet Joule et arc électrique).

La discrétisation est de type volumes finis colocalisés, et les maillages sont par défaut non structurés (approche colocalisée polyédrique). *Code_Saturne* est séparé en deux parties : l’enveloppe chargée du pré-traitement (maillages, données géométriques, découpage pour le parallélisme, recollements) et du post-traitement (génération de fichiers lisibles par des logiciels de visualisation, cette partie est progressivement intégrée au noyau) et le noyau, partie physique du code, correspondant à la résolution proprement dite des équations de Navier-Stokes. *Code_Saturne* permet l’utilisation d’un grand nombre de modèles de turbulence.

Le développement de *Code_Saturne* répond à un besoin d’EDF de disposer d’un code versatile pouvant s’adapter à des besoins variés. Afin de disposer de plus de retours utilisateurs, et également de simplifier les différents contrats de collaborations, le code a été mis en *open source*. Cela signifie que les fichiers sources sont librement consultables et modifiables. *Code_Saturne* est par conséquent un code de calcul clairement orienté vers la recherche puisqu’il est totalement transparent, contrairement aux codes du commerce, et permet à l’utilisateur de le modifier sans aucune restriction. Cela le rend cependant plus délicat à utiliser qu’un code du commerce puisqu’il n’y a pas de gardes-fous, et que l’interface graphique est limitée au strict minimum, ce qui le rend moins facile à prendre en main. Il est aujourd’hui inclus dans une distribution linux contenant de nombreux autres outils de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) qui simplifie et automatise son installation : <http://caelinux.com/>.

Nous avons travaillé avec la version de production 2.0 du code. La version intermédiaire 2.3 est sortie en Juillet 2012.

Annexe B

Profil de Blasius

Écoulement sur un plaque plane

Le fait que la particule étudiée soit posée sur un plan change fondamentalement notre problème. La particule fait désormais face à un champ de vitesse ayant un profil de type couche limite, dont nous ne connaissons pas la forme *a priori*. Sachant, d'après la taille des particules qui nous intéressent, que nous nous trouvons dans la sous-couche visqueuse de la couche limite, nous pourrions nous contenter d'appliquer un profil de vitesse linéaire, dont la pente dépendrait du nombre de Reynolds local. Nous allons cependant établir ce résultat analytiquement, à partir des équations de Navier-Stokes. Dans les pages qui suivent, nous allons étudier le cas d'un écoulement sur une plaque plane semi-infinie, sans autre obstacle, afin de déterminer le profil de vitesse auquel fera face la particule une fois posée sur la plaque. Cet écoulement est appelé écoulement de Blasius.

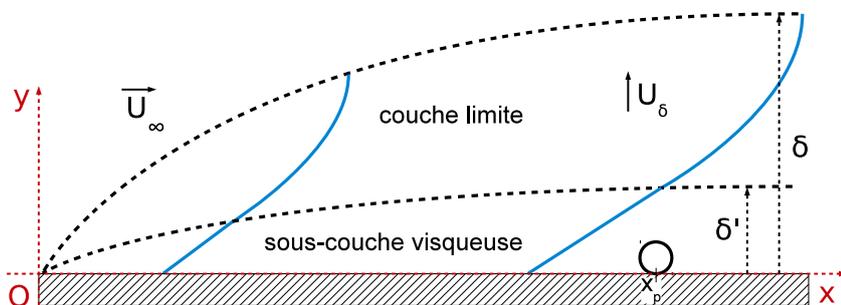


FIGURE B.1: Écoulement de Blasius le long d'une plaque plane ; couche limite et sous-couche visqueuse, dans laquelle le profil de vitesse est linéaire.

Le schéma B.1 représente l'écoulement d'un fluide le long d'une plaque plane semi infinie, dont le bord est placé à l'origine d'un repère orthonormal. En dehors de la couche limite, l'écoulement n'est pas perturbé : il ne « voit pas » l'obstacle. Commençons par considérer que l'écoulement étudié a atteint le régime permanent : cela signifie qu'il n'évolue plus en fonction du temps. En particulier, en coordonnées cartésiennes :

$$\vec{U}(u, v, w, t) = \vec{U}(u, v, w) \text{ et } p(x, y, z, t) = p(x, y, z) \quad (\text{B.1})$$

Toutes les dérivées temporelles sont donc nulles et toutes les variables ne dépendent plus du temps. Nous faisons l'hypothèse d'un écoulement incompressible (divergence de la vitesse nulle) et ne subissant aucune force massique ($g = 0$). Ces hypothèses faites, les équations de Navier-Stokes (A.1) peuvent se simplifier :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \cdot \vec{\nabla} \cdot (\vec{U}) = 0 \\ \rho \cdot \vec{\nabla} \cdot (\vec{U} \otimes \vec{U}) = -\vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau} \\ \vec{\nabla} \cdot [(\rho e + p)\vec{U}] = \vec{\nabla} \cdot (\vec{\tau} \cdot \vec{U}) + \rho \vec{f} \cdot \vec{U} - \vec{\nabla} \cdot (\vec{q}) + r \end{array} \right. \quad (\text{B.2})$$

L'hypothèse d'incompressibilité a pour conséquence de découpler d'une part les équations de continuité et de bilan de la quantité de mouvement, et d'autre part l'équation de bilan d'énergie. En d'autres termes, cela signifie que la vitesse et la pression peuvent être déterminées indépendamment par l'une ou l'autre des équations. L'équation de bilan de l'énergie est donc redondante et nous pouvons ne conserver que les deux autres. Nous obtenons alors :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{div } \vec{U} = 0 & \text{Incompressibilité} \\ (\vec{U} \cdot \overrightarrow{grad})\vec{U} + \frac{1}{\rho} \overrightarrow{grad} p = \nu \Delta \vec{U} & \text{Quantité de mouvement} \end{array} \right. \quad (\text{B.3})$$

Pour que le problème soit bien posé, il faut ajouter les conditions limites traduisant le non-glissement du fluide sur les parois de la plaque ($\vec{U} = \vec{0}$ sur la paroi). Comme l'écoulement est bidimensionnel, le flux dépend uniquement des coordonnées x et y et $w = 0$. Cette remarque nous permet d'écrire simplement les équations précédentes dans un système de coordonnées cartésiennes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \\ u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \\ \text{conditions limites : } u(x, 0) = v(x, 0) = 0 \end{array} \right. \quad (\text{B.4})$$

Nous allons séparer l'écoulement en deux zones distinctes. D'une part la zone où l'écoulement n'est pas perturbé par la plaque, et où nous allons pouvoir négliger les effets de la viscosité ; d'autre part la zone proche de la plaque, où les effets de la viscosité ne peuvent plus être négligés mais où nous allons pouvoir faire une analyse d'échelle. L'expression du nombre de Reynolds est univoque puisqu'il n'y a pas de particule posée sur la paroi pour l'instant :

$$Re = \frac{U_\infty L}{\nu} = Re_P \quad (\text{B.5})$$

U_∞ est la valeur de la vitesse non perturbée, c'est à dire loin de la plaque. La plaque étant semi infinie dans la direction de l'écoulement, nous choisissons de prendre la distance caractéristique L égale à la distance entre le bord de la plaque et l'endroit où nous observons l'écoulement (et où nous placerons ultérieurement la sphère soit x_p).

Léonhard Euler (1707-1783)

Commençons donc par observer l'écoulement loin de la plaque. Nous allons utiliser les deux paramètres U_∞ et L pour adimensionner notre système d'équation.

$$\bar{x} = \frac{x}{L} ; \bar{y} = \frac{y}{L} ; \bar{u} = \frac{u}{U_\infty} ; \bar{v} = \frac{v}{U_\infty} ; \bar{p} = \frac{p - p_\infty}{\rho U_\infty^2}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} = 0 \\ \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}} + \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} = \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{y}^2} \right) \\ \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} + \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{y}} = \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{y}^2} \right) \end{cases} \quad (\text{B.6})$$

Comme nous ne considérons que la zone non perturbée de l'écoulement, nous négligeons les effets de la viscosité. Cela revient à considérer que ν est très petit, donc que le nombre de Reynolds est très grand. Nous pouvons par conséquent négliger les termes visqueux devant les termes d'inertie.

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} = 0 \\ \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}} + \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} = 0 \\ \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} + \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{y}} = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \text{div } \vec{U} = 0 \\ (\vec{U} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}) \vec{U} + \overrightarrow{\text{grad}} p = \vec{0} \end{cases} \quad (\text{B.7})$$

Ce sont les équations d'Euler (fluide parfait) [36]

Les équations s'appliquent dans le cas d'un fluide parfait, c'est à dire un fluide non visqueux et sans conductivité thermique. Elles sont ici présentées dans une version simplifiée puisque nous avons précédemment fait l'hypothèse d'un écoulement ayant atteint le régime permanent et ne subissant aucune force de masse : la forme complète des équations d'Euler est plus complexe. Il n'était pas indispensable d'adimensionner les variables à ce niveau, puisqu'il suffisait d'annuler les termes visqueux dans les équations de Navier-Stokes pour obtenir le même résultat. Nous sommes donc face à des équations décrivant un écoulement non visqueux et parallèle à une plaque plane. La solution est triviale puisque l'écoulement n'est pas perturbé par la plaque. On a $u = U_\infty, v = 0$ et $p = p_\infty$ partout. Cela entre en contradiction avec les conditions limites qui imposent $u(x, 0) = 0$, c'est à dire le non glissement de l'écoulement sur la plaque.

Il existe donc nécessairement une région, d'épaisseur évanescence lorsque le nombre de Reynolds tend vers l'infini, où u varie de 0 à U_∞ très rapidement, satisfaisant ainsi la condition de non-glissement. C'est la couche limite. Les équations d'Euler, décrivant par définition le comportement d'un fluide parfait, ne permettent pas de résoudre le problème dans la couche limite où les effets de la viscosité ne sont plus négligeables. Nous allons donc établir une nouvelle approximation permettant à la fois de satisfaire la condition limite et d'être connectée à la solution d'Euler.

Ludwig Prandtl (1875-1953)

Nous nous plaçons à présent à l'intérieur de la couche limite, et nous allons introduire deux nouveaux paramètres : δ , l'épaisseur de la couche limite et U_δ , la vitesse normale à la paroi dans

la sous-couche visqueuse. Nous adimensionnons à nouveau nos variables en utilisant ces nouvelles grandeurs, ainsi que les précédentes :

$$\tilde{x} = \frac{x}{L} ; \tilde{y} = \frac{y}{\delta} ; \tilde{u} = \frac{u}{U_\infty} ; \tilde{v} = \frac{v}{U_\delta} : \tilde{p} = \frac{p - p_\infty}{\rho U_\infty^2}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} + \frac{LU_\delta}{\delta U_\infty} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{y}} = 0 \\ \tilde{u} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} + \frac{LU_\delta}{\delta U_\infty} \tilde{v} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{y}} + \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}} = \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{L^2}{\delta^2} \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial \tilde{y}^2} \right) \\ \tilde{u} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{x}} + \frac{LU_\delta}{\delta U_\infty} \tilde{v} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{y}} + \frac{LU_\infty}{\delta U_\delta} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{y}} = \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 \tilde{v}}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{L^2}{\delta^2} \frac{\partial^2 \tilde{v}}{\partial \tilde{y}^2} \right) \end{array} \right. \quad (\text{B.8})$$

Procédons alors à une analyse d'échelle. Pour commencer, l'épaisseur de la couche limite est très petite devant la distance entre le bord de la plaque et le point où nous observons l'écoulement. De plus, la vitesse normale à la paroi dans la couche limite est très petite devant la vitesse de l'écoulement non perturbé.

$$\delta \ll L ; U_\delta \ll U_\infty \quad (\text{B.9})$$

Ensuite, comme nous avons adimensionné chaque variable avec une grandeur caractéristique de sa valeur, nous pouvons supposer que les termes $\frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}}$ et $\frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{y}}$ sont du même ordre de grandeur. Il en découle que :

$$\frac{LU_\delta}{\delta U_\infty} \sim 1 \quad (\text{B.10})$$

Évaluons à présent la quantité $\frac{1}{Re} \frac{L^2}{\delta^2}$. Commençons par supposer cette quantité très grande : $\frac{1}{Re} \frac{L^2}{\delta^2} \gg 1$. Le système précédent se simplifie et il est alors aisé de le résoudre.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{y}} = 0 \\ \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial \tilde{x}^2} = 0 \\ \frac{\partial^2 \tilde{v}}{\partial \tilde{y}^2} = 0 \end{array} \right. \quad (\text{B.11})$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial \tilde{x}^2} = 0 \Rightarrow \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} = a(y) \Rightarrow \tilde{u} = a(\tilde{y})\tilde{x} + b$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{v}}{\partial \tilde{y}^2} = 0 \Rightarrow \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{y}} = c(\tilde{x}) \Rightarrow \tilde{v} = c(\tilde{x})\tilde{y} + d$$

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{y}} = 0 \Rightarrow a(\tilde{y}) = -c(\tilde{x}) \forall \tilde{x}, \tilde{y} \Rightarrow a = c = \text{constante}$$

Nous venons ainsi de montrer que si $\frac{1}{Re} \frac{L^2}{\delta^2} \gg 1$, alors \tilde{u} et \tilde{v} sont constants. Il suffit donc de connaître leurs valeurs en un point pour les connaître toutes. Or les conditions limites imposent leur nullité sur la plaque. Elles sont donc nulles partout. Cette solution triviale ne peut pas être connectée à la solution d'Euler et n'est donc pas valide. L'hypothèse de départ est fautive.

Supposons alors au contraire que $\frac{1}{Re} \frac{L^2}{\delta^2} \ll 1$. Notre système se simplifie à présent de la façon suivante :

$$\begin{cases} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} + \frac{LU_\delta}{\delta U_\infty} d \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{y}} = 0 \\ \tilde{u} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} + \frac{LU_\delta}{\delta U_\infty} \tilde{v} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{y}} + \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}} = 0 \\ \tilde{u} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{x}} + \frac{LU_\delta}{\delta U_\infty} \tilde{v} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{y}} + \frac{LU_\infty}{\delta U_\delta} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{y}} = 0 \end{cases} \quad (\text{B.12})$$

Sachant que $\frac{LU_\delta}{\delta U_\infty} \sim 1$, on retrouve alors les équations d'Euler, qui comme nous l'avons déjà montré, sont incompatibles avec la condition de non-glissement. Par conséquent, nous avons nécessairement :

$$\frac{1}{Re} \frac{L^2}{\delta^2} \sim 1 \quad (\text{B.13})$$

Ceci traduit le fait que dans la couche limite, les effets visqueux et les phénomènes d'inertie sont du même ordre de grandeur. Cela n'est pas surprenant puisque le frottement visqueux est le seul phénomène physique capable d'expliquer le freinage du fluide par la paroi. Nous pouvons à présent évaluer l'ordre de grandeur de nos deux paramètres, en utilisant les équations (B.10) et (B.13), ce qui nous permet de réécrire notre système d'équations avec pour seul paramètre le nombre de Reynolds.

$$\delta \sim \frac{L}{\sqrt{Re}} ; U_\delta \sim \frac{U_\infty}{\sqrt{Re}} \quad (\text{B.14})$$

Ces deux ordres de grandeurs sont très intéressants car ils nous permettent d'estimer à la main l'épaisseur de la couche limite ainsi que la vitesse de l'écoulement à mi-hauteur en fonction de paramètres directement mesurables expérimentalement.

$$\begin{cases} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{y}} = 0 \\ \tilde{u} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} + \tilde{v} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{y}} + \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}} = \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial \tilde{y}^2} \\ \frac{1}{Re} \left(\tilde{u} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} + \tilde{v} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{y}} \right) + \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}} = \frac{1}{Re^2} \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial \tilde{y}^2} \end{cases} \quad (\text{B.15})$$

Comme le nombre de Reynolds est grand, nous pouvons nous débarrasser des termes négligeables. Nous obtenons ainsi les équations de la couche limite :

$$\begin{cases} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{y}} = 0 & \text{(i)} \\ \tilde{u} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} + \tilde{v} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{y}} + \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{x}} = \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial \tilde{y}^2} & \text{(ii)} \\ \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{y}} = 0 & \text{(iii)} \end{cases} \quad (\text{B.16})$$

Ce sont les équations de la couche limite de Prandtl [36]

$$\text{avec les conditions de raccordement à la solution d'Euler} \begin{cases} \lim_{y \rightarrow \infty} \tilde{u}(x, y) = \lim_{y \rightarrow 0} \bar{u}(x, y) = 1 \\ \lim_{y \rightarrow \infty} \tilde{p}(x, y) = \lim_{y \rightarrow 0} \bar{p}(x, y) = 1 \end{cases}$$

et les conditions aux limites : $u(x, 0) = v(x, 0) = 0$

Henrich Blasius (1883-1970)

Dans le cas particulier de l'écoulement sur une plaque plane, nous pouvons encore effectuer quelques simplifications. La troisième équation de Prandtl (B.16.iii) implique :

$$\tilde{p}(x, y) = \tilde{p}(x) = \lim_{y \rightarrow \infty} \tilde{p}(x, y) = 1$$

Cela signifie que la pression est constante et égale à p_∞ dans la couche limite. Notre écoulement est donc décrit par le système suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{y}} = 0 \quad \text{(i)} \\ \tilde{u} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} + \tilde{v} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{y}} = \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial \tilde{y}^2} \quad \text{(ii)} \end{array} \right. \text{ avec les conditions aux limites } \left\{ \begin{array}{l} \tilde{u}(x, 0) = \tilde{v}(x, 0) = 0 \\ \lim_{y \rightarrow \infty} \tilde{u}(x, y) = 1 \end{array} \right. \quad (\text{B.17})$$

L'équation de la continuité (B.17.i) est équivalente à dire que $\tilde{u}d\tilde{y} + \tilde{v}d\tilde{x}$ est une forme différentielle fermée. Le théorème de Schwarz, également connu sous le nom du théorème de Clairaut (d'après les mathématiciens Alexis Claude Clairaut, 1713-1765 et Karl Hermann Amandus Schwarz, 1843-1921), indique que toute forme différentielle exacte est fermée. La réciproque est fautive en général, mais le lemme de Poincaré (Henri Poincaré, 1854-1912) indique qu'elle est vraie sur un ouvert étoilé de \mathbb{R}^n , donc *a fortiori* sur \mathbb{R}^3 . Par conséquent, la forme différentielle $\tilde{u}d\tilde{y} + \tilde{v}d\tilde{x}$ est exacte, et cela implique qu'il est possible de l'intégrer. En d'autres termes, il existe une fonction ψ telle que [36, 39] :

$$\begin{pmatrix} -\tilde{v} \\ \tilde{u} \end{pmatrix} = \overrightarrow{\text{grad}} \psi \quad (\text{B.18})$$

$$\tilde{u} = \frac{\partial \psi}{\partial \tilde{y}} ; \tilde{v} = -\frac{\partial \psi}{\partial \tilde{x}} \quad (\text{B.19})$$

ψ est appelée la fonction de courant. Nous introduisons alors la variable réduite s ainsi que la fonction de courant réduite $f(s)$ comme suit :

$$s = \frac{\tilde{y}}{\sqrt{\tilde{x}}} ; f(s) = \frac{\psi(\tilde{x}, \tilde{y})}{\sqrt{\tilde{x}}} \quad (\text{B.20})$$

Nous pouvons alors exprimer chaque terme de l'équation (B.17.ii) en fonction de la fonction de courant réduite ou de l'une de ses dérivées :

$$\begin{aligned} \tilde{u} &= f'(s) \\ \tilde{v} &= \frac{1}{2\sqrt{\tilde{x}}} [s f'(s) - f(s)] \\ \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} &= \frac{-1}{2\sqrt{\tilde{x}}} s f''(s) \\ \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{y}} &= \frac{1}{\sqrt{\tilde{x}}} f''(s) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tilde{u} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} &= \frac{-1}{2\tilde{x}} s f'(s) f''(s) \\ \tilde{v} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{y}} &= \frac{1}{2\tilde{x}} [s f'(s) f''(s) - f(s) f''(s)] \\ \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial \tilde{y}^2} &= \frac{1}{\tilde{x}} f'''(s)\end{aligned}$$

En réinjectant ces expressions dans l'équation (B.17.ii) nous obtenons :

$$f f' + 2f''' = 0 \quad (\text{B.21})$$

C'est l'équation de Blasius

Il ne reste plus qu'à transposer les conditions limites ainsi que les conditions de raccordement :

$$\begin{array}{ll} y = 0 \Rightarrow s = 0 & \text{donc} \\ y \rightarrow +\infty \Rightarrow s \rightarrow +\infty & \text{donc} \end{array} \quad \left\{ \begin{array}{l} u(x, 0) = 0 \Leftrightarrow f'(0) = 0 \\ v(x, 0) = 0 \Leftrightarrow f(0) = 0 \\ u(x, y \rightarrow +\infty) = V_\infty \Leftrightarrow f'(s \rightarrow +\infty) = 1 \end{array} \right.$$

ce qui nous donne au final :

$$\left\{ \begin{array}{l} f(0) = f'(0) = 0 \\ \lim_{s \rightarrow \infty} f'(s) = 1 \end{array} \right. \quad (\text{B.22})$$

L'équation de Blasius ne peut pas être intégrée analytiquement. Néanmoins, nous pouvons transformer l'équation différentielle non-linéaire du troisième ordre (B.21) en un système d'équations différentielles du premier ordre. Il suffit pour cela de poser $f' = g$ et $g' = h$, afin d'obtenir :

$$\left\{ \begin{array}{l} f' = g \\ g' = h \\ h' = -\frac{1}{2} f h \end{array} \right. \quad \text{avec} \quad \left\{ \begin{array}{l} f(0) = 0 \\ g(0) = 0 \\ h(0) = \alpha \text{ tel que } g(+\infty) = 1 \end{array} \right. \quad (\text{B.23})$$

Ce système peut alors être résolu numériquement et à la précision voulue, par exemple en utilisant une méthode de Runge-Kutta d'ordre 4. Nous détaillons cette résolution et proposons un algorithme en annexe (C.1). Les fonctions f et f' obtenues numériquement ont alors la forme représentée sur le graphique de la figure (B.2). Une fois les valeurs de f et f' calculées, nous pouvons revenir aux valeur dimensionnelles de la vitesse comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} u(x, y) = U_\infty f'(s) \quad (a) \\ v(x, y) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\nu U_\infty}{x}} (s f'(s) - f(s)) \quad (b) \end{array} \right. \quad (\text{B.24})$$

Il est intéressant de remarquer que les profils de vitesses obtenus pour différentes abscisses ont la propriété d'être autosimilaires. Nous ne rentrerons pas dans les détails théoriques de cette propriété, mais cela signifie que tout au long de leur évolution le long de la paroi, ils conservent exactement la même forme, et changent seulement d'échelle. Ces profils pour différentes abscisses sont représentés figure (B.3). On observe également qu'une certaine portion du profil, proche de la paroi, peut-être approximée par un profil linéaire. Il s'agit de la sous-couche visqueuse.

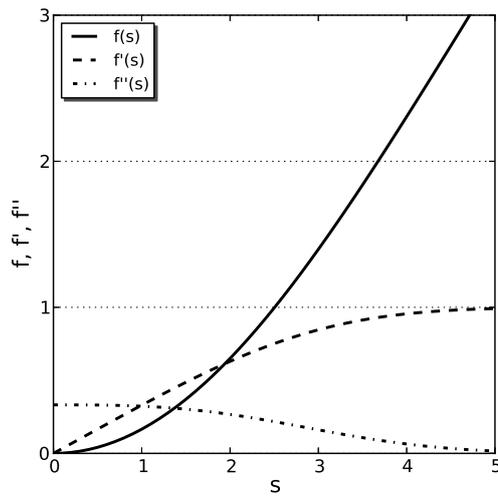


FIGURE B.2: Représentation graphique de la solution numérique de l'équation de Blasius

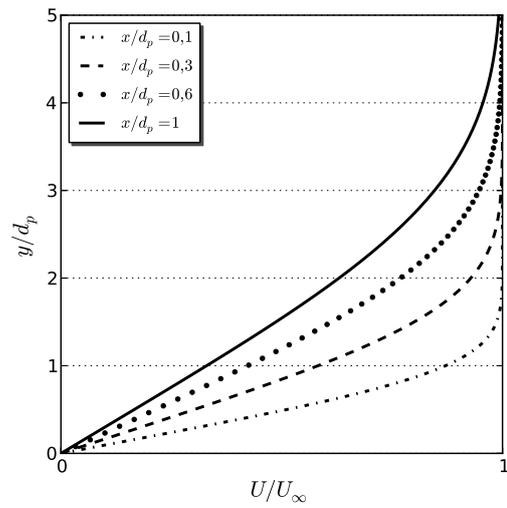


FIGURE B.3: Profils de blasius pour différentes valeurs de l'abscisse

Notons au passage que le pas de discrétisation choisi lors du calcul du profil de Blasius influe notablement sur la précision de calcul des coefficients de traînée et de portance. Nous avons observé un écart pouvant atteindre 10 % entre un pas de discrétisation sur la variable réduite s de 10^{-2} et de 10^{-6} ; Cet écart se réduit à 1 % entre un pas de 10^{-4} et un pas de 10^{-6} . Nous avons réalisé nos calculs avec un profil de blasius calculé pour s allant de 0 à 10, et un pas de discrétisation de 10^{-6} , soit 10^7 points.

Annexe C

Sources

L'avantage de *Code_Saturne* et des logiciels ouverts d'une façon plus générale est de permettre à l'utilisateur de modifier lui-même les sources par l'intermédiaire de fichiers utilisateurs, ce qui n'est pas possible avec les logiciels commerciaux. Bien que proposant une interface graphique permettant de configurer la plupart des paramètres les plus courants des calculs tels que les conditions aux limites, les modèles de turbulence ou les pas de calculs par exemple, il est possible de passer outre et de régler tous ces paramètres, et bien d'autres, directement dans les fichiers utilisateurs. Cela permet d'avoir accès à la totalité des paramètres, ce qui n'est pas le cas de l'interface graphique, et même de rajouter des portions de code, ce que nous avons fait par exemple pour calculer la force résultante exercée par le flux sur les particules, ou encore pour définir le profil de vitesse que nous imposons en entrée.

C.1 Calcul du profil de Blasius

Reprenons l'équation de Blasius, censée décrire l'écoulement laminaire d'un fluide newtonien sur une plaque plane. Nous avons obtenu le problème suivant (équations B.21 et B.22) :

$$ff' + 2f''' = 0 \text{ avec } \begin{cases} f(0) = f'(0) = 0 \\ \lim_{s \rightarrow \infty} f'(s) = 1 \end{cases} \quad (\text{C.1})$$

Si nous parvenons à résoudre ce système, il est alors aisé de se ramener aux valeurs dimensionnelles de la vitesse :

$$\begin{cases} u(x, y) = U_\infty f'(s) & (a) \\ v(x, y) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\nu U_\infty}{x}} (s f'(s) - f(s)) & (b) \end{cases}$$

L'équation de Blasius (C.1) ne peut pas être intégrée analytiquement, mais nous pouvons la transformer en un système d'équations différentielles du premier ordre en posant $f' = g$ et $g' = h$.

$$\begin{cases} f' = g \\ g' = h \\ h' = -\frac{1}{2}fh \end{cases} \text{ avec } \begin{cases} f(0) = 0 \\ g(0) = 0 \\ h(0) = \alpha \text{ tel que } g(+\infty) = 1 \end{cases} \quad (\text{C.2})$$

Nous pouvons alors résoudre numériquement ce système à la précision voulue. Nous allons utiliser pour cela un algorithme de Runge-Kutta associé à une méthode de tir, dont nous allons expliquer le principe, puis donner l'implémentation informatique que nous avons utilisée pour nos calculs, en **Fortran90**.

Principe

Tout d'abord, il nous faut déterminer le réel α , ce que nous allons faire par une méthode dite « de tir ». Cette méthode consiste à choisir une première valeur α_1 , à résoudre pour obtenir le réel β_1 tel que $g(+\infty)_{\alpha_1} = \beta_1$; puis à choisir une deuxième valeur α_2 et obtenir β_2 tel que $g(+\infty)_{\alpha_2} = \beta_2$. On détermine alors par interpolation linéaire la valeur de α_3 permettant d'obtenir $\beta = 1$:

$$\frac{\beta - \beta_1}{\beta_2 - \beta_1} = \frac{\alpha_3 - \alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1} \Rightarrow \alpha_3 = \alpha_1 - \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\beta_2 - \beta_1} \quad (\text{C.3})$$

On résout à nouveau et on obtient alors β_3 tel que $g(+\infty)_{\alpha_3} = \beta_3$. On compare β_3 à la valeur désirée $\beta = 1$: si la différence est supérieure à une tolérance que l'on s'est préalablement fixé, on recommence en choisissant $\alpha_1 = \alpha_3$ et $\alpha_2 \neq \alpha_3$; si elle est inférieure à la tolérance choisie, on arrête et on garde $\alpha = \alpha_3$.

Une fois que α est déterminé, on peut alors résoudre le système C.2, par exemple avec une méthode de Runge-Kutta d'ordre 4. Supposons connues, pour une certaine valeur s_i de s , les quantités $f(s_i)$, $g(s_i)$ et $h(s_i)$. On cherche alors à déterminer $f(s_{i+1})$, $g(s_{i+1})$ et $h(s_{i+1})$ avec $s_{i+1} = s_i + p$, p étant petit. On procède alors de la façon suivante :

$$\begin{cases} f_1(s_i) = f(s_i) + f'(s_i)\frac{p}{2} = f(s_i) + g(s_i)\frac{p}{2} = f(s_i) + \frac{k_1}{2} \\ g_1(s_i) = g(s_i) + g'(s_i)\frac{p}{2} = g(s_i) + h(s_i)\frac{p}{2} = g(s_i) + \frac{l_1}{2} \\ h_1(s_i) = h(s_i) + h'(s_i)\frac{p}{2} = h(s_i) - \frac{1}{2}f(s_i)h(s_i)\frac{p}{2} = h(s_i) + \frac{m_1}{2} \end{cases} \quad (\text{C.4})$$

$$\begin{cases} f_2(s_i) = f(s_i) + g_1(s_i)\frac{p}{2} = f(s_i) + \frac{k_2}{2} \\ g_2(s_i) = g(s_i) + h_1(s_i)\frac{p}{2} = g(s_i) + \frac{l_2}{2} \\ h_2(s_i) = h(s_i) - \frac{1}{2}f_1(s_i)h_1(s_i)\frac{p}{2} = h(s_i) + \frac{m_2}{2} \end{cases} \quad (\text{C.5})$$

$$\begin{cases} f_3(s_i) = f(s_i) + g_2(s_i)\frac{p}{2} = f(s_i) + k_3 \\ g_3(s_i) = g(s_i) + h_2(s_i)\frac{p}{2} = g(s_i) + l_3 \\ h_3(s_i) = h(s_i) - \frac{1}{2}f_2(s_i)h_2(s_i)\frac{p}{2} = h(s_i) + m_3 \end{cases} \quad (\text{C.6})$$

On pose alors :

$$\begin{cases} k_4 = g_3(s_i)p \\ l_4 = h_3(s_i)p \\ m_4 = -\frac{1}{2}f_3(s_i)h_3(s_i)p \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} f(s_i + p) = f(s_i) + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \\ g(s_i + p) = g(s_i) + \frac{1}{6}(l_1 + 2l_2 + 2l_3 + l_4) \\ h(s_i + p) = h(s_i) + \frac{1}{6}(h_1 + 2h_2 + 2h_3 + h_4) \end{cases} \quad (\text{C.7})$$

On peut ainsi calculer de proche en proche, à partir d'un point initial, et à la précision voulue, puisque l'on peut choisir p aussi petit que l'on veut, les valeurs numériques des fonctions f , g et h . Il est alors aisé de se ramener aux fonctions u et v , composantes normale et tangentielle de la vitesse.

Implémentation

Dans la version que nous avons utilisée du code, *Code_Saturne2.0*, la définition des conditions limites ainsi que du profil de vitesse d'entrée se fait dans le fichier utilisateur *usclim.f90*. C'est donc ici que nous avons résolu numériquement l'équation de Blasius, en ajoutant deux sous-routines. La première initialise la méthode de tir, puis fait appel à la seconde, qui résout le système par un algorithme de Runge-Kutta d'ordre 4, pour enfin comparer la valeur de β obtenue à 1 et décider de recommencer ou non.

```
1  SUBROUTINE BLASIUS(u, dim_u, etaini, etainf)
2
3  DOUBLE PRECISION etaini, etainf, alfini, dfinfi, erreur, tolera, alfaun, alfade, alfafi,
   betaun, betade, pasdis, x, y
4  INTEGER ndiscr, iterat, itemax, i, dim_u
5
6  DOUBLE PRECISION uzero(3) ! = [ f(0) ; g(0) ; h(0) ]
7  DOUBLE PRECISION u(3, dim_u)
8  ! 1001 = ndiscr+1
9  ! u matrice contenant en ligne f, g et h, et en colonne les valeurs de ces fonctions,
   pour les eta croissants de etaini a etainf
10
11 ! Initialisation des variables
12 ndiscr = dim_u-1 ! avec ce pas de discretisation
13 pasdis = (etainf - etaini) / ndiscr
14 alfini = 0.3d0 ! valeur au pif de f''(0) pour initialiser le tir
15 dfinfi = 1.d0 ! valeur de f'(oo) qu'on essaye d'approcher par le tir
16 erreur = 1.E10 ! initialisation de l'erreur
17 tolera = 1.E-10 ! tolerance
18 iterat = 1 ! Nombre courant d'iterations
19 itemax = 20 ! Nombre maximal d'iterations
20
21 ! Debut de la boucle de la methode de tir
22 DO WHILE (ABS(erreur).gt.tolera .and. iterat.le.itemax)
23 ! .and. = conjonction logique
24 ! = fait que deux evenements soient presents simultanement
25 alfaun = alfini
26 uzero(1) = 0.
27 uzero(2) = 0.
28 uzero(3) = alfaun
29
30 ! Appel a la sub-routine Runge-Kutta
31 call RK4(u, dim_u, uzero, etaini, etainf)
32 ! On resous numeriquement Blasius sur l'intervalle [etaini;etainf], avec un pas de
   discretisation ndiscr, avec les conditions initiales contenues dans uzero, et on met
   la solution dans u qui est de la forme :
33 ! u =
34 ! | f(0) ; g(0) ; h(0) | 1
35 ! | f(0+h) ; g(0+h) ; h(0+h) | 2
36 ! | f(0+2h) ; g(0+2h) ; h(0+2h) | 3
37 ! | ... | n
38 ! | f(10) ; g (10) ; h(10) | 1000
39 ! RK4 nous renvoie donc la matrice u qui contient la solution approchee
40
41 ! Calcul de l'erreur
```

```

42     betaun = u(2,dim_u) ! = g(10 >> 1) ~ g(oo)
43     erreur = betaun - dfinfi
44
45 ! Si l'erreur est trop grande, on fixe une nouvelle valeur de alpha, et on relance Runge
      Kutta, d'ou une nouvelle valeur de beta
46     IF (ABS(erreur).gt.tolera) THEN
47         alfade = 1.05*alfaun
48         uzero(1) = 0
49         uzero(2) = 0
50         uzero(3) = alfade
51
52         call RK4(u, dim_u, uzero, etaini, etainf)
53
54         betade = u(2,dim_u)
55 ! Pour calculer une nouvelle valeur de f''(0)
56 ! on fait une interpolation lineaire avec les deux precedentes
57         alfafi = alfaun+(dfinfi-betaun)*(alfade-alfaun)/(betade-betaun)
58         iterat = iterat + 1
59         alfini = alfafi
60     END IF
61 END DO
62
63 ! La on est cense avoir un tableau u des valeurs de f, g et h sur [0,10] qui soit tel
      que g(10)-1 a 10^-10 pres (sauf si on a diverge)
64 ! Comme on est tres contents on va l'ecrire dans le fichier blasius.dat pour pouvoir
      faire de belles courbes
65
66 4000 format(1F10.6,3F17.9)
67 ! nFp.d
68 ! n : nombre d'elements a ecrire
69 ! F : reel sous forme decimale
70 ! p : nombre de positions a utiliser (taille de la "cellule")
71 ! d : nombre de chiffres apres la virgule
72 OPEN(UNIT=4, file="blasius.dat")
73 x = 0 ! abscisse (eta)
74 DO i=1,dim_u
75     WRITE (4, 4000) x, u(1,i), u(2,i), u(3,i)
76     x = x + pasdis
77 END DO
78 CLOSE(4)
79
80 END SUBROUTINE
81
82 SUBROUTINE RK4(u, dim_u, uzero, etaini, etainf)
83
84 INTEGER dim_u, ndiscr, i, j
85 DOUBLE PRECISION pasdis
86 DOUBLE PRECISION uzero(3), k1(3), k2(3), k3(3), k4(3)
87 DOUBLE PRECISION etaini, etainf
88 DOUBLE PRECISION u(3, dim_u)
89 DOUBLE PRECISION etamat(dim_u)
90 DOUBLE PRECISION M(3,3)
91

```

```

92 ndiscr = dim_u-1
93 etamat(1) = etaini
94 etamat(dim_u) = etainf
95 u(1,1) = uzero(1)
96 u(2,1) = uzero(2)
97 u(3,1) = uzero(3)
98 pasdis = ( etainf - etaini ) / ndiscr
99     ! Pas de discretisation
100     ! Calcul des elements de RK :
101
102 DO i=1,ndiscr
103     M(1,1)=0
104     M(2,1)=0
105     M(3,1)=0
106     M(1,2)=1
107     M(2,2)=0
108     M(3,2)=0
109     M(1,3)=0
110     M(2,3)=1
111     M(3,3)=-0.5*u(1,i)
112 !M = reshape( (/ 0.d0, 0.d0, 0.d0, &
113 !             1.d0, 0.d0, 0.d0, &
114 !             0.d0, 0.d0, -0.5 * u(1,i) /), (/ 3, 3 /) )
115 !IF(i.eq.1) THEN
116 !WRITE(*,*) M
117 !END IF
118     k1 = pasdis * matmul(M,u(:,i))
119
120     k2 = pasdis * matmul(M,u(:,i)+k1/2)
121
122     k3 = pasdis * matmul(M,u(:,i)+k2/2)
123
124     k4 = pasdis * matmul(M,u(:,i)+k3)
125
126     u(:,i+1) = u(:,i) + (k1(:) + 2.*k2(:) + 2.*k3(:) + k4(:))/6.
127
128 !IF (i.eq.ndiscr) THEN
129 !WRITE(*,*) i
130 !WRITE(*,*) k1, k2, k3
131 !END IF
132     etamat(i+1)=etamat(1)+i*pasdis
133 END DO
134
135 END SUBROUTINE

```

C.2 Calcul des coefficient de traînée et de portance

Le calcul des coefficients de traînée et de portance est effectué dans le fichier utilisateur `usproj.f90`. Nous commençons par calculer la force exercée sur chaque cellule de bord de la sphère, en séparant les contributions visqueuses et de pression, puis nous sommons ces contributions élémentaires pour obtenir la force résultante, dont nous déduisons ensuite les différents coefficients. Lors de cette dernière étape, nous avons besoin de la vitesse à mi-hauteur $U_{1/2}$, qui

est calculée lors d'une étape précédente dans un fichier utilisateur nommé `usclim.f90`.

```
1 subroutine usproj
2
3 ! Mes variables
4 integer      ipass
5 data        ipass /0/
6 save        ipass
7
8 integer      i1, igrdpx , igrdpy , igrdpz
9 double precision fxp, fyp, fzp ! force de pression sur chaque direction
10 double precision fxv, fyv, fzv ! force visqueuse sur chaque axe
11 double precision pip, pfac, pipi, V12, cd, cl
12
13 common /nommoc/ V12 ! Vitesse a mi-hauteur
14
15 !===
16 ! 1. Initialization
17 !===
18
19 ! Memory management
20
21 idebia = idbia0
22 idebra = idbra0
23
24 i1 = impusr(1)
25
26 !===
27 ! 2. Calcul de l'effort exerce sur la sphere
28 !===
29
30 ! Initialisation des variables
31 ipass = ipass + 1
32
33 ifinia = idebia
34 ifinra = idebra
35
36 itravx = ifinra
37 itravy = itravx + ncelet
38 itravz = itravy + ncelet
39 igrdpx = itravz + ncelet
40 igrdpy = igrdpx + ncelet
41 igrdpz = igrdpy + ncelet
42 ifinra = igrdpz + ncelet
43
44 call iasize('calcor',ifinia)
45 call rasize('calcor',ifinra)
46
47 ivar = ipr(1)
48 iclvar = iclrtp(ivar,icoef)
49 inc = 1
50 iccocg = 1
51 nswrgp = nswrgr(ivar)
52 imligp = imligr(ivar)
```

```

53 iwarnp = iwarni(ivar)
54 epsrgp = epsrgr(ivar)
55 clingp = clingr(ivar)
56 extrap = extrag(ivar)
57 iphydp = 0
58
59 if(irangp.ge.0) then
60     call parcom (rtp(1,ivar))
61 endif
62
63 if(iperio.eq.1) then
64     idimte = 0
65     itenso = 0
66     call percom
67         ( idimte , itenso ,
68           rtp(1,ivar), rtp(1,ivar), rtp(1,ivar),
69           rtp(1,ivar), rtp(1,ivar), rtp(1,ivar),
70           rtp(1,ivar), rtp(1,ivar), rtp(1,ivar))
71 endif
72
73 call grdcel
74 ( ifinia, ifinra,
75   ndim, ncelet, ncel, nfac, nfabor, nfml, nprfml, nnod, lndfac, lndfbr, ncelbr, nphas,
76   nideve, nrdeve, nituse, nrtuse, ivar, imrga, inc, iccog, nswrgp, imligp, iphydp
77   , iwarnp, nfecra, epsrgp, clingp, extrap, ifacel, ifabor, ifmfbr, ifmcel, iprfml,
78   ipnfac, nodfac, ipnfbr, nodfbr, idevel, ituser, ia, xyzcen, surfac, surfbo,
79   cdgfac, cdgfbo, xyznod, volume, ra(itravx), ra(itravx), ra(itravx), rtpa(1,ivar),
80   coefa(1,iclvar), coefb(1,iclvar), ra(igrdpx), ra(igrdpy), ra(igrdpz), ra(itravx)
81   , ra(itravz), rdevel, rtuser, ra
82   )
83
84 ! Mes variables
85
86 pfac = 0.d0 ! Pression exercee sur la face
87 fxp  = 0.d0 ! Force due a la pression sur x
88 fyp  = 0.d0 ! Force due a la pression sur y
89 fzp  = 0.d0 ! Force due a la pression sur z
90 fxv  = 0.d0 ! Force due a la viscosite sur x
91 fyv  = 0.d0 ! Force due a la viscosite sur y
92 fzv  = 0.d0 ! Force due a la viscosite sur z
93 cd   = 0.d0 ! drag coefficient
94 cl   = 0.d0 ! lift coefficient
95
96 ! Calcul des trois composantes fx, fy et fz de la force resultante
97
98 call getfbr('Spore', nlelt, lstelt)
99
100 ! nlelt = nombre d'elements du groupe spore
101 ! lstelt = liste des numeros elements du groupe spore
102
103 do ilelt = 1, nlelt
104     ifac = lstelt(ilelt) ! renvoie le numero de ilelt ieme element

```

```

99     iel = ifabor(ifac) ! ifabor renvoie le numero de l'unique cellule voisine d'une
      face de bord
100     iii = idiipb-1+3*(ifac-1)
101     diipbx = ra(iii+1)
102     diipby = ra(iii+2)
103     diipbz = ra(iii+3)
104     pip = rtpa(iel,ipr(1)) + diipbx*ra(igrdpx+iel-1) + diipby*ra(igrdpy+iel-1) +
      diipbz*ra(igrdpz+iel-1)
105     pfac = coefa(ifac,iclvar) + coefb(ifac,iclvar)*pip
106     fxp = fxp + pfac * surfbo(1,ifac )
107     fyp = fyp + pfac * surfbo(2,ifac )
108     fzp = fzp + pfac * surfbo(3,ifac )
109     ! Contributions de pression : pression multipliee par la surface de la cellule
110     ii = 1
111     fxv = fxv + ra(iforbr + (ifac-1)*3 + (ii - 1))
112     ii = 2
113     fyv = fyv + ra(iforbr + (ifac-1)*3 + (ii - 1))
114     ii = 3
115     fzv = fzv + ra(iforbr + (ifac-1)*3 + (ii - 1))
116     ! En realite a ce stade, les forces f#v sont egales a la somme des contributions
      visqueuses et de pression. Nous ferons la soustraction avec f#p par la suite
      pour ne garder que la contribution visqueuse.
117 enddo
118
119 ! parsom additionne les valeurs d'une variable sur les differents processeurs (pour les
      calculs en parallele)
120 if (irangp.ge.0) then
121     call parsom(fxp)
122     call parsom(fyp)
123     call parsom(fzp)
124     call parsom(fxv)
125     call parsom(fyv)
126     call parsom(fzv)
127 endif
128
129 if (irangp.ge.0 .and. ipass.eq.1) then
130     call parsom(V12)
131 endif
132
133 if (ipass.eq.1 .and. irangp.le.0) then
134     open(unit=401, file="debug.dat")
135 endif
136
137 write(401,*) "Processeur no", irangp, " - V1/2 = ", V12
138
139 if (ipass.eq.ntmabs .and. irangp.le.0) then
140     close(401)
141 endif
142
143 pipi = 4.d0 * atan(1.d0) ! pipi = 3,14159...
144 iel = -999
145 cd = 8 * fxv / ( ro0(1) * pipi * V12**2)
146 cl = 8 * fzv / ( ro0(1) * pipi * V12**2)

```

```

147 ! Nous venons de calculer les coefficients de trainee et de portance, on peut a present
      retirer la contribution de pression des f#v pour les ecrire dans un fichier
148 fxv = fxv - fxp
149 fyv = fyv - fyp
150 fzv = fzv - fzp
151
152 ! Ouverture du fichier lors de la premiere passe (ipass=1)
153 ! On ne le fait faire que par le premier processeur
154 ! irangp renvoie -1 en cas de non-parallelisme
155 ! et le (numero du processeur -1) dans le cas d'un calcul parallele
156
157 if (ipass.eq.1 .and. irangp.le.0) then
158     open(unit=i1, file="resultante_force.dat")
159 endif
160
161 ! Ecriture des composantes de la resultante de la force sur la sphere
162 1000 format(i6,8e17.9)
163 if (irangp.le.0.and.ntcabs.gt.1) then
164     write (i1, 1000) (ntcabs-1), fxp, fyp, fzp, fxv, fyv, fzv, cd, cl
165 endif
166
167 ! Fermeture du fichier fresul
168 if (ipass.eq.ntmabs .and. irangp.le.0) then
169     close(i1)
170 endif
171
172 return
173 end subroutine

```

C.3 Maillage de sphères en script Python

Afin de réaliser nos maillages, nous avons utilisé le Logiciel libre et ouvert *Salomé*. Ce dernier présente une interface graphique intuitive. Malheureusement cette dernière ne permet pas de paramétrer les maillages de façon à pouvoir aisément changer un paramètre sans tout recommencer. Il existe bien un module permettant de réaliser cela, mais ce dernier est buggé et ne fonctionne pas de la façon attendue. Nous avons donc utilisé le langage Python à travers un script utilisant des commandes propres à *Salomé*. Ces dernières, bien que redondantes, sont extrêmement bien documentées. De plus, il existe une fonction « dump » permettant d'utiliser l'interface graphique puis de faire écrire le script Python de ce que l'on vient de faire.

```

1 # -*- coding: iso-8859-1 -*-
2
3 ### Parametres #
4
5 # Module math pour pouvoir utiliser les fonctions mathematiques comme sqrt()
6 from math import *
7
8 # Diametre de la sphere
9 d = 1
10 d = float(d)
11
12 # Ecart entre les spheres (bord a bord)

```

```

13 e = 1.75
14 e = float(e)
15
16 # Raffinement du maillage
17 m = 1
18
19 ### Geometrie #
20
21 import sys
22 import salome
23
24 salome.salome_init()
25 theStudy = salome.myStudy
26
27 import salome_notebook
28 notebook = salome_notebook.notebook
29 sys.path.insert( 0, r'/home/metahni/Bureau')
30
31 import iparameters
32 ipar = iparameters.IParameters(salome.myStudy.GetCommonParameters("Interface Applicative
    ", 1))
33
34 import GEOM
35 import geompy
36 import math
37 import SALOMEDS
38
39 geompy.init_geom(theStudy)
40
41 # Base vectorielle unitaire
42 origine = geompy.MakeVertex(0, 0, 0)
43 X = geompy.MakeVectorDXDYDZ(1, 0, 0)
44 Y = geompy.MakeVectorDXDYDZ(0, 1, 0)
45 Z = geompy.MakeVectorDXDYDZ(0, 0, 1)
46 geompy.addToStudy( origine, 'origine' )
47 geompy.addToStudy( X, 'X' )
48 geompy.addToStudy( Y, 'Y' )
49 geompy.addToStudy( Z, 'Z' )
50
51 # Sphere
52 centre_sphere = geompy.MakeVertex(0, 0, d/2)
53 sphere = geompy.MakeSpherePntR(centre_sphere, d/2)
54 geompy.addToStudy( centre_sphere, 'centre_sphere' )
55 geompy.addToStudy( sphere, 'sphere' )
56
57 # Cylindre de contact entre la sphere et le plan
58 sommet_cylindre = geompy.MakeVertex(0, 0, d/20)
59 plan_contact = geompy.MakePlane(sommet_cylindre, Z, d+e)
60 surface_contact = geompy.MakeCommon(sphere, plan_contact)
61 cylindre = geompy.MakePrismVecH(surface_contact, Z, -d/20)
62 geompy.addToStudy( sommet_cylindre, 'sommet_cylindre' )
63 geompy.addToStudy( plan_contact, 'plan_contact' )
64 geompy.addToStudy( surface_contact, 'surface_contact' )

```

```

65  geompy.addToStudy( cylindre, 'cylindre' )
66
67  # Fusion de la sphere et du cylindre
68  sphere_posee = geompy.MakeCompound([cylindre, sphere])
69  geompy.addToStudy( sphere_posee, 'sphere_posee' )
70
71  # Creation de la boite contenant la sphere
72  diagoboite1 = geompy.MakeVertex((d+e)/2, (d+e)/2, d+e/2)
73  diagoboite2 = geompy.MakeVertex(-(d+e)/2, -(d+e)/2, 0)
74  boite = geompy.MakeBoxTwoPnt(diagoboite1, diagoboite2)
75  geompy.addToStudy( diagoboite1, 'diagoboite1' )
76  geompy.addToStudy( diagoboite2, 'diagoboite2' )
77  geompy.addToStudy( boite, 'boite' )
78
79  # Creation du volume autour de la sphere
80  autour_sphere = geompy.MakeCut(boite, sphere_posee)
81  geompy.addToStudy( autour_sphere, 'autour_sphere' )
82
83  # Construction des plans de coupe
84  XY = geompy.MakeVectorDXDYDZ(1, -1, 0)
85  XZ = geompy.MakeVectorDXDYDZ(1, 0, -1)
86  plan_median = geompy.MakePlane(centre_sphere, Z, e+d)
87  plan_y = geompy.MakePlane(centre_sphere, Y, e+d)
88  plan_xy = geompy.MakePlane(centre_sphere, XY, (d+e)*sqrt(2))
89  plan_xz = geompy.MakePlane(centre_sphere, XZ, (d+e)*sqrt(2))
90  geompy.addToStudy( XZ, 'XZ' )
91  geompy.addToStudy( XY, 'XY' )
92  geompy.addToStudy( plan_median, 'plan_median' )
93  geompy.addToStudy( plan_y, 'plan_y' )
94  geompy.addToStudy( plan_xy, 'plan_xy' )
95  geompy.addToStudy( plan_xz, 'plan_xz' )
96
97  # Decoupe d'un huitieme
98  extr_y = geompy.MakePrismVecH(plan_y, Y, -(d+e)/2)
99  extr_xy = geompy.MakePrismVecH(plan_xy, XY, -(d+e)*sqrt(2)/2)
100 extr_huitieme = geompy.MakeCompound([extr_y, extr_xy])
101 huitieme = geompy.MakeCut(autour_sphere, extr_huitieme)
102 geompy.addToStudy( extr_y, 'extr_y' )
103 geompy.addToStudy( extr_xy, 'extr_xy' )
104 geompy.addToStudy( extr_huitieme, 'extr_huitieme' )
105 geompy.addToStudy( huitieme, 'huitieme' )
106
107 # Decoupe du bas
108 extr_bas = geompy.MakePrismVecH(plan_contact, Z, d+e/2-d/20)
109 BAS = geompy.MakeCut(huitieme, extr_bas)
110 geompy.addToStudy( extr_bas, 'extr_bas' )
111 geompy.addToStudy( BAS, 'BAS' )
112
113 [hauteur_bas_1,perim_bas_1,perim_bas_2,hauteur_bas_2,rayon_bas_1,rayon_bas_2,rayon_bas_3
    ,rayon_bas_4,hauteur_bas_3,perim_bas_3,perim_bas_4,hauteur_bas_4] = geompy.
    ExtractShapes(BAS, geompy.ShapeType["EDGE"], True)
114
115 geompy.addToStudyInFather( BAS, hauteur_bas_1, 'hauteur_bas_1' )

```

```

116 geompv.addToStudyInFather( BAS, hauteur_bas_2, 'hauteur_bas_2' )
117 geompv.addToStudyInFather( BAS, hauteur_bas_3, 'hauteur_bas_3' )
118 geompv.addToStudyInFather( BAS, hauteur_bas_4, 'hauteur_bas_4' )
119 geompv.addToStudyInFather( BAS, perim_bas_1, 'perim_bas_1' )
120 geompv.addToStudyInFather( BAS, perim_bas_2, 'perim_bas_2' )
121 geompv.addToStudyInFather( BAS, perim_bas_3, 'perim_bas_3' )
122 geompv.addToStudyInFather( BAS, perim_bas_4, 'perim_bas_4' )
123 geompv.addToStudyInFather( BAS, rayon_bas_1, 'rayon_bas_1' )
124 geompv.addToStudyInFather( BAS, rayon_bas_2, 'rayon_bas_2' )
125 geompv.addToStudyInFather( BAS, rayon_bas_3, 'rayon_bas_3' )
126 geompv.addToStudyInFather( BAS, rayon_bas_4, 'rayon_bas_4' )
127
128
129 # Decoupe du milieu
130 extr_median_milieu = geompv.MakePrismVecH(plan_median, Z, (d+e)/2)
131 extr_contact_milieu = geompv.MakePrismVecH(plan_contact, Z, -d/20)
132 extr_milieu = geompv.MakeCompound([extr_median_milieu, extr_contact_milieu])
133 MILIEU = geompv.MakeCut(huitieme, extr_milieu)
134 geompv.addToStudy( extr_median_milieu, 'extr_median_milieu' )
135 geompv.addToStudy( extr_contact_milieu, 'extr_contact_milieu' )
136 geompv.addToStudy( extr_milieu, 'extr_milieu' )
137 geompv.addToStudy( MILIEU, 'MILIEU' )
138
139 # Un bug de Salome fait qu'en fonction de l'ecart entre les spheres, les raffinements ne
    se font pas dans le meme sens, nous obligeant a distinguer plusieurs cas, ce qui
    alourdit considerablement le code.
140
141 if e <= 1.24:
142     [perim_mil_1,hauteur_mil_1,rayon_mil_1,rayon_mil_2,hauteur_mil_2,perim_mil_2,
        rayon_mil_3,rayon_mil_4,hauteur_mil_3,perim_mil_3,perim_mil_4,hauteur_mil_4] =
        geompv.ExtractShapes(MILIEU, geompv.ShapeType["EDGE"], True)
143 else:
144     [perim_mil_1,hauteur_mil_1,hauteur_mil_2,perim_mil_2,rayon_mil_1,rayon_mil_2,
        rayon_mil_3,rayon_mil_4,hauteur_mil_3,perim_mil_3,perim_mil_4,hauteur_mil_4] =
        geompv.ExtractShapes(MILIEU, geompv.ShapeType["EDGE"], True)
145
146 geompv.addToStudyInFather( MILIEU, hauteur_mil_1, 'hauteur_mil_1' )
147 geompv.addToStudyInFather( MILIEU, hauteur_mil_2, 'hauteur_mil_2' )
148 geompv.addToStudyInFather( MILIEU, hauteur_mil_3, 'hauteur_mil_3' )
149 geompv.addToStudyInFather( MILIEU, hauteur_mil_4, 'hauteur_mil_4' )
150 geompv.addToStudyInFather( MILIEU, perim_mil_1, 'perim_mil_1' )
151 geompv.addToStudyInFather( MILIEU, perim_mil_2, 'perim_mil_2' )
152 geompv.addToStudyInFather( MILIEU, perim_mil_3, 'perim_mil_3' )
153 geompv.addToStudyInFather( MILIEU, perim_mil_4, 'perim_mil_4' )
154 geompv.addToStudyInFather( MILIEU, rayon_mil_1, 'rayon_mil_1' )
155 geompv.addToStudyInFather( MILIEU, rayon_mil_2, 'rayon_mil_2' )
156 geompv.addToStudyInFather( MILIEU, rayon_mil_3, 'rayon_mil_3' )
157 geompv.addToStudyInFather( MILIEU, rayon_mil_4, 'rayon_mil_4' )
158
159 # Decoupe du haut
160 extr_xz = geompv.MakePrismVecH(plan_xz, XZ, -(d+e)*sqrt(2)/2)
161 extr_haut = geompv.MakePrismVecH(plan_median, Z, -d/2)
162 extr_xz_haut = geompv.MakeCompound([extr_xz, extr_haut])

```

```

163 HAUT = geompy.MakeCut(huitieme, extr_xz_haut)
164 geompy.addToStudy( extr_xz, 'extr_xz' )
165 geompy.addToStudy( extr_haut, 'extr_haut' )
166 geompy.addToStudy( extr_xz_haut, 'extr_xz_haut' )
167 geompy.addToStudy( HAUT, 'HAUT' )
168
169 if e <= 0.16:
170     [perim_haut_1,hauteur_haut_1,hauteur_haut_2,rayon_haut_1,rayon_haut_2,perim_haut_2,
        rayon_haut_3,rayon_haut_4,hauteur_haut_3,perim_haut_3,perim_haut_4,hauteur_haut_4]
        = geompy.ExtractShapes(HAUT, geompy.ShapeType["EDGE"], True)
171 else:
172     [perim_haut_1,hauteur_haut_1,hauteur_haut_2,perim_haut_2,rayon_haut_2,rayon_haut_1,
        rayon_haut_3,rayon_haut_4,hauteur_haut_3,perim_haut_3,perim_haut_4,hauteur_haut_4]
        = geompy.ExtractShapes(HAUT, geompy.ShapeType["EDGE"], True)
173
174 geompy.addToStudyInFather( HAUT, hauteur_haut_1, 'hauteur_haut_1' )
175 geompy.addToStudyInFather( HAUT, hauteur_haut_2, 'hauteur_haut_2' )
176 geompy.addToStudyInFather( HAUT, hauteur_haut_3, 'hauteur_haut_3' )
177 geompy.addToStudyInFather( HAUT, hauteur_haut_4, 'hauteur_haut_4' )
178 geompy.addToStudyInFather( HAUT, perim_haut_1, 'perim_haut_1' )
179 geompy.addToStudyInFather( HAUT, perim_haut_2, 'perim_haut_2' )
180 geompy.addToStudyInFather( HAUT, perim_haut_3, 'perim_haut_3' )
181 geompy.addToStudyInFather( HAUT, perim_haut_4, 'perim_haut_4' )
182 geompy.addToStudyInFather( HAUT, rayon_haut_1, 'rayon_haut_1' )
183 geompy.addToStudyInFather( HAUT, rayon_haut_2, 'rayon_haut_2' )
184 geompy.addToStudyInFather( HAUT, rayon_haut_3, 'rayon_haut_3' )
185 geompy.addToStudyInFather( HAUT, rayon_haut_4, 'rayon_haut_4' )
186
187 ### Maillage #
188
189 import smesh, SMESH, SALOMEDS
190
191 aMeasurements = smesh.CreateMeasurements()
192 smesh.SetCurrentStudy(theStudy)
193 import StdMeshers
194
195
196 # Parametres de maillage
197
198 # Nombre de mailles dans l'epaisseur du cylindre
199 cl = 3
200 cl = int(round(cl*m,0))
201
202 # Nombre de mailles sur la moitie d'une arete du cube delimitant la sphere
203 box = 12
204 box = int(round(box*m,0))
205
206 # Parametre de raffinement et nombre de mailles de la sphere vers le cube
207 raf = 4
208 nbm = 15
209 nbm = int(round(nbm*m,0))
210
211 # Nombre de mailles pour la moitie inferieure

```

```

212 em = 15
213 em = int(round(em*m,0))
214
215 # Nombre de mailles pour la moitie superieure
216 eh = 12
217 eh = int(round(eh*m,0))
218
219 # Parametre de raffinement et nombre de mailles du plan median au bout du cube
    delimitant la sphere
220 raf_h = 4
221 nbm_h = eh
222 nbm_h = int(round(nbm_h*m,0))
223
224 # Maillage du bas (epaisseur du cylindre)
225 BAS_m = smesh.Mesh(BAS)
226 smesh.SetName(BAS_m.GetMesh(), 'BAS_m')
227 Regular_1D = BAS_m.Segment()
228 smesh.SetName(Regular_1D.GetAlgorithm(), 'Regular_1D')
229 Quadrangle_2D = BAS_m.Quadrangle()
230 smesh.SetName(Quadrangle_2D.GetAlgorithm(), 'Quadrangle_2D')
231 Hexa_3D = smesh.CreateHypothesis('Hexa_3D')
232 smesh.SetName(Hexa_3D, 'Hexa_3D')
233 status = BAS_m.AddHypothesis(Hexa_3D)
234
235 Auto_group_for_epaisseur_bas_m = geompy.CreateGroup(BAS, geompy.ShapeType["EDGE"])
236 geompy.UnionList(Auto_group_for_epaisseur_bas_m, [hauteur_bas_1, hauteur_bas_3])
237 geompy.addToStudyInFather( BAS, Auto_group_for_epaisseur_bas_m, '
    Auto_group_for_epaisseur_bas_m' )
238
239 Regular_1D_1 = BAS_m.Segment(geom=Auto_group_for_epaisseur_bas_m)
240 epaisseur_bas_h = Regular_1D_1.NumberOfSegments(cl)
241 smesh.SetName(epaisseur_bas_h, 'epaisseur_bas_h')
242 epaisseur_bas_h.SetDistrType( 0 )
243 Propagation_of_1D_Hyp_on_opposite_edges_1 = Regular_1D_1.Propagation()
244 smesh.SetName(Propagation_of_1D_Hyp_on_opposite_edges_1, 'Propagation of 1D Hyp. on
    opposite edges_1')
245 epaisseur_bas_m = Regular_1D_1.GetSubMesh()
246 smesh.SetName(epaisseur_bas_m, 'epaisseur_bas_m')
247
248 Auto_group_for_perim_bas_m = geompy.CreateGroup(BAS, geompy.ShapeType["EDGE"])
249 geompy.UnionList(Auto_group_for_perim_bas_m, [perim_bas_1, perim_bas_4])
250 geompy.addToStudyInFather( BAS, Auto_group_for_perim_bas_m, 'Auto_group_for_perim_bas_m'
    )
251
252 Regular_1D_2 = BAS_m.Segment(geom=Auto_group_for_perim_bas_m)
253 param_box_h = Regular_1D_2.NumberOfSegments(box)
254 smesh.SetName(param_box_h, 'param_box_h')
255 param_box_h.SetDistrType( 0 )
256 Propagation_of_1D_Hyp_on_opposite_edges_2 = Regular_1D_2.Propagation()
257 smesh.SetName(Propagation_of_1D_Hyp_on_opposite_edges_2, 'Propagation of 1D Hyp. on
    opposite edges_2')
258 perim_bas_m = Regular_1D_2.GetSubMesh()
259 smesh.SetName(perim_bas_m, 'perim_bas_m')

```

```

260
261 Auto_group_for_rayon_bas_m = geompy.CreateGroup(BAS, geompy.ShapeType["EDGE"])
262 geompy.UnionList(Auto_group_for_rayon_bas_m, [rayon_bas_2, rayon_bas_3])
263 geompy.addToStudyInFather( BAS, Auto_group_for_rayon_bas_m, 'Auto_group_for_rayon_bas_m'
    )
264
265 Regular_1D_3 = BAS_m.Segment(geom=Auto_group_for_rayon_bas_m)
266 param_raffinement = Regular_1D_3.NumberOfSegments(nbm,raf,[ ])
267 smesh.SetName(param_raffinement, 'param_raffinement')
268 Propagation_of_1D_Hyp_on_opposite_edges_3 = Regular_1D_3.Propagation()
269 smesh.SetName(Propagation_of_1D_Hyp_on_opposite_edges_3, 'Propagation of 1D Hyp. on
    opposite edges_3')
270 rayon_bas_m = Regular_1D_3.GetSubMesh()
271 smesh.SetName(rayon_bas_m, 'rayon_bas_m')
272
273 isDone = BAS_m.Compute()
274
275 # Maillage du milieu
276 MILIEU_m = smesh.Mesh(MILIEU)
277 smesh.SetName(MILIEU_m.GetMesh(), 'MILIEU_m')
278 Regular_1D_4 = MILIEU_m.Segment()
279 Quadrangle_2D_1 = MILIEU_m.Quadrangle()
280 status = MILIEU_m.AddHypothesis(Hexa_3D)
281
282 Auto_group_for_perim_milieu_m = geompy.CreateGroup(MILIEU, geompy.ShapeType["EDGE"])
283 geompy.UnionList(Auto_group_for_perim_milieu_m, [perim_mil_1, perim_mil_4])
284 geompy.addToStudyInFather( MILIEU, Auto_group_for_perim_milieu_m, '
    Auto_group_for_perim_milieu_m' )
285
286 Regular_1D_5 = MILIEU_m.Segment(geom=Auto_group_for_perim_milieu_m)
287 status = MILIEU_m.AddHypothesis(param_box_h,Auto_group_for_perim_milieu_m)
288 Propagation_of_1D_Hyp_on_opposite_edges_4 = Regular_1D_5.Propagation()
289 smesh.SetName(Propagation_of_1D_Hyp_on_opposite_edges_4, 'Propagation of 1D Hyp. on
    opposite edges_4')
290
291 Auto_group_for_hauteur_milieu_m = geompy.CreateGroup(MILIEU, geompy.ShapeType["EDGE"])
292 geompy.UnionList(Auto_group_for_hauteur_milieu_m, [hauteur_mil_1, hauteur_mil_3])
293 geompy.addToStudyInFather( MILIEU, Auto_group_for_hauteur_milieu_m, '
    Auto_group_for_hauteur_milieu_m' )
294
295 Regular_1D_6 = MILIEU_m.Segment(geom=Auto_group_for_hauteur_milieu_m)
296 hauteur_mil_h = Regular_1D_6.NumberOfSegments(em)
297 smesh.SetName(hauteur_mil_h, 'hauteur_mil_h')
298 hauteur_mil_h.SetDistrType( 0 )
299 Propagation_of_1D_Hyp_on_opposite_edges_5 = Regular_1D_6.Propagation()
300 smesh.SetName(Propagation_of_1D_Hyp_on_opposite_edges_5, 'Propagation of 1D Hyp. on
    opposite edges_5')
301
302 Auto_group_for_rayon_milieu_m = geompy.CreateGroup(MILIEU, geompy.ShapeType["EDGE"])
303 # A nouveau cette distinction en fonction de l'ecart entre les spheres afin d'avoir le
    raffinement dans le bon sens
304 if e <= 1.24:
305     geompy.UnionList(Auto_group_for_rayon_milieu_m, [rayon_mil_1, rayon_mil_4])

```

```

306 else:
307     geompy.UnionList(Auto_group_for_rayon_milieu_m, [rayon_mil_1, rayon_mil_3])
308     geompy.addToStudyInFather( MILIEU, Auto_group_for_rayon_milieu_m, '
        Auto_group_for_rayon_milieu_m' )
309
310 Regular_1D_7 = MILIEU_m.Segment(geom=Auto_group_for_rayon_milieu_m)
311 status = MILIEU_m.AddHypothesis(param_raffinement,Auto_group_for_rayon_milieu_m)
312 Propagation_of_1D_Hyp_on_opposite_edges_6 = Regular_1D_7.Propagation()
313 smesh.SetName(Propagation_of_1D_Hyp_on_opposite_edges_6, 'Propagation of 1D Hyp. on
        opposite_edges_6')
314
315 isDone = MILIEU_m.Compute()
316
317 perim_milieu_m = Regular_1D_5.GetSubMesh()
318 smesh.SetName(perim_milieu_m, 'perim_milieu_m')
319 hauteur_milieu_m = Regular_1D_6.GetSubMesh()
320 smesh.SetName(hauteur_milieu_m, 'hauteur_milieu_m')
321 rayon_milieu_m = Regular_1D_7.GetSubMesh()
322 smesh.SetName(rayon_milieu_m, 'rayon_milieu_m')
323
324 # Maillage du haut
325 HAUT_m = smesh.Mesh(HAUT)
326 smesh.SetName(HAUT_m.GetMesh(), 'HAUT_m')
327 Regular_1D_8 = HAUT_m.Segment()
328 Quadrangle_2D_2 = HAUT_m.Quadrangle()
329 status = HAUT_m.AddHypothesis(Hexa_3D)
330
331 Auto_group_for_perim_haut_m = geompy.CreateGroup(HAUT, geompy.ShapeType["EDGE"])
332 geompy.UnionList(Auto_group_for_perim_haut_m, [perim_haut_1, perim_haut_3])
333 geompy.addToStudyInFather( HAUT, Auto_group_for_perim_haut_m, '
        Auto_group_for_perim_haut_m' )
334
335 Regular_1D_9 = HAUT_m.Segment(geom=Auto_group_for_perim_haut_m)
336 status = HAUT_m.AddHypothesis(param_box_h,Auto_group_for_perim_haut_m)
337 Propagation_of_1D_Hyp_on_opposite_edges_7 = Regular_1D_9.Propagation()
338 smesh.SetName(Propagation_of_1D_Hyp_on_opposite_edges_7, 'Propagation of 1D Hyp. on
        opposite_edges_7')
339
340 Auto_group_for_hauteur_haut_m = geompy.CreateGroup(HAUT, geompy.ShapeType["EDGE"])
341 geompy.UnionList(Auto_group_for_hauteur_haut_m, [hauteur_haut_1, hauteur_haut_2])
342 geompy.addToStudyInFather( HAUT, Auto_group_for_hauteur_haut_m, '
        Auto_group_for_hauteur_haut_m' )
343
344 Regular_1D_10 = HAUT_m.Segment(geom=Auto_group_for_hauteur_haut_m)
345 hauteur_haut_h = Regular_1D_10.NumberOfSegments(eh)
346 smesh.SetName(hauteur_haut_h, 'hauteur_haut_h')
347 hauteur_haut_h.SetDistrType( 0 )
348 if e <= 0.6:
349     Propagation_of_1D_Hyp_on_opposite_edges_8 = Regular_1D_10.Propagation()
350     smesh.SetName(Propagation_of_1D_Hyp_on_opposite_edges_8, 'Propagation of 1D Hyp. on
        opposite_edges_8')
351
352 if e > 0.6:

```

```

353 Auto_group_for_hauteur_haut_mbis = geompy.CreateGroup(HAUT, geompy.ShapeType["EDGE"])
354 geompy.UnionList(Auto_group_for_hauteur_haut_mbis, [hauteur_haut_3, hauteur_haut_4])
355 geompy.addToStudyInFather( HAUT, Auto_group_for_hauteur_haut_mbis, '
    Auto_group_for_hauteur_haut_mbis' )
356
357 Regular_1D_10bis = HAUT_m.Segment(geom=Auto_group_for_hauteur_haut_mbis)
358 param_raffinement_haut = Regular_1D_10bis.NumberOfSegments(nbm_h,raf_h,[ ])
359 smesh.SetName(param_raffinement_haut, 'param_raffinement_haut')
360 hauteur_haut_m = Regular_1D_10bis.GetSubMesh()
361 smesh.SetName(hauteur_haut_m, 'hauteur_haut_mbis')
362
363 Auto_group_for_rayon_haut_m = geompy.CreateGroup(HAUT, geompy.ShapeType["EDGE"])
364 if e <= 0.16:
365     geompy.UnionList(Auto_group_for_rayon_haut_m, [rayon_haut_2, rayon_haut_4])
366 elif e <= 1.24:
367     geompy.UnionList(Auto_group_for_rayon_haut_m, [rayon_haut_1, rayon_haut_4])
368 else:
369     geompy.UnionList(Auto_group_for_rayon_haut_m, [rayon_haut_1, rayon_haut_3])
370 geompy.addToStudyInFather( HAUT, Auto_group_for_rayon_haut_m, '
    Auto_group_for_rayon_haut_m' )
371
372 Regular_1D_11 = HAUT_m.Segment(geom=Auto_group_for_rayon_haut_m)
373 status = HAUT_m.AddHypothesis(param_raffinement,Auto_group_for_rayon_haut_m)
374 Propagation_of_1D_Hyp_on_opposite_edges_9 = Regular_1D_11.Propagation()
375 smesh.SetName(Propagation_of_1D_Hyp_on_opposite_edges_9, 'Propagation of 1D Hyp. on
    opposite edges_9')
376
377 isDone = HAUT_m.Compute()
378
379 perim_haut_m = Regular_1D_9.GetSubMesh()
380 smesh.SetName(perim_haut_m, 'perim_haut_m')
381 hauteur_haut_m = Regular_1D_10.GetSubMesh()
382 smesh.SetName(hauteur_haut_m, 'hauteur_haut_m')
383
384 rayon_haut_m = Regular_1D_11.GetSubMesh()
385 smesh.SetName(rayon_haut_m, 'rayon_haut_m')
386
387 # Maillage de la partie superieure
388 SUP_m = smesh.Mesh(HAUT)
389 smesh.SetName(SUP_m.GetMesh(), 'SUP_m')
390 Regular_1D_12 = SUP_m.Segment()
391 Quadrangle_2D_3 = SUP_m.Quadrangle()
392 status = SUP_m.AddHypothesis(Hexa_3D)
393
394 Auto_group_for_perim_sup_m = geompy.CreateGroup(HAUT, geompy.ShapeType["EDGE"])
395 geompy.UnionList(Auto_group_for_perim_sup_m, [perim_haut_1, perim_haut_3])
396 geompy.addToStudyInFather( HAUT, Auto_group_for_perim_sup_m, 'Auto_group_for_perim_sup_m
    ' )
397
398 Regular_1D_13 = SUP_m.Segment(geom=Auto_group_for_perim_sup_m)
399 status = SUP_m.AddHypothesis(param_box_h,Auto_group_for_perim_sup_m)
400 Propagation_of_1D_Hyp_on_opposite_edges_10 = Regular_1D_13.Propagation()

```

```

401 smesh.SetName(Propagation_of_1D_Hyp_on_opposite_edges_10, 'Propagation of 1D Hyp. on
    opposite edges_10')
402
403 Auto_group_for_hauteur_sup_m = geomp.CreateGroup(HAUT, geomp.ShapeType["EDGE"])
404 geomp.UnionList(Auto_group_for_hauteur_sup_m, [hauteur_haut_1, hauteur_haut_2])
405 geomp.addToStudyInFather( HAUT, Auto_group_for_hauteur_sup_m, '
    Auto_group_for_hauteur_sup_m' )
406
407 Regular_1D_14 = SUP_m.Segment(geom=Auto_group_for_hauteur_sup_m)
408 hauteur_sup_h = Regular_1D_14.NumberOfSegments(eh)
409 smesh.SetName(hauteur_sup_h, 'hauteur_sup_h')
410 hauteur_haut_h.SetDistrType( 0 )
411 Propagation_of_1D_Hyp_on_opposite_edges_11 = Regular_1D_14.Propagation()
412 smesh.SetName(Propagation_of_1D_Hyp_on_opposite_edges_11, 'Propagation of 1D Hyp. on
    opposite edges_11')
413
414 Auto_group_for_rayon_sup_m = geomp.CreateGroup(HAUT, geomp.ShapeType["EDGE"])
415 if e <= 0.16:
416     geomp.UnionList(Auto_group_for_rayon_sup_m, [rayon_haut_2, rayon_haut_4])
417 elif e <= 1.24:
418     geomp.UnionList(Auto_group_for_rayon_sup_m, [rayon_haut_1, rayon_haut_4])
419 else:
420     geomp.UnionList(Auto_group_for_rayon_sup_m, [rayon_haut_1, rayon_haut_3])
421 geomp.addToStudyInFather( HAUT, Auto_group_for_rayon_sup_m, 'Auto_group_for_rayon_sup_m
    ' )
422
423 Regular_1D_15 = SUP_m.Segment(geom=Auto_group_for_rayon_sup_m)
424 status = SUP_m.AddHypothesis(param_raffinement,Auto_group_for_rayon_sup_m)
425 Propagation_of_1D_Hyp_on_opposite_edges_12 = Regular_1D_15.Propagation()
426 smesh.SetName(Propagation_of_1D_Hyp_on_opposite_edges_12, 'Propagation of 1D Hyp. on
    opposite edges_12')
427
428 isDone = SUP_m.Compute()
429
430 perim_sup_m = Regular_1D_13.GetSubMesh()
431 smesh.SetName(perim_sup_m, 'perim_sup_m')
432 hauteur_sup_m = Regular_1D_14.GetSubMesh()
433 smesh.SetName(hauteur_sup_m, 'hauteur_sup_m')
434 rayon_sup_m = Regular_1D_15.GetSubMesh()
435 smesh.SetName(rayon_sup_m, 'rayon_sup_m')
436
437 # Construction de la spore
438
439 BMH_m = smesh.Concatenate([BAS_m.GetMesh(), MILIEU_m.GetMesh(), HAUT_m.GetMesh()], 1, 1,
    1e-05)
440 smesh.SetName(BMH_m.GetMesh(), 'BMH_m')
441 isDone = BMH_m.Compute()
442
443 BMH_m_mirrored = BMH_m.MirrorObjectMakeMesh( BMH_m, SMESH.AxisStruct( 0, 0, 0, 1, -1, 0
    ), SMESH.SMESH_MeshEditor.PLANE, 0, 'BMH_m_mirrored' )
444 smesh.SetName(BMH_m_mirrored.GetMesh(), 'BMH_m_mirrored')
445 isDone = BMH_m_mirrored.Compute()
446

```

```

447 SUP_m_mirrored = SUP_m.MirrorObjectMakeMesh( SUP_m, SMESH.AxisStruct( 0, 0, d/2, 1, 0,
      -1 ), SMESH.SMESH_MeshEditor.PLANE, 0, 'SUP_m_mirrored' )
448 smesh.SetName(SUP_m_mirrored.GetMesh(), 'SUP_m_mirrored')
449 isDone = SUP_m_mirrored.Compute()
450
451 QUART_m = smesh.Concatenate([BMH_m.GetMesh(), BMH_m_mirrored.GetMesh(), SUP_m_mirrored.
      GetMesh()], 1, 1, 1e-05)
452 smesh.SetName(QUART_m.GetMesh(), 'QUART_m')
453
454 QUART_m_rotated = QUART_m.RotateObjectMakeMesh( QUART_m, SMESH.AxisStruct( 0, 0, 0, 0,
      0, 1 ), 1.5708, 0, 'QUART_m_rotated' )
455 smesh.SetName(QUART_m_rotated.GetMesh(), 'QUART_m_rotated')
456 isDone = QUART_m_rotated.Compute()
457
458 QUART_m_rotated_1 = QUART_m.RotateObjectMakeMesh( QUART_m, SMESH.AxisStruct( 0, 0, 0, 0,
      0, 1 ), 3.14159, 0, 'QUART_m_rotated_1' )
459 smesh.SetName(QUART_m_rotated_1.GetMesh(), 'QUART_m_rotated_1')
460 isDone = QUART_m_rotated_1.Compute()
461
462 QUART_m_rotated_2 = QUART_m.RotateObjectMakeMesh( QUART_m, SMESH.AxisStruct( 0, 0, 0, 0,
      0, 1 ), 4.71239, 0, 'QUART_m_rotated_2' )
463 smesh.SetName(QUART_m_rotated_2.GetMesh(), 'QUART_m_rotated_2')
464 isDone = QUART_m_rotated_2.Compute()
465
466 SPORE_m = smesh.Concatenate([QUART_m.GetMesh(), QUART_m_rotated.GetMesh(),
      QUART_m_rotated_1.GetMesh(), QUART_m_rotated_2.GetMesh()], 1, 1, 1e-05)
467 smesh.SetName(SPORE_m.GetMesh(), 'SPORE_m')
468 isDone = SPORE_m.Compute()
469
470 #Construction des 4 demi-spheres
471
472 DEMI_m = smesh.Concatenate([QUART_m.GetMesh(), QUART_m_rotated.GetMesh()], 1, 1, 1e-05)
473 smesh.SetName(DEMI_m.GetMesh(), 'DEMI_m')
474 isDone = DEMI_m.Compute()
475
476 DEMI_m_sym = DEMI_m.MirrorObjectMakeMesh( DEMI_m, SMESH.AxisStruct( 0, (d+e)/2, 0, 0, 1,
      0 ), SMESH.SMESH_MeshEditor.PLANE, 0, 'DEMI_m_sym' )
477 smesh.SetName(DEMI_m_sym.GetMesh(), 'DEMI_m_sym')
478 isDone = DEMI_m_sym.Compute()
479
480 DEMI_m_sym_sym = DEMI_m_sym.MirrorObjectMakeMesh( DEMI_m_sym, SMESH.AxisStruct( 0, 0, 0,
      0, 1, 0 ), SMESH.SMESH_MeshEditor.PLANE, 0, 'DEMI_m_sym_sym' )
481 smesh.SetName(DEMI_m_sym_sym.GetMesh(), 'DEMI_m_sym_sym')
482 isDone = DEMI_m_sym.Compute()
483
484 DEMI_m_rot = DEMI_m_sym.RotateObjectMakeMesh( DEMI_m_sym, SMESH.AxisStruct( 0, 0, 0, 0,
      0, 1 ), 1.5708, 0, 'DEMI_m_rot' )
485 smesh.SetName(DEMI_m_rot.GetMesh(), 'DEMI_m_rot')
486 isDone = DEMI_m_rot.Compute()
487
488 DEMI_m_rot_rot = DEMI_m_sym_sym.RotateObjectMakeMesh( DEMI_m_sym_sym, SMESH.AxisStruct(
      0, 0, 0, 0, 0, 1 ), 1.5708, 0, 'DEMI_m_rot_rot' )
489 smesh.SetName(DEMI_m_rot_rot.GetMesh(), 'DEMI_m_rot_rot')

```

```

490 isDone = DEMI_m_rot_rot.Compute()
491
492 # Construction des 4 quarts de spheres
493
494 QUART1_m = QUART_m.MirrorObjectMakeMesh( QUART_m, SMESH.AxisStruct( (d+e)/2, (d+e)/2, 0,
    1, 1, 0 ), SMESH.SMESH_MeshEditor.PLANE, 0, 'QUART1_m' )
495 smesh.SetName(QUART1_m.GetMesh(), 'QUART1_m')
496 isDone = QUART1_m.Compute()
497
498 QUART2_m = QUART1_m.RotateObjectMakeMesh( QUART1_m, SMESH.AxisStruct( 0, 0, 0, 0, 0, 1 )
    , 1.5708, 0, 'QUART2_m' )
499 smesh.SetName(QUART2_m.GetMesh(), 'QUART2_m')
500 isDone = QUART2_m.Compute()
501
502 QUART3_m = QUART2_m.RotateObjectMakeMesh( QUART2_m, SMESH.AxisStruct( 0, 0, 0, 0, 0, 1 )
    , 1.5708, 0, 'QUART3_m' )
503 smesh.SetName(QUART3_m.GetMesh(), 'QUART3_m')
504 isDone = QUART3_m.Compute()
505
506 QUART4_m = QUART3_m.RotateObjectMakeMesh( QUART3_m, SMESH.AxisStruct( 0, 0, 0, 0, 0, 1 )
    , 1.5708, 0, 'QUART4_m' )
507 smesh.SetName(QUART4_m.GetMesh(), 'QUART4_m')
508 isDone = QUART4_m.Compute()
509
510 # Maillage Final
511
512 SPHERES_m = smesh.Concatenate([SPORE_m.GetMesh(), DEMI_m_sym.GetMesh(), DEMI_m_sym_sym.
    GetMesh(), DEMI_m_rot.GetMesh(), DEMI_m_rot_rot.GetMesh(), QUART1_m.GetMesh(),
    QUART2_m.GetMesh(), QUART3_m.GetMesh(), QUART4_m.GetMesh()], 1, 1, 1e-04)
513 smesh.SetName(SPHERES_m.GetMesh(), 'SPHERES_m')
514 isDone = SPHERES_m.Compute()
515
516 # Extraction des faces de bord pour les conditions limite
517
518 Filtre = smesh.GetFilter(smesh.FACE, smesh.FT_FreeFaces)
519 Id_facebord = SPHERES_m.GetIdsFromFilter(Filtre)
520
521 epsilon = 1E-4
522
523 Id_perio = []
524 Id_parois = []
525 Id_sym = []
526 Id_spore = []
527 Id_spores = []
528
529 for Id in Id_facebord :
530
531     cdg = SPHERES_m.BaryCenter(Id)
532     x = cdg[0]
533     y = cdg[1]
534     z = cdg[2]
535

```

```

536  if (x <= -(d+e) + epsilon or x >= d+e - epsilon or y <= -(d+e)+epsilon or y >= (d+e)-
      epsilon) : Id_perio.append(Id)
537  elif (z <= 0 + epsilon) : Id_parois.append(Id)
538  elif (z >= d+e/2-epsilon) : Id_sym.append(Id)
539  elif (x**2 + y**2 <= d/2 + epsilon) : Id_spore.append(Id)
540  else : Id_spores.append(Id)
541
542  Perio = SPHERES_m.MakeGroupByIds('Perio', smesh.FACE, Id_perio)
543  Parois = SPHERES_m.MakeGroupByIds('Parois', smesh.FACE, Id_parois)
544  Sym = SPHERES_m.MakeGroupByIds('Sym', smesh.FACE, Id_sym)
545  Spore = SPHERES_m.MakeGroupByIds('Spore', smesh.FACE, Id_spore)
546  Spores = SPHERES_m.MakeGroupByIds('Spores', smesh.FACE, Id_spores)
547
548  if salome.sg.hasDesktop():
549      salome.sg.updateObjBrowser(1)
550      iparameters.getSession().restoreVisualState(1)

```


Annexe D

Protocoles Expérimentaux

D.1 Préparation de solutions de spores d'*Aspergillus niger*

Préparation de la solution de tween

En chimie, la concentration micellaire critique (CMC) est la concentration en tensioactif dans un milieu au dessus de laquelle des micelles se forment spontanément. En dessous de la CMC, le tensioactif forme une couche en surface du liquide et le reste est dispersé dans la solution, alors qu'au dessus des micelles sphériques se forment. La CMC se mesure généralement en millimoles (mmol).

Afin de favoriser le mélange eau+spores, on ajoute à l'eau distillée du polysorbate (ou Tween 80[®]), un tensioactif. La CMC d'une solution de polysorbate à 80 % en volume dans de l'eau pure est de 0,012 mmol. La masse molaire du polysorbate étant de 1310 g · mol⁻¹ et sa masse volumique d'environ 1,06 à 1,09 g · l⁻¹, si l'on veut obtenir une solution de tween à la CMC, il faut ajouter 20 µl de polysorbate 80 dans un litre d'eau distillée.

Préparation de la solution de spores

1. Sur un milieu malt ou Sabouraud, ensemercer une bille cryo-préservée d'*Aspergillus niger*.
2. Incuber quatre jours à 30 °C.
3. Déposer 2 ml d'eau+polysorbate sur la culture.
4. Gratter les spores avec une anse stérile afin d'obtenir une pâte liquide de spores. Ne pas agiter la boîte afin d'éviter que l'eau ne s'infilte en dessous de la gélose.
5. Répéter l'étape précédente avec 3 ml afin de récupérer davantage de spores.
6. Récupérer le liquide avec une pipette et le déposer dans un tube de type Falcon contenant 45 ml d'eau+polysorbate.

Détermination de la concentration de la solution de spores

Afin de déterminer la concentration de spores ainsi obtenue, on procède par dilutions successives et ensemencement. On prélève 1 ml de la solution mère que l'on verse dans un tube contenant 9 ml d'eau+polysorbate. On répète cette manipulation autant de fois que nécessaire. On ensemence ensuite 500 µl de chaque solution obtenue sur milieu malt ou Sabouraud, pour les incuber pendant 48h à 30 °C.

Les colonies fongiques qui se forment à la surface des boîtes de gélose nous permet d'en déterminer le CFU (Colony-Forming Unit), qui est une estimation du nombre de champignons viables. Elle nous permet de se ramener à la concentration C de spores viables selon la formule D.1.

$$C = \frac{CFU}{\text{Dilution} \times \text{Quantité étalée}} \quad (\text{D.1})$$

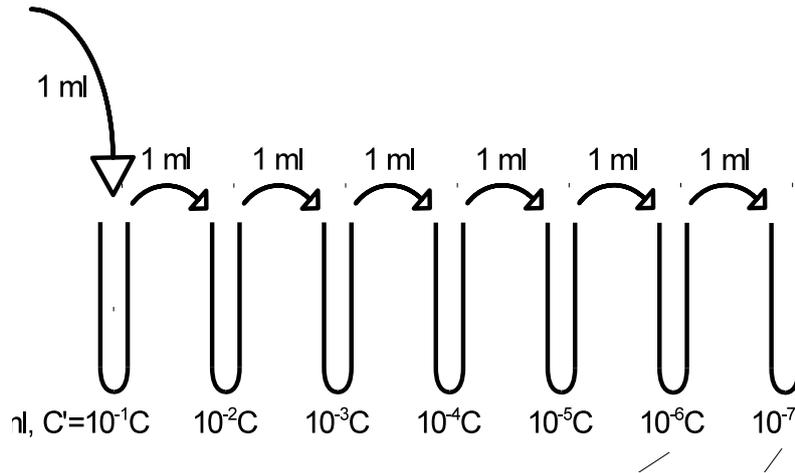


FIGURE D.1: Schéma des dilutions puis mises en culture afin de déterminer la concentration de la solution mère.

D.2 Évaluation de traitements fongicides

Ce qui suit est le protocole (succinct) utilisé lors de l'expérience d'évaluation de systèmes fongicides, donné ici à titre d'exemple des autres protocoles utilisés durant nos expériences.

But

- Quantifier l'efficacité fongicide de produits biocides du commerce (Anios, Vesismin).
- Vérifier le caractère rémanent de ces produits.

Description

- Aérosolisation de spores fongiques (*Aspergillus Niger*) dans une enceinte de 1m³.
- Sédimentation des spores sur différentes surfaces ayant subi différents traitements.
- Échantillonnage des spores sur les surfaces et mise en culture afin d'en comparer la viabilité.
- Observation microscopique de spores déposées sur des lames de microscope afin d'en caractériser la forme et d'en estimer une taille moyenne

Matériaux étudiés et hydrophobicité (angle de contact)

- Inox
- Verre (20-30°)
- Polypropylène (102,1°)
- Carrelage émaillé (idem verre)

Traitements des surfaces

- Vesimin 2 % (concentration commerciale)
- Vesimin 10 %
- Anios (concentration commerciale)
- Éthanol (témoin)

Dispositifs d'aérosolisation

- Colison Nebulizer (2 bars, 40 mL de solution, 5 minutes)
- DAF (2 bars, 5 secondes)

Prélèvement des spores

- Prélèvement 3 h après la fin de l'aérosolisation
- Boîtes contact Oxoid[®] de type Sabouraud glucosé au Chloramphénicol[®]
- Poids étalon (Rodac[®] Weight)
- Temps de pose : 10 secondes
- Viabilité des spores prélevées (CFU) : Incuber à 30°C pendant 72 h
- Si les boîtes sont saturées, réduire le temps d'aérosolisation, ou le temps d'incubation.

Annexe E

Publications et communications

E.1 Société des Experts Chimistes de France

Les deux articles suivants ont été publiés dans *Annales des Falsifications, de l'expertise chimique et toxicologique*, revue publiée par la Société des Experts Chimistes de France (SECF).

E.2 32^e congrès de la SFETB

La Société Française d'Étude et de Traitement des Brûlures (SFETB) regroupe en son sein l'ensemble des professionnels impliqués dans le traitement de la brûlure. A ce titre sont représentés les anesthésistes-réanimateurs, les chirurgiens plasticiens, les rééducateurs, les kinésithérapeutes et ergothérapeutes, les psychiatres et psychologues, ainsi que le personnel infirmier des services prenant en charge les brûlés.

Ce poster a été présenté au cours du 32^e congrès de la SFETB, qui s'est tenu à Nantes du 13 au 15 Juin 2012. Il a reçu le prix du meilleur poster après vote des participants au congrès.

E.3 Revue Brûlures

Cet article a été publié à la suite de notre participation au 32^e congrès de la SFETB.

E.4 Articles soumis

Plusieurs articles ont été soumis où vont l'être incessamment. Les deux premiers concernent la problématique des ventilateurs comme source de contamination. Une lettre brève (*letter to the editor*) et axée sur les prélèvements hospitaliers a été soumise au *New England Journal of Medicine* début décembre. Un article plus long et axé sur les expérimentations doit être prochainement soumis au *Journal of Hospital Infection*. Le suivant est en grande partie constitué par les deux derniers chapitres de cette thèse, concernant les simulations numériques d'écoulements autour de sphères, et sera soumis à *Physics of Fluids*. Le dernier, enfin, traite de l'expérience sur les traitements fongicides, et sera soumis au *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*.

La qualité de l'air intérieur : une préoccupation croissante

Vance BERGERON, Amine METAHNI
Ecole Normale Supérieure de Lyon,
Laboratoire de Physique, CNRS UMR 5672 - 46 allée d'Italie
69007 Lyon, France

Résumé

La Qualité de l'Air Intérieur (QAI) est en passe de devenir une problématique de santé publique majeure : L'usage croissant de matières plastiques dans les meubles ainsi que dans les appareils électroménagers, les solvants chimiques ainsi que les matériaux de construction traités, associés aux mesures d'isolation et d'étanchéification des bâtiments, ont causé une augmentation sans précédent des polluants aéroportés intérieurs. Cela explique que l'augmentation des cas d'asthme et d'allergies, les maladies pulmonaires, certains cancers ainsi que le fameux "syndrome du bâtiment malsain" aient tous été mis sur le compte du temps croissant passé dans des atmosphères confinées. La prise en compte de cette problématique impose d'abord que l'on identifie et quantifie les diverses particules en suspension, de même que les polluants chimiques que l'on trouve dans les espaces fermés, puis que l'on évalue les niveaux de risques en fonction de l'exposition humaine qui en résulte. Les organismes de réglementation ainsi que la communauté scientifique fournissent aujourd'hui un effort important afin de quantifier et établir les niveaux de risques ainsi que les marches à suivre pour résoudre ces problèmes, et ce pour chaque classe de polluant. Nous allons tout au long de cet article en faire le tour et fournir un aperçu des directives d'ores et déjà établies ainsi que de celles à venir.

Mots clés : Qualité de l'Air Intérieur, Polluants Aéroportés, Composés Organiques Volatils, Syndrome du Bâtiment Malsain, AFSSET, OQAI.

Summary

Indoor air quality (IAQ) concerns the levels and human exposure to the various particulate, chemical and biological pollutants found in enclosed habitable spaces and has become a growing public health concern. The prolific use of plastics in furniture and appliances, chemical solvents and treated building materials, coupled with engineering measures to seal and insulate buildings have caused a dramatic rise in indoor airborne pollutants. Indeed, the rising cases of asthma and allergies, pulmonary diseases, certain cancers and so-called "sick-building syndrome" have all been attributed to the increased time spent indoors. To address these concerns a significant effort is underway by regulatory bodies and the scientific community to quantify and establish risk levels and guidelines for each class of airborne pollutant. In this article we provide an overview of this ongoing endeavour and provide insight into the current established guidelines and future development.

Keywords: Indoor Air Quality, Airborne Pollutants, Volatile Organic Compounds, Sick Building Syndrome, AFSSET, OQAI.

1. Introduction

La qualité de l'air intérieur (QAI) désigne la qualité de l'air au sein et aux environs des bâtiments, ce terme étant employé plus particulièrement lorsqu'il est mis en relation avec la santé et le confort des occupants du bâtiment. C'est une préoccupation de santé publique majeure dans la mesure où nous passons 80 à 90% de notre temps à l'intérieur d'un bâtiment. Notre exposition à des polluants nocifs peut donc être potentiellement critique. Qui plus est, de récentes études ont estimé que l'air intérieur est jusqu'à six fois plus pollué que l'air extérieur. Différentes sources peuvent être à l'origine d'un problème de pollution de l'air intérieur. Ce problème se manifeste généralement lorsque l'air frais circulant à travers l'environnement est limité, lorsque des substances toxiques présentes libèrent des composés organiques volatils (COV), ou lorsque l'air extérieur diffusé à l'intérieur est lui-même pollué, et enfin lorsqu'une humidité excessive favorise la croissance de moisissures.

Parmi les symptômes typiques ressentis et causés ou aggravés par la pollution de l'air intérieur, on peut citer les maux de tête, les irritations des sinus, la torpeur, les congestions des voies respiratoires supérieures, et les irritations oculaires. Nous pouvons y ajouter des pathologies comme l'asthme, les affections respiratoires chroniques, ainsi que les habituels rhumes et gripes : toutes peuvent être directement liées à une mauvaise

qualité de l'air intérieur. Des problèmes de santé à long terme peuvent aussi apparaître à cause d'une exposition à divers COV cancérigènes, et dans d'autres cas, une pollution de l'air intérieur peut causer des infections potentiellement mortelles, comme la légionellose.

Plusieurs variables entrent en jeu dans la pollution de l'air intérieur. Nous pouvons citer par exemple l'utilisation de produits chimiques comme le formaldéhyde dans les moquettes et les meubles ; le monoxyde de carbone issu de la fumée de cigarette et du trafic automobile, les polychlorobiphényles (PCB) contenus dans les transformateurs électrique, l'amiante utilisée pour l'isolation des bâtiments, l'ozone issu des photocopieurs, les solvants utilisés dans les produits d'entretien, les colles et les parfums, etc... L'amiante peut causer des problèmes de santé lorsqu'elle est inhalée et pénètre dans les poumons : l'inhalation de fibres d'amiante aéroportées en particules très fines a été associée à des maladies comme l'amiantose, le mésothéliome et le cancer du poumon. Il existe également des causes naturelles à cette pollution. Par exemple, l'être humain expire du dioxyde de carbone, qui en petites quantités n'est pas toxique, mais qui peut devenir dangereux s'il lui est permis de s'accumuler en grandes concentrations. Des microorganismes et bactéries peuvent aussi se développer au sein du système de ventilation. Si c'est le cas, ces derniers peuvent alors se disperser au travers de l'ensemble de l'espace de travail et du bâtiment par son intermédiaire.

Les problèmes de qualité de l'air sont en partie créés et aggravés par l'étanchéification des bâtiments, dans lesquels de nombreuses personnes vivent et travaillent. La conception de ces édifices, destinée à réduire la consommation énergétique, a été identifiée comme une des principales causes du syndrome du bâtiment malsain.

Nous nous proposons dans cet article de présenter une vue générale de la situation des connaissances actuelles sur les effets des principaux polluants que l'on trouve aujourd'hui dans les espaces confinés dans lesquels nous travaillons et vivons. Nous précisons aussi les mesures qui sont prises ou recommandées pour nous en protéger. Nous ne traiterons pas de la pollution par les rayonnements, électromagnétiques ou ionisants (problème de la contamination par le radon), qui nous a paru relever d'une approche plus spécifique.

2. Comment caractériser l'air intérieur - Quels niveaux d'alerte ?

Depuis quelques années, une attention croissante est portée à ce sujet, avec en particulier la création par les pouvoirs publics, en 2001, de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) dont la vocation est de dresser un état des lieux des expositions aux polluants de l'air dans les lieux de vie intérieurs et d'en identifier les déterminants, afin d'apporter les informations pour l'évaluation et la gestion des risques sanitaires associés. Les données collectées ont confirmé la nécessité de disposer, au niveau national, de valeurs de référence permettant de situer les niveaux de concentrations mesurés dans les environnements clos et d'instaurer des mesures de réduction des émissions proportionnées notamment au risque potentiel encouru. Par ailleurs, le manque de niveaux de référence pour la qualité de l'air intérieur limite le développement de référentiels utiles pour la qualification, en termes sanitaires, des émissions de composés par les produits de construction, de décoration ou d'usage courant. Ces éléments manquent également pour la conception de protocoles en vue de la spécification de bâtiments à Haute Qualité Environnementale.

À l'échelle internationale, des valeurs de recommandations sont proposées dans certains pays et par quelques organismes reconnus, parmi lesquelles les valeurs guides pour la qualité de l'air ^[1] et plus récemment celles issues du projet européen INDEX ^[2]. Coordonné par le Dr. Dimitrios Kotzias (*Commission of The European Union, Joint Research Centre, Institute for Health and Consumer Protection, Physical and Chemical Exposure Unit in Ispra, Italy*) et financé par la DG Sanco (*Direction générale de la Commission européenne pour la santé et la protection des consommateurs*), le projet INDEX avait pour but d'élaborer une liste de polluants chimiques prioritaires des environnements intérieurs susceptibles d'être réglementés dans le futur et de proposer des valeurs guides de qualité d'air intérieur.

La caractérisation de la QAI implique la collecte d'échantillons d'air, le suivi de l'exposition humaine aux polluants, le recueil d'échantillons sur les surfaces du bâtiment, ainsi que la modélisation des flux d'air à l'intérieur de l'édifice. En utilisant cette approche, les organismes de réglementation sont capables d'établir des limites et des directives pour certains niveaux de contamination de l'air.

En France, les principaux organismes régissant ces activités sont l'Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail (AFSSET) et l'Association Française de Normalisation (AFNOR), qui travaille en étroite collaboration avec l'International Organization for Standardization (ISO) dont elle est membre. Ces organismes ont commencé à établir certaines "valeurs guides de qualité d'air intérieur" (VGAI) ^[3-5]. Les valeurs guides de qualité d'air intérieur, telles que définies par l'AFSSET, sont des concentrations dans l'air d'une substance chimique en dessous desquelles aucun effet sanitaire ou (dans le cas de composés odorants) aucune nuisance ou encore aucun effet indirect important sur la santé n'est en principe attendu

pour la population générale. Elles visent ainsi à préserver la population de tout effet néfaste lié à l'exposition à cette substance. Cette définition est généralement applicable dans le cadre de valeurs guides construites pour protéger d'effets à seuil de dose. Dans le cas d'effets sans seuil de dose identifié, tels que les effets cancérigènes dont le mode d'action est génotoxique, il existe aussi des valeurs guides mais celles-ci sont exprimées sous la forme de niveaux de risque correspondant à une probabilité de survenue de la maladie.

Pour la QAI, les recommandations et les directives se divisent en trois catégories de polluants :

- les particules en suspension,
- les polluants chimiques (monoxyde de carbone et COV)
- et la matière avec activité biologique.

Dans ce qui suit, nous allons les décrire et mettre en lumière les principaux outils utilisés pour quantifier chacun d'entre eux.

Les particules en suspension

Il s'agit de petites particules solides ou liquides en suspension dans un milieu gazeux, le terme aérosol désignant l'ensemble des particules et du gaz. Les sources de particules en suspension peuvent être d'origine humaine ou naturelle. Les volcans, les tempêtes de sable, les feux de forêts et la végétation qui produit du pollen sont des exemples de sources naturelles. Les activités humaines, comme l'utilisation de combustibles fossiles, les centrales électriques et divers procédés industriels, génèrent également des quantités significatives d'aérosols. Les particules formées dans l'atmosphère par condensation ou transformation de gaz émis comme le dioxyde de soufre SO_2 ou les COV sont aussi considérées comme des particules en suspension.

Les classifications les plus fréquentes appliquées aux particules se réfèrent à la taille ; on parle de fraction granulométrique. Comme les particules sont le plus souvent non-sphériques (les fibres d'amiante par exemple), il existe de nombreuses définitions de la taille d'une particule. La plus largement utilisée est le diamètre aérodynamique. Une particule d'un diamètre aérodynamique de 10 micromètres se déplace dans un gaz de la même façon qu'une sphère de densité unitaire (1 gramme par centimètre cube) et de 10 micromètres de diamètre. Les diamètres des particules en suspension ayant un rôle notable dans la QAI varient entre moins de 10 nanomètres et plus de 10 micromètres. Ce spectre va des particules les plus petites (quelques molécules) jusqu'aux plus grosses, la limite étant la taille au-delà de laquelle elles ne peuvent plus être aéroportées. La notation PM_{10} est utilisée pour décrire les particules de 10 micromètres ou moins ; $\text{PM}_{2,5}$ pour les particules de moins de 2,5 micromètres de diamètre aérodynamique. La Figure 1 montre la correspondance entre la taille des particules en suspension dans l'air et leur pénétration dans les voies respiratoires. Les fines particules (moins de 0,5 micromètres) peuvent pénétrer très profondément, jusqu'aux alvéoles pulmonaires, et des niveaux plus élevés de ces particules dans l'air sont liés à des risques de sanitaires comme les maladies cardiaques, l'altération de la fonction pulmonaire où le cancer du poumon.

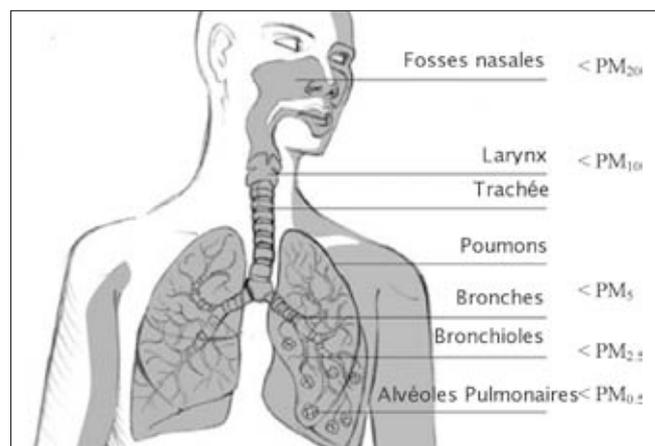


Figure 1. Schéma représentant la pénétration des particules dans l'appareil respiratoire humain en fonction de leur taille.

Les niveaux de particules en suspension dans l'air sont mesurés grâce à des dispositifs utilisant la diffusion d'un rayon laser, et fournissant la concentration des particules pour différentes gammes de tailles de particules. Ces dispositifs existent en plusieurs formats, des unités portatives aux systèmes professionnels fixes. Les modèles les plus grands font passer plus d'air à travers le système et fournissent par conséquent des mesures plus précises, même si de petits dispositifs relativement peu chers et facilement transportables peuvent donner à l'utilisateur final une très bonne idée de la concentration particulaire ainsi que de la distribution de tailles de particules dans l'air environnant.

Le standard internationalement reconnu pour l'évaluation et la classification des niveaux de particules en suspension dans l'air intérieur est la **norme ISO 14644-1** ^[6], qui fournit, en plus des classes de particules en suspension, des directives et des procédures de mesure. Ces classes de propreté sont cataloguées de ISO 1 à ISO 9 et le Tableau 1 fournit les seuils actuels de niveau de particules utilisés pour définir les différentes classes. Pour information, les espaces de travail et lieux de vie habituels sont classés ISO 8 ou 9, tandis que les salles d'opérations des hôpitaux sont classées entre ISO 5 et ISO 6 lorsque leurs systèmes de traitement de l'air fonctionnent correctement. Bien que des objectifs spécifiques aient été définis pour les infrastructures de santé et les salles blanches, à l'heure actuelle il n'existe pas de recommandations générales pour les niveaux de particules aéroportées sur les lieux de travail. Cependant, des efforts de recherche et une nouvelle législation se mettent en route afin de les établir, avec une attention particulière sur les effets que les nanoparticules peuvent induire sur la santé. Bien entendu, les particules plus petites que PM₁₀ font partie des 12 polluants placés sur la liste de priorité de l'AFFSET pour développer des niveaux de VGAI. Malheureusement, il est très difficile d'évaluer les concentrations de particules nanométriques aéroportées, et de nouveaux instruments seront nécessaires pour quantifier et déterminer la limite inférieure de PM.

En France, l'amiante a été reconnue comme source de maladie professionnelle (asbestose) en 1945. Son usage a été réglementé à partir de 1977 après que toutes les formes d'amiante eurent été classées cancérigènes par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC). L'interdiction totale de tout usage de l'amiante a été adoptée en 1997 en France et confirmée au niveau européen par la **directive 99/77/CE**, interdisant toute extraction, fabrication, transformation de fibres d'amiante au plus tard au 1er janvier 2005. Les fibres courtes d'amiante (FCA : longueur L < 5 micromètres, diamètre d < 3 micromètres et rapport L/d ≥ 3) ne sont donc mesurées ni en milieu professionnel ni en environnement général. Les fibres fines d'amiante (FFA : L ≥ 5 micromètres, d < 0,2 micromètres et L/d ≥ 3) font quant à elles l'objet de mesures en environnement général extérieur comme intérieur, mais sont exclues des études d'exposition aux postes de travail. Actuellement, l'AFFSET a confié au Comité d'Experts Spécialisés (CES) une évaluation des risques liés aux milieux aériens pour les fibres courtes et fibres fines d'amiante.

Classification N°	Densité maximale autorisée (en particules par mètre cube d'air) de particules de taille supérieure ou égale à celles données ci-dessous					
	0,1 µm	0,2 µm	0,3 µm	0,5 µm	1 µm	5 µm
ISO 1	10	2	-	-	-	-
ISO 2	100	24	10	4	-	-
ISO 3	1.000	237	102	35	8	-
ISO 4	10.000	2.370	1.020	352	83	-
ISO 5	100.000	23.700	10.200	3.520	832	29
ISO 6	1.000.000	237.000	102.000	35.200	8.320	293
ISO 7	-	-	-	352.000	83.200	2.930
ISO 8	-	-	-	3.520.000	832.000	29.300
ISO 9	-	-	-	35.200.000	8.320.000	293.000

Tableau 1. Standard ISO 14644-1 pour la propreté concernant les particules en suspension aéroportées. Les concentrations particulaires sont exprimées en nombre de particules par mètre cube. Si le seuil maximal est dépassé pour une seule des tailles de particules, alors c'est la classification suivante qui s'applique, jusqu'à ce que chaque limite soit satisfaite

Le monoxyde de carbone

L'un des polluants de l'air intérieur les plus toxiques est le monoxyde de carbone (CO). C'est un gaz sans couleur ni odeur produit par la combustion incomplète de combustibles fossiles. Les sources usuelles de CO sont la fumée de cigarette, les chauffages utilisant des combustibles fossiles, les chauffages centralisés défectueux, les fourneaux domestiques et les échappements automobiles. De hauts niveaux de CO privent le cerveau d'oxygène et peuvent causer nausées, pertes de conscience, voire la mort. Des diminutions de niveau de CO sont systématiquement observés dans le nombre croissant de restaurants non-fumeur et autres lieux publics devenus non-fumeurs.

Globalement, selon un rapport européen publié en 2005, pour la population mondiale, 80 % de l'exposition individuelle quotidienne au CO s'effectue dans des lieux clos, 6 % à l'extérieur et 14 % lors des transports motorisés. Les données de l'OQAI (2006) ^[7] montrent que sur un pas de temps de 30 min, la médiane des concentrations maximales observées est de 6,8 mg.m⁻³ (6 ppm) et que 2,6 %, des logements ont eu un maximum de concentration en CO dépassant 60 mg.m⁻³ (52 ppm) sur une période supérieure ou égale à 30 min. Sur un pas de temps de 8 heures, la médiane maximale des concentrations observées est de 3,8 mg.m⁻³ (3,3 ppm) et 6,4 % des logements ont dépassé la valeur de 10 mg.m⁻³ (9 ppm) sur ce pas de temps.

Se basant sur ces faits, l'AFSSET a proposé les valeurs VGAI suivantes :

- 10 mg.m⁻³ pour une exposition de 8 h
- 30 mg.m⁻³ pour une exposition de d'1 h
- 60 mg.m⁻³ pour une exposition de 30 min
- 100 mg.m⁻³ pour une exposition de 15 min

Les détails complets de cette études peuvent être trouvées dans "AFSSET - Valeurs guide de qualité d'air intérieur : Le monoxyde de carbone", Juillet 2007.

Détecteurs de monoxyde de carbone

La mise en place d'un détecteur de monoxyde de carbone permet d'être prévenu lorsque la concentration dans l'air de ce gaz devient dangereuse. Un détecteur de CO a pour but de déterminer la concentration de CO dans l'air et/ou de déclencher un signal d'alarme (voyant lumineux et signal sonore) lorsque la teneur en CO dépasse un certain seuil pendant une certaine durée. Il existe trois types de détecteurs disponibles sur le marché. Le premier est appelé détecteur électrochimique : ce genre de détecteur génère un courant électrique qui active une alarme dès que du monoxyde de carbone est décelé. Le deuxième type de détecteur de monoxyde de carbone est constitué d'un semi-conducteur en oxyde métallique. Le monoxyde de carbone réagit avec l'oxyde d'étain situé dans le détecteur, et cela provoque le déclenchement de l'alarme. Le troisième type de détecteur est constitué d'un disque enduit de gel : sous l'effet du monoxyde de carbone, le disque devient sombre et provoque ainsi la sonnerie d'alarme. Ces appareils coûtent entre 250 et 500€. Ils ont une durée de vie limitée et la plupart doivent être remplacés au bout de deux ou trois ans. Pour certains appareils, le fabricant prévoit un calibrage périodique, en moyenne deux fois par an.

Les détecteurs de CO à usage domestique doivent être conformes aux normes

- **NBN EN 50291** (relative aux méthodes d'essais et prescriptions de performances des appareils électriques pour la détection de monoxyde de carbone dans les locaux à usage domestique)
- et **NBN EN 50292** (guide de sélection, d'installation, d'utilisation et de maintenance des appareils électriques pour la détection de monoxyde de carbone dans les locaux à usage domestique).

La norme NBN EN 50291 stipule que le déclenchement de l'alarme doit se produire :

- après 120 minutes pour une concentration de 30 ppm
- entre 60 et 90 minutes pour une concentration de 50 ppm
- entre 10 et 40 minutes pour une concentration de 100 ppm
- avant 3 minutes pour une concentration de 300 ppm

Cette norme requiert par ailleurs que le détecteur de monoxyde de carbone :

- ait une durée d'autonomie et une garantie de 5 ans
- qu'une alarme signale la fin d'autonomie
- que le détecteur puisse fonctionner à des températures entre -10°C et +40°C
- que la puissance sonore soit au moins de 85 dB à 3 mètres
- que les alarmes sonore et visuelle soient intégrées.

Par ailleurs la norme NBN EN 50292 fournit des informations sur la sélection, l'installation, l'utilisation et la maintenance des appareils de détection de monoxyde de carbone prévus pour un fonctionnement continu dans les locaux à usage domestique.

Les composés organiques volatils (COV)

Les COV sont des gaz émis depuis certains solides ou liquides. Ils comprennent une grande variété de produits chimiques, dont certains peuvent avoir à court ou long terme, un effet négatif sur la santé. De nombreux COV ont une concentration plus élevée en intérieur (jusqu'à dix fois plus) qu'en l'extérieur. Ils sont émis par une large gamme de produits, de l'ordre de plusieurs milliers, incluant peintures, laques, décapants, dissolvants, produits de nettoyages, pesticides, matériaux de construction, mobilier, photocopieurs, imprimantes, correcteurs liquides, colles, adhésifs, marqueurs permanents, solutions photographiques... Les solvants organiques sont également largement utilisés en tant que composants de nombreux produits d'entretien, de désinfection, et dans les cosmétiques. Tous ces produits peuvent libérer des composés organiques durant leur utilisation et, dans une certaine mesure, lorsqu'ils sont stockés.

Les polluants secondaires générés lors de réactions d'oxydation entre l'ozone atmosphérique et des COV primaires de l'air, sont responsables d'une émission directe de COV. Dans ce cas de figure, des composés organiques de grande taille peuvent être oxydés en aldéhydes (comme l'acétaldéhyde ou le formaldéhyde) qui sont soupçonnés d'être cancérigènes. Il existe également des preuves de la création de particules nanométriques par l'intermédiaire de ces réactions.

Des particules totalement nouvelles peuvent être formées par un processus connu sous le nom de nucléation homogène. Des travaux relativement récents ont montré qu'en présence de faibles concentrations d'ammoniac, l'acide sulfurique formé par l'oxydation du dioxyde de soufre est capable en présence d'eau, de donner lieu à la formation de particules d'une taille d'environ 1 à 2 nanomètres au moment de leur naissance. Ces particules croissent relativement rapidement (à souvent plus de 10 nanomètre de diamètre par heure), et il est admis que cette croissance est principalement due à la condensation des produits d'oxydation des COV^[8,9]. Dans l'environnement terrestre, la formation de grandes concentrations de nanoparticules est fréquemment observée au-dessus des forêts boréales finlandaises. O'Dowl *et al.* ont montré que la composition de ces particules de 3 à 10 nanomètres est largement organique et semblable à l'acide pinique ou cis-pinonique, dérivé de l'oxydation des terpènes biogéniques^[10].

Selon l'AFSSET, les premiers polluants pouvant faire l'objet de propositions de VGAI sont le formaldéhyde, le benzène, le naphthalène, le phtalate de di(2-éthylhexyle) (DEHP), le dioxyde d'azote, l'acétaldéhyde, le trichloréthylène, le tétrachloroéthylène et l'ammoniac. La méthodologie prévoit 3 étapes : d'abord organiser les connaissances toxicologiques (toxicocinétique, mécanisme d'actions, effets sur la santé humaine), puis analyser la qualité des valeurs guides (VG) et des valeurs toxicologiques de référence (VTR) disponibles et enfin choisir la ou les VGAI à retenir parmi les valeurs de référence disponibles.

Par ailleurs, l'Agence recommande de mettre en place des processus réguliers de révision de la liste des substances ainsi que des valeurs guides déjà produites et de développer, dans un contexte normatif, des stratégies d'échantillonnage et de mesure pour vérifier le respect de ces valeurs guides dans différents environnements intérieurs.

Dans le cadre de cette étude, les valeurs guides ont d'ores et déjà été produites pour le formaldéhyde, le benzène et le monoxyde de carbone. En ce qui concerne le formaldéhyde, l'agence propose une VGAI court terme applicable sur deux heures et une VGAI pour une exposition long terme. Elles sont respectivement de 50 $\mu\text{g.m}^{-3}$ sur 2 heures et de 10 $\mu\text{g.m}^{-3}$. Pour le benzène, l'AFSSET propose des VGAI pour des expositions à court terme, intermédiaire et long terme, prenant en compte les effets hématologiques du benzène (e.g. toxicité sur les lymphocytes lors d'expositions à court terme ou intermédiaires, diminution du nombre de cellules sanguines et leucémie dans les cas d'exposition chronique) :

VGAI long terme

- Pour les effets hématologiques non cancérogènes :
 - - 10 $\mu\text{g.m}^{-3}$ pour une durée d'exposition supérieure à un an.
- Pour les effets hématologiques cancérogènes :
 - - 2 $\mu\text{g.m}^{-3}$ pour une durée d'exposition "vie entière", correspondant à un excès de risque de 10^{-5} .
 - - 0.2 $\mu\text{g.m}^{-3}$ pour une durée d'exposition "vie entière", correspondant à un excès de risque de 10^{-6} .

(Dans ce cas, l'excès de risque correspond à la probabilité qu'une personne contracte le cancer si elle est exposée pendant toute sa vie. L'excès de risque de 10^{-5} se traduit par une personne sur cent mille personnes. L'excès de risque de 10^{-6} se traduit par une personne sur un million de personnes.)

VGAI Intermédiaire

- - 20 $\mu\text{g.m}^{-3}$ en moyenne sur un an pour les effets hématologiques non cancérogènes prenant en compte des effets cumulatifs du benzène.

VGAI court terme

- - 30 $\mu\text{g.m}^{-3}$ en moyenne sur 14 jours pour les effets hématologiques non cancérogènes prenant en compte des effets cumulatifs du benzène.

L'AFSSET recommande que l'ensemble des valeurs concernant les effets hématologiques non cancérogènes soit fixé comme objectif afin de protéger la santé humaine. Des expositions aiguës ou intermédiaires peuvent survenir dans des situations particulières, par exemple lors de travaux de rénovation. L'agence recommande par ailleurs :

- a) - la mise au point de protocoles métrologiques afin de vérifier le respect des valeurs guides de qualité d'air intérieur ;
- b) - des stratégies de surveillance et de gestion de la qualité de l'air intérieur s'appuyant sur les VGAI proposées ;
- c) - une sensibilisation et une information de la population générale à la problématique de la pollution de l'air intérieur afin de permettre une évolution des comportements, notamment lors des travaux d'aménagement, de rénovation ou de ménage ;
- d) - l'étude de l'impact économique et social du suivi du respect de ces valeurs ;
- e) - la mise en place d'études permettant une meilleure connaissance des expositions individuelles ;
- f) - l'étiquetage obligatoire des matériaux de construction et de décoration, en particulier sur la base des travaux de l'Agence publiés en octobre 2006 et intitulés "procédure de qualification des produits de construction sur la base de leurs émissions de COV et de critères sanitaires".

Des VGAI pour le trichloréthylène seront proposées par l'AFSSET très prochainement. D'une manière générale, il existe une série de normes ISO concernant divers polluants, accessibles auprès de l'Organisation Internationale de Normalisation référencées sous le nom "Air des lieux de travail".

Analyseur de gaz

Pour effectuer des mesures quantitatives des niveaux de COV, on commence par faire passer de l'air à travers un milieu adsorbant, choisi en fonction de son affinité pour les composants auxquels on s'intéresse. Le gaz capturé est alors désorbé et analysé par chromatographie en phase gazeuse (CPG) pour séparer les molécules du mélange, puis par spectrométrie de masse (MS) pour identifier les espèces chimiques.

Les instruments de CPG et de MS peuvent être assez onéreux, et un certain niveau de compétences est requis pour interpréter les données. Le moyen le plus facile est le moins coûteux pour obtenir une évaluation du niveau de COV reste donc de prélever des échantillons d'air et de les faire analyser par des laboratoires spécialisés.

Une façon alternative et moins onéreuse de connaître les niveaux de COV est de déterminer la concentration totale en COV dans l'air en utilisant un détecteur par photo-ionisation. Cet appareil est un instrument portatif utilisant une source UV afin d'ioniser des échantillons d'air. Une fois calibré, il peut détecter des niveaux de COV avec une précision de l'ordre de la ppb. Cependant, il n'est pas possible de distinguer différentes espèces chimiques.

2.4. La contamination biologique par voie aérienne

Dans son sens le plus large, la contamination biologique aéroportée inclut n'importe quel microorganisme pouvant être trouvé dans l'air, qu'il soit viable ou pas. Les sources biologiques de pollution intérieure sont nombreuses : les morceaux de peau, les cheveux décomposés, les acariens, les moisissures, les systèmes d'air conditionné, les plantes d'intérieur, la terre et les jardins environnants. En intérieur, le manque de circulation d'air permet à ces polluants aéroportés de s'accumuler plus qu'ils ne le feraient naturellement. Les préoccupations de santé relatives à ces polluants s'étendent des maladies et infections des poumons à l'asthme, en passant par la détérioration du système immunitaire. Un problème général est la légionellose, causée par une bactérie flottante, *Legionella*, qui se développe particulièrement dans les eaux stagnantes et tièdes. La voie première d'exposition est la formation d'aérosols, le plus souvent depuis des tours aéroréfrigérantes ou des pommeaux de douche. Une source fréquente de *Legionella* dans les buildings commerciaux provient des tours aéroréfrigérantes mal placées où mal entretenues, qui libèrent de l'eau sous forme d'aérosol pouvant potentiellement se retrouver au voisinage des entrées d'aération.

Les moisissures (aussi appelées "champignons microscopiques") font partie d'une grande variété de micro-organismes qui englobent notamment les champignons et les levures. Ces micro-organismes peuvent croître et se reproduire rapidement, produisant des spores (2 à 20 μm diamètre) et des mycéliums. Ils sont toujours présents dans l'air extérieur; et on en trouve aussi à l'intérieur des bâtiments. Ils peuvent pénétrer dans les bâtiments de plusieurs façons : par les portes ou les fenêtres, mais aussi via les vêtements, les animaux, la nourriture et les meubles. Les moisissures se forment et prolifèrent dans des milieux humides tels que le sous-sol, la salle de bain, la cuisine... Les produits celluloseux (bois, carton, papier peint ou placoplâtre...) constituent d'excellents supports à la croissance des moisissures, de même que tout amas de matières végétales ou de poussières organiques. Quand les moisissures se développent de façon importante, la dispersion des spores de moisissures dans l'air ambiant peut entraîner des problèmes de santé par simple inhalation ou contact cutané.

De plus, elles peuvent libérer, tout comme les bactéries, des toxines dangereuses pour la santé humaine. 5 à 10% de la population française (10 à 13% chez les enfants) est sensible aux allergènes de moisissures. Les moisissures sont susceptibles de déclencher des irritations des muqueuses, des maladies des voies respiratoires (toux, rhumes, éternuements, difficultés respiratoires), des crises d'asthme, des réactions allergiques telles qu'irritation de la peau, voire des effets plus toxiques avec les mycotoxines (fièvre, nausées, vomissements, état de fatigue, hémorragies pulmonaires) comme c'est le cas lors d'une exposition professionnelle (en milieu industriel ou agricole). Dans ce cas, deux grands types de situations professionnelles exposant à des risques biologiques sont à distinguer pour l'évaluation des risques professionnels :

- les situations où l'utilisation d'agents biologiques est délibérée car elle fait partie du procédé industriel (Poste de brossage de saucissons, par exemple),
- les situations d'exposition potentielle qui ne sont pas associées au procédé industriel mais qui accompagnent une activité particulière (contrôle microbiologique dans l'agroalimentaire ou maintenance en réseaux d'égouts, par exemple).

Bien que la prise de conscience de la contamination microbiologique de l'air ne cesse d'augmenter depuis ces dernières années, aucune directive de niveaux maximaux d'innocuité n'a pour l'instant été établie. Mais

il convient de rappeler que la surveillance microbiologique de l'air, par prélèvement actif (aspiration d'air par un biocollecteur) et/ou passif (sédimentation sur boîte de Pétri), est généralement associée à des contrôles de surface (par géloses de contact). Dans le cadre de contrôles microbiologiques de routine, les recherches portent sur l'analyse quantitative de la flore aérobie mésophile totale.

En France, pour les établissements de santé, les niveaux de propreté bactériologique sont définis dans la **norme AFNOR NF S 90 351**^[1] et dans un guide technique de l'Association pour la Prévention et l'Etude de la Contamination (ASPEC) : "Contrôles de l'environnement dans les zones à hauts et très hauts risques infectieux". La norme AFNOR définit 3 classes de propreté microbiologique, à réception d'une nouvelle installation, voir Tableau 2.

Classe Bactériologique	Concentration maximale en nombre de particules viables par mètre cube d'air (UFC/m ³)
B100	100
B10	10
B5	5
B1	≤ 1

Tableau 2. Classes de propreté bactériologique définies dans la NF S 90 351. (L'unité UFC signifie Unité Formant Colonies).

Les industries telles que l'industrie agroalimentaire et l'industrie cosmétique, sont également confrontées à la maîtrise de contaminants microbiologiques. Ne disposant pas de textes spécifiques les concernant, ces industries mettent en place des démarches dites HACCP (Hazard Analysis Critical Control Point), c'est-à-dire l'analyse des risques et des points critiques pour leur maîtrise. Ceci leur permet de définir leurs propres niveaux cibles ainsi que la fréquence optimale de contrôle microbiologiques.

Biocollecteurs

Les particules viables sont généralement fixées sur un support particulaire inerte. Dans l'air normal, elles appartiennent à différents groupes taxonomiques, avec des propriétés biologiques différentes en ce qui concerne leur survie lors des opérations de prélèvement et leur possibilité ultérieure de culture. Du point de vue physique, les particules viables se comportent comme des particules inertes. Pour les recueillir on a donc puisé dans les moyens utilisés en physique des aérosols. Mais leurs propriétés microbiologiques ont obligé à respecter des contraintes spécifiques, avec comme conséquence le développement d'appareillages spéciaux appelés "biocollecteurs". Les principes de ces contraintes sont :

- méthode de séparation du courant d'air minimisant les chocs sur le milieu de recueil, et les forces développées par le champ aérodynamique,
- conditions de prélèvement et méthodes de culture évitant de briser les agglomérats,
- utilisation d'un appareil stérilisable.

D'une façon générale, on peut distinguer deux types de collecteurs : ceux qui injectent l'air à grande vitesse directement sur le support de culture, et ceux qui font passer l'air à travers un fluide (Figure 2). Dans ce dernier cas, la solution obtenue peut être utilisée pour une mise en culture où analysée par des techniques chimiques (HPLC) ou moléculaires (Polymerase Chain Reaction -PCR).

La mise en œuvre des biocollecteurs est généralement simple et les notices explicites des constructeurs sont à suivre strictement. De plus, le standard international **ISO 14698**^[2] fournit des directives et des protocoles pouvant être suivis pour interpréter les résultats et émettre des conclusions, indépendamment de l'appareil utilisé.



Figure 2. : Photos de deux types de biocollecteurs : (a) un collecteur AGI-30 qui récupère les microorganismes dans une solution liquide ; (b) un collecteur à étages multiples qui sépare les particules en fonction de leur taille et les fait tomber directement sur le support de culture.

3. Les défis et les actions en cours

Pour les trois classes de polluants mentionnées ci-dessus, des travaux sont en cours afin de les quantifier de façon plus précise et de mieux comprendre les risques liés à leur exposition.

3.1. Particules en suspension

L'effort le plus significatif est celui qui s'est concentré sur les particules de taille nanométrique. Les méthodes interférométriques ne peuvent être employées pour cette gamme de taille et de nouveaux outils robustes et rentables sont nécessaires. Outre la difficulté de mesure, il faut également comprendre les risques que ces petites particules posent pour la santé. Même des substances généralement reconnues comme inertes, peuvent, à une taille de l'ordre du micron, avoir des effets inattendus, dus à la grande surface spécifique et à la pénétrabilité qu'elles acquièrent une fois réduites à une taille nanométrique.

3.2. Polluants chimiques

À cause des milliers de COV différents qui existent ainsi que de la multitude de réactions secondaires qui peuvent survenir entre eux, la recherche s'intensifie afin d'identifier à la fois les composés individuellement et les mélanges. Avec l'avènement de nouveaux systèmes électroniques, une gamme de capteurs de nouvelle génération est en cours de développement. Ce seront des capteurs personnels que l'on portera sur soi afin de mesurer en continu les niveaux d'exposition.

3.3. Polluants biologiques

Comme pour les polluants chimiques, on cherche actuellement à développer des bio-dosimètres individuels permettant de connaître l'exposition aux microbes aéroportés. De plus, les avancées des techniques d'identification moléculaire ont nourri un nouveau champ de recherche s'intéressant à l'aéro-génomique. Des connaissances précises sont accumulées afin de connaître l'empreinte génétique des microorganismes présents dans différents habitats.

En parallèle de tous ces efforts, se sont développées de nouvelles stratégies et technologies visant à contrôler les polluants de l'air intérieur et d'atténuer leurs effets. Ce domaine de recherche fera l'objet d'un prochain article dans cette revue.

4. Bibliographie

- [1] OMS, Air quality guidelines for Europe, second edition European series n°91, 2000
- [2] European Commission. Joint Research Centre (JRC). Final Report. Critical Appraisal of the Setting and Implementation of Indoor Exposure Limits in the EU: The INDEX project. Institute for Health and Consumer Protection, Physical and Chemical Exposure Unit. January, 2005a. I-21020 Ispra (VA), Italy.
- [3] Valeurs guides de qualité d'air Intérieur : Document cadre et éléments méthodologiques, avis de l'Afsset. Rapport du groupe d'experts Juillet 2007.
- [4] Valeurs guides de qualité d'air Intérieur : Le monoxyde de carbone, avis de l'Afsset. Rapport du groupe d'experts Juillet 2007.
- [5] Valeurs guides de qualité d'air Intérieur : Le formaldéhyde, avis de l'Afsset. Rapport du groupe d'experts Juillet 2007.
- [6] NF EN ISO 14644-1 : Salles Propres et environnements maîtrisés apparentés _ Partie 1 : Classification de la propreté particulaire de l'air, Juillet 1999.
- [7] Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) Campagne nationale Logements. Etat de la qualité de l'air dans les logements français. Rapport final, Novembre 2006.
- [8] M. Kulmala, "How particles nucleate and grow". Science, 2003, 302, 5647: 1000-1001.
- [9] M. Kulmala, H. Vehkamäki, T. Petäjä, M. Dal Maso, A. Lauri, V.-M. Kerminen, W. Birmili and P.H. McMurry, "Formation and growth rate of ultrafine atmospheric particles: a review of observations" Aerosol Science, 2004, 35: 143-176.
- [10] C.D. O'Dowd, P. Aalto, K. Hämeri, M. Kulmala and T. Hoffmann, "Atmospheric particles from organic vapours. Nature, 2002, 416: 497-498.
- [11] NF S 90-351: Etablissement de santé: salles propres et environnements maîtrisés et apparentés, Juin 2003.
- [12] ISO 14698 : "Salles propres et environnement maîtrisés apparentés – Maîtrise de la biocontamination – Partie 1 : Principes généraux", Septembre 2003.

Quelles technologies pour améliorer la qualité de l'air intérieur ?

Vance BERGERON, Amine METAHNI
Ecole Normale Supérieure de Lyon, Laboratoire de Physique, CNRS UMR 5672
46 allée d'Italie 69007 Lyon, France

Résumé

L'immense variété de polluants aéroportés peut être divisée en trois catégories : les particules inertes, les organismes biologiques et les molécules chimiques. Les particules de taille inférieure à 10 μ m peuvent pénétrer dans nos poumons et favoriser le développement de maladies du système respiratoire, tandis que certains composés organiques volatils (COV) sont notoirement cancérigènes. Les bactéries aéroportées, les virus et les spores fongiques sont quant à eux connus pour être des sources majeures d'infections et de transmission de maladies contagieuses. Une large gamme de techniques sont utilisées afin d'éliminer ces polluants. Elles reposent sur des mécanismes tels que la filtration mécanique, l'adsorption moléculaire ou encore la transformation chimique des polluants. Cependant, aucune d'entre elles ne permet aujourd'hui d'éliminer simultanément toutes les catégories de polluants présents dans l'air. C'est pourquoi de récentes recherches ont vu l'apparition de systèmes dits hybrides, combinant différentes techniques travaillant en synergie pour éliminer une plus large gamme de polluants. Dans ce qui suit, nous rappelons les méthodes standard utilisées pour l'amélioration de la qualité de l'air, et présentons ensuite diverses techniques et systèmes innovants qui essayent de proposer une solution globale pour améliorer la qualité de l'air intérieur (QAI).

Mots clés : Filtration, Adsorption, Plasma, IGUV, Oxydation Photocatalytique

Summary

The myriad of different pollutants found in the air we breathe can be broadly classified as particulate matter, chemical, and biological pollutants. Particles less than 10 microns can penetrate into our lungs and promote pulmonary diseases, while certain volatile organic compounds (VOC) are known to cause cancer. Airborne bacteria, viruses and fungal spores are known to be important sources of infection and transmission of contagious diseases. To eliminate these pollutants and range of different technologies are used which rely on mechanical filtration, molecular adsorption and chemical transformation, however no single technology can simultaneously eradicate all the different types of pollutants present. Therefore, recent efforts have seen the rise of so-called hybrid systems which combine different technologies that work synergistically to abate a broad range of pollutants. Here we review the standard methods used to improve indoor air quality and present various technologies and innovative systems that attempt to provide a global solution to improve overall indoor air quality.

Keywords: Filtration, Adsorption, Plasma, UVGI, Photo-catalytic Oxidation

1. Introduction

Comme nous l'avons évoqué dans un article publié dans le numéro 971 de cette revue, la qualité de l'air intérieur (QAI) des bâtiments est une problématique de santé publique qui prend de plus en plus d'ampleur⁽¹⁾. En France, au cours des trente dernières années, le nombre de cas d'asthme a été multiplié par quatre, et celui des allergies par sept. Les pathologies respiratoires causent 40.000 décès par an : c'est la quatrième cause de mortalité dans notre pays. Les polluants responsables sont divers et peuvent être aussi bien des particules inertes, que des composés organiques volatils (COV), ou bien encore des contaminants biologiques (par exemple des bactéries, des virus ou des spores fongiques), ayant tous pour point commun un vecteur identique: l'air. C'est pourquoi des recherches interdisciplinaires sont menées entre les corps médical et scientifique, ainsi que les organismes de régulation, afin d'évaluer le risque et de mettre en place la législation, les programmes de sensibilisation et les protocoles nécessaires à la réduction de ces polluants. Ces efforts ont abouti à la création de l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI), qui travaille en étroite collaboration avec l'Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail (AFSSET). Il fournit une grande quantité d'informations spécifiquement ciblées sur les problématiques de QAI (comme l'identification des polluants spécifiques et leur quantification), la législation et les initiatives prises.

Les techniques utilisées pour éliminer les polluants aéroportés sont un élément déterminant lors de la résolution des problèmes de QAI. Bien qu'il n'en existe aucune capable de supprimer tous les types de polluants aéroportés (inertes, chimiques et biologiques), de nombreuses technologies ciblant certaines classes de polluants, sont apparues. Elles incluent des méthodes physiques comme la filtration mécanique et l'adsorption, ainsi que des processus mettant à profit des transformations chimiques des polluants, typiquement par des réactions d'oxydation. Dans ce qui suit, nous présentons les principales techniques utilisées ou en cours de développement afin de traiter et améliorer la QAI.

2. Première étape : une ventilation appropriée

Lorsque l'on se penche sur le traitement de l'air intérieur, la première chose à prendre en considération est la présence ou non d'une ventilation adéquate. À titre indicatif, la norme européenne EN 13779 s'attache à établir les conditions nécessaires à un environnement intérieur confortable et sain en toute saison et à des coûts d'installation et de fonctionnement acceptables⁽²⁾. Elle est aujourd'hui adoptée comme norme nationale dans tous les pays de l'Union européenne. Elle spécifie les performances de filtrage, en fonction de l'air extérieur, que requiert le système pour fournir une bonne QAI.

La norme européenne EN 13779 classe l'air extérieur en 3 catégories. Elles vont de ODA1 à ODA3 (ODA pour Outdoor Air) ; d'un air pur, à l'exception de pollutions temporaires comme les pollens, jusqu'à un air où les concentrations de gaz et de particules sont élevées. Les matières en suspension désignent la quantité totale de particules solides ou liquides dans l'air. Les polluants gazeux se rapportent aux concentrations de CO₂, CO, NO₂, SO₂ et de COV. La plupart des directives relatives à l'air extérieur font encore référence à PM10 (diamètre des particules allant jusqu'à 10 µm). Mais, pour les besoins de la protection sanitaire, on s'intéresse de plus en plus aux particules dont la taille est bien inférieure à 10 µm.

La norme classe la qualité de l'air intérieur de IDA 4 (QAI médiocre) à IDA 1 (bonne QAI) – IDA pour Indoor Air. Une méthode traditionnelle mais limitée pour déterminer la QAI consiste à étudier les niveaux de CO₂. Le CO₂ étant produit par la respiration humaine, c'est un bon indicateur de l'efficacité de la ventilation, mais pas de la qualité de l'air dans l'absolu. Une autre méthode consiste à spécifier le débit d'air extérieur introduit par personne. Ce type de valeurs est souvent utilisé pour le dimensionnement du système de ventilation. Le tableau ci-dessous donne une liste des gammes usuelles de niveaux de CO₂ et les débits recommandés d'air extérieur pour atteindre différents niveaux de qualité de l'air intérieur. On notera qu'aucune des méthodes ne prend en compte les polluants sous forme de particules ou de gaz introduits dans le bâtiment avec l'air extérieur.

Catégorie	Description	Niveau de CO ₂ par rapport à l'air neuf (ppm) Intervalle type	Débit d'air neuf (m ³ /h/personne) Intervalle type, zone non-fumeur
IDA1	QAI élevée	≤ 400	>54
IDA2	QAI moyenne	400-600	36-54
IDA3	QAI modérée	600-1000	22-36
IDA4	QAI médiocre	>1000	< 22

Tableau 1 : EN 13779 Classification de la qualité de l'air Intérieur (2).

3. La filtration

Dépolluer l'air signifie littéralement en supprimer les polluants, ou transformer chimiquement ces derniers. La filtration de l'air consiste à retenir les particules de toute nature en suspension dans l'air, avec une efficacité déterminée. Les filtres à air, derrière leur apparente simplicité, on en réalité un fonctionnement complexe. Qu'ils soient particulaires ou moléculaires, ce fonctionnement repose sur plusieurs mécanismes agissant de concert. Beaucoup de nouvelles techniques ont été employées pour améliorer les performances des filtres à air et réduire leur coût. Parmi les avancées les plus remarquables, on peut citer la réduction de la perte de charge et l'élimination des polluants biologiques emprisonnés dans le filtre. Cette section offre une vue d'ensemble des techniques de filtration de l'air et rappelle quelques principes de base qui nous permettront de comprendre le fonctionnement des filtres à air.

3.1 Filtration mécanique

La filtration mécanique est le mode de filtration de l'air actuellement le plus répandu dans le monde, tant pour la « pré-filtration » de protection que pour la filtration de « confort », de salubrité (immeubles, bureaux, etc.), ou encore de haute et de très haute efficacité (salles blanches, salles d'opérations « stériles »). Les filtres mécaniques retiennent les particules de l'air parce que ces particules entrent en contact avec la surface des fibres du média filtrant et adhèrent aux fibres. Cependant il serait erroné de comparer le fonctionnement d'un filtre à celui d'un tamis : une multitude de mécanismes entrent en jeu, parmi lesquels nous pouvons en retenir quatre principaux: le tamisage, l'impaction inertielle, l'interception, et la diffusion. Ces mécanismes atteignent leur efficacité maximale pour des tailles de particules différentes (cf. fig. 1). Les plus grosses sont arrêtées par tamisage : leur diamètre est supérieur à la distance libre entre deux fibres et elles ne peuvent pas passer. C'est le mécanisme le plus trivial, mais c'est loin d'être le seul à entrer en jeu puisque même les particules d'une taille inférieure à la distance moyenne entre les fibres sont en partie arrêtées. Autour de $1\ \mu\text{m}$, les particules sont stoppées par impaction inertielle ou par interception. Elles heurtent la fibre du filtre soit parce que la ligne de courant qu'elles suivent tangente la fibre (on parle d'interception), soit parce qu'elles sont incapables, à cause de leur inertie, de suivre leur ligne de courant et d'éviter la fibre (on parle d'impaction inertielle). En dessous du dixième de micromètre, c'est la diffusion qui prend le relais : le mouvement Brownien des petites particules est suffisant pour augmenter sensiblement leur probabilité d'entrer en collision avec une fibre en suivant une ligne de courant non-interceptée par la fibre.

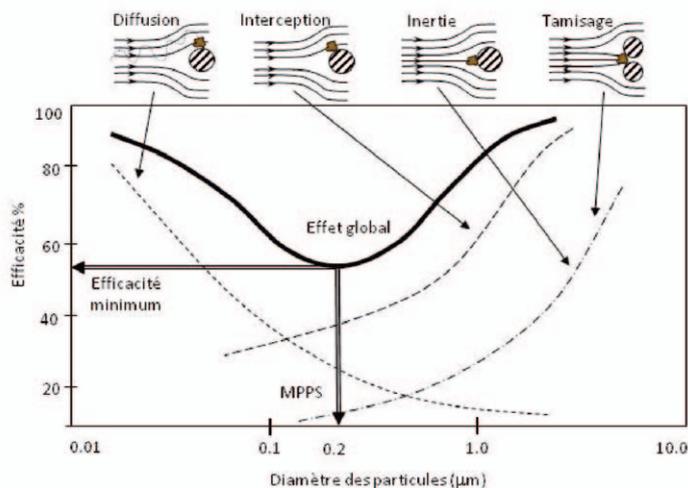


Figure 1. Tracé représentant l'efficacité de la filtration mécanique (en pourcentage de particules stoppées) en fonction de la taille des particules (trait épais), ainsi que les différentes contributions des quatre mécanismes cités ci-dessus (lignes en pointillés). Les figures au-dessus du tracé schématisent chacun de ces mécanismes : les lignes fléchées symbolisent les lignes de courant et les cercles hachurés la section d'une fibre.

L'efficacité globale d'un filtre à air résulte donc de la combinaison d'une multitude de mécanismes, responsable de l'allure caractéristique, en forme de « V », de la courbe d'efficacité du filtre. Cela met en évidence un minimum d'efficacité auquel correspond une dimension de particule appelée MPPS (Most Penetrating Particle Size - dimension de la particule la plus pénétrante). C'est la taille caractéristique des particules les plus difficiles à arrêter. Selon les filtres et les vitesses de passage de l'air dans le média filtrant, la MPPS se situe entre $0,1\ \mu\text{m}$ et $0,3\ \mu\text{m}$.

3.2 Choisir un filtre mécanique

Les filtres mécaniques sont conçus pour une multitude d'applications, qui diffèrent par la performance requise : il en existe donc une très large gamme. Selon l'utilisation, parmi les facteurs à prendre en compte figurent l'efficacité du filtre, la quantité de poussières à retenir, la perte de charge, l'encombrement, et enfin le prix. En outre, l'efficacité d'un filtre dépend du débit d'air qui le traverse et, plus précisément, de la vitesse de l'air dans la couche poreuse du média filtrant : l'efficacité diminue d'autant plus que la vitesse augmente. Il faut donc que la vitesse de passage de l'air soit la plus faible possible, et pour cela, on peut par exemple augmenter la surface filtrante : à débit volumique identique, cela réduit la vitesse de l'air dans le filtre. Des formes de plus en plus complexes sont ainsi élaborées, permettant de disposer une surface élevée de média filtrant dans un espace aussi réduit que possible. Les formes les plus courantes sont les filtres plats, les filtres à poches, les filtres à petits plis et les filtres à plis profonds.

Il existe de très nombreuses méthodes d'essai, de classifications et de spécifications des filtres à air (plus de 400 dans le monde) utilisant des procédés différents et souvent non comparables. Malgré cela, une dizaine d'entre elles se sont progressivement imposées comme normes, la plupart d'origine américaine. En Europe, chaque pays a construit sa norme en partant de la base établie au plan international par le comité Eurovent. Le Tableau 2 fournit une liste des différentes classifications des filtres regroupées en trois catégories d'applications. De plus amples détails peuvent être trouvés dans les normes associées : NF EN779, EN1822 et Eurovent 4/5 et 4/4 (3-6).

PRÉFILTRES Ventilation des lieux publics et ateliers, préfiltres pour filtre « absolu », filtres pour compresseurs	Class. EN 779 G 1 G 2 G 3 G 4	EFFICACITE (%) 60 - 65 70 - 80 80 - 85 85 - 95	Class. EUROVENT 4/5 EU 1 EU 2 EU 3 EU 4
FILTRES INTERMÉDIAIRES Chambres pour ordinateurs, conditionnement de l'air, cabines de peinture, industrie chimique et mécanique de précision	F 5 F 6 F 7 F 8 F 9	† EFFIC. COLOR. (%) 50 - 55 60 - 65 80 - 85 90 - 95 > 95	EU 5 EU 6 EU 7 EU 8 EU 9
FILTRES ABSOLUS HEPA (High Efficiency Particulate Arrestation) et ULPA (Ultra-Low Penetration Air) Salles blanches, chambres stériles pour hôpitaux et laboratoires pharmaceutiques, industries électroniques et nucléaires	Class. EN 1822 H 10 H 11 H 12 H 13 H 14 U 15 U 16 U 17	‡ EFFIC. SUR PART. Dia. 0,3 µm (%)* > 95 > 98 > 99,99 > 99,997 > 99,999 *EFFIC. SUR PART. Dia. 0,12 µm (%) >99,9995 >99,99995 >99,999995	Class. EUROVENT 4/4 EU 10 EU 11 EU 12 EU 13 EU 14

Tableau 2 Tableau récapitulatif des différentes classifications utilisées pour les filtres mécaniques. Chaque classification est basée sur la performance du filtre, mesurée à l'aide de plusieurs tests d'efficacité.

† Efficacité du filtre selon : ANSI/ASHRAE 52.1-1992 «Gravimetric and Dust-Spot Procedures for Testing Air-Cleaning Devices Used in General Ventilation for Removing Particulate Matter»

‡ Efficacité du filtre basée sur l'abattement des particules de diamètre supérieur à 3µm.

* Efficacité du filtre basée sur l'abattement des particules de diamètre supérieur à 0,12µm.

3.3 Filtres à air électrostatiques

Il existe trois sortes de filtres mettant à profit un champ électrostatique pour attirer les particules sur une surface de collecte. Une première méthode – la plus ancienne – est la précipitation électrostatique, très utilisée pour nettoyer les effluents gazeux industriels. Les précipitateurs électrostatiques nécessitent une source d'énergie externe, afin de créer le champ électrostatique. Il en existe différentes sortes, mais tous fonctionnent selon le même principe : l'air entrant est ionisé, ce qui permet de collecter en sortie les particules en tirant profit de leur charge électrique. Ils doivent être régulièrement nettoyés pour conserver leur efficacité. Les précipitateurs ont une perte de charge extrêmement faible, mais une efficacité également basse, notamment pour les particules submicroniques.

La deuxième sorte de filtres – plus récente – utilise une méthode consistant à ioniser l'air entrant, puis à le faire passer à travers un filtre mécanique utilisé comme diélectrique et placé entre deux électrodes métalliques (l'une portée à un haut voltage et l'autre mise à la terre). Ce type de filtre a une efficacité accrue pour les particules submicroniques. Cette méthode est souvent désignée par son acronyme anglais EEF (Enhanced Electrostatic Filtration, Filtration Électrostatique Améliorée). Typiquement, ces filtres ont une efficacité supérieure d'un - voire deux - ordres de grandeur par rapport aux filtres mécaniques.

Le troisième type de filtres utilise des fibres fabriquées à partir de matériaux polymères présentant une polarisation quasi-permanente, appelés électrets. Ces fibres, avec le passage de l'air, présentent une charge triboélectrique, et attirent ainsi les particules. Le produit le plus connu, Filtrete™, est commercialisé par la compagnie 3M. De tels filtres peuvent avoir une excellente efficacité lorsqu'ils sont propres, mais voient leur efficacité chuter au cours de leur cycle de vie. Ils perdent leur charge électrostatique avec le temps, car les particules capturées sur leur surface occupent les sites chargés, neutralisant ainsi la charge électrostatique. Il faut donc les nettoyer souvent : certains d'entre eux sont mêmes lavables, mais cela atténue leur pouvoir filtrant.

3.4 Filtres Moléculaires (séparation par adsorption)

Le contrôle des molécules en suspension constitue un défi particulièrement ardu en comparaison avec la filtration des particules : elles sont généralement mille à dix mille fois plus petites que les particules les plus fines et leur nombre est un à dix milliards de fois plus élevé que celui des particules. Les molécules en suspension ne peuvent pas être retenues par les filtres à particules. A la place, on utilisera des processus d'adsorption mettant en œuvre du charbon actif, de l'alumine activée ou des résines échangeuses d'ions. En effet, ces procédés d'adsorption permettent d'éliminer dans une phase gazeuse un grand nombre de molécules polluantes, comme les COV, les molécules odorantes ou encore les dioxines et les furanes. Pour que l'adsorption puisse avoir lieu, l'air pollué doit entrer en contact avec la surface du média et le mécanisme qui permet ce contact est la diffusion.

Après contact, deux processus d'adsorption sont possibles : la physisorption et la chimisorption. La physisorption est un procédé réversible qui intervient lorsqu'une molécule entre en contact avec la surface du média et y adhère par force mécanique. Un apport d'énergie, comme la chaleur, peut faire que les molécules se détachent de la surface des médias. De cette façon, les médias peuvent être régénérés et réutilisés. Au contraire, la chimisorption est un procédé irréversible. C'est une réaction chimique entre la surface du média et la molécule lorsqu'elles entrent en contact. Pour permettre la réaction chimique, des traitements de surface spécifiques sont utilisés selon le type de molécules à filtrer. Les filtres utilisant la physisorption sont efficaces sur une gamme relativement large de molécules, et peuvent être régénérés après saturation. Cependant, leur performance est médiocre pour certaines molécules organiques plus petites comme les formaldéhydes. Les systèmes utilisant la chimisorption, par exemple à l'aide de permanganate de Potassium (KMnO_4), sont quand à eux très efficaces pour supprimer les aldéhydes, mais ont une durée de vie limitée et ne peuvent être régénérés.

3.5 Les limites de la filtration de l'air

Les filtres jouent un rôle important pour améliorer la QAI, mais ils sont limités par leur forte perte de charge, leur saturation, et le fait qu'ils peuvent servir de support pour la croissance – et par conséquent le relargage – de contaminants biologiques. De plus, lorsqu'un filtre mécanique est saturé, il a tendance à se boucher, ce qui augmente la pression en amont et par conséquent la perte de charge. Cette surpression peut aller jusqu'à faire éclater le filtre, ou simplement limiter le flux d'air qui le traverse. Lorsque tous les sites d'adsorption d'un filtre moléculaire sont occupés, ce dernier ne peut plus supprimer les polluants et doit être régénéré ou remplacé. Dans les deux types de filtres, les contaminants biologiques capturés peuvent proliférer sur les surfaces ou dans les pores du média utilisé ^(7,8), et, s'ils ne sont pas remplacés à temps, devenir une source de contamination biologique (cf. figure 2). Des recherches ont été faites dans le but de traiter les fibres du filtre avec des biocides, mais cette approche ne peut fonctionner que lorsque les surfaces des fibres sont propres : une fois recouvertes d'une pellicule de poussière, le contact des matières biologiques avec le biocide n'est plus possible, et la croissance de colonies n'est plus inhibée.



Figure 2. Photographie de moisissures qui se sont développées sur un filtre mécanique installé dans une centrale de traitement de l'air. Noter que les colonies fongiques prolifèrent à la surface du filtre et le long des fentes du cadre supportant le filtre.

4. Purification de l'air sans filtres

4.1. Ioniseurs

La purification d'air par ioniseur consiste à générer des ions négatifs qui amalgament les particules en suspension. En se chargeant, la poussière, les pollens, et les poils d'animaux tombent au sol ou se fixent au mobilier. Comme les particules ne sont pas éliminées, elles peuvent être ré-entraînées dans l'air ambiant ou servir de source de contamination de surface. L'ioniseur fait précipiter mais ne détruit pas les particules, et ne traite pas les COV. Il ne traite pas non plus les pollutions chimiques de type industriel et ménager, ni les bactéries et virus dans l'air. De plus, les ioniseurs produisent de l'ozone, irritant notoire. Enfin, les effets de hautes concentrations d'ions sur la santé humaine sont encore inconnus.

4.2. Irradiation Germicide Ultraviolet (IGUV)

L'irradiation aux rayons ultraviolets est une technique destinée à réduire la quantité et la pathogénicité de polluants biologiques aéroportés. Elle est aussi appelée Irradiation Germicide Ultraviolet (IGUV). De longueur d'onde 254 nm, elle peut inactiver les bactéries en induisant la formation de dimères de thymine dans leur ADN. Ceci inhibe la capacité de la bactérie à se répliquer, et c'est une façon efficace de stériliser les surfaces. Cette technique a également été utilisée pour tenter de stériliser l'air. Cependant, contrairement aux traitements de surface pour lesquels les temps d'exposition sont relativement longs, les débits d'air usuels pour le traitement de l'air sont trop élevés pour que la dose d'irradiation requise pour être efficace soit atteinte. La solution consistant à placer des lampes UV dans des pièces pour une irradiation statique n'est pas envisageable, car le danger lié à l'exposition humaine limite grandement la zone d'irradiation.

On peut citer d'autres tentatives pour développer l'IGUV, par exemple en plaçant des lampes UV en amont d'un filtre mécanique afin d'irradier sa surface de collecte. En principe, le filtre capture de la matière biologique depuis le flux d'air, laissant le temps à cette matière de recevoir une dose létale d'UV. Des tests en laboratoire destinés à établir la preuve de faisabilité ont été réalisés en plaçant des bactéries sur un filtre neuf puis en l'exposant à une IGUV⁽⁹⁾. Cependant, les zones d'ombre, non atteintes par les UV, et la formation continue d'une pellicule de poussière par dessus les bactéries ainsi que sur la lampe UV, empêchent la lumière d'irradier les bactéries de façon efficace (cf. figure 2) et par conséquent rend cette méthode inapplicable à des systèmes pratiques de filtration de l'air. Ajoutons à cela que le caractère biocide des UV décroît avec l'âge de la lampe, et dépend de l'humidité relative (réduction significative au-delà de 50%HR⁽¹⁰⁾).

4.3. Oxydation Photocatalytique (OPC)

L'oxydation photocatalytique est un procédé au cours duquel des photons irradient la surface d'un catalyseur, fournissant l'énergie suffisante pour initier l'oxydation de matière organique qui est également adsorbée par la surface. Le principe de base est bien connu et établi, avec une multitude d'oxydes métalliques identifiés comme catalyseurs actifs, comme le dioxyde de titane TiO₂. Il est souvent affirmé, à tort, que la réaction d'oxydoréduction permet de supprimer les COV, cette affirmation étant accompagnée de mesures de niveaux de COV ciblés dans des environnements clos. Cependant, au mieux, seule une oxydation partielle se produit, et avec une efficacité limitée si l'on ne considère qu'un seul passage. Cela peut transformer des COV inoffensifs en composés plus petits mais dangereux, comme l'acétaldéhyde ou le formaldéhyde, dont de fortes augmentations de concentration sont observées⁽¹¹⁾. Un marketing intelligent tente de détourner l'attention du consommateur de ces dangereux effets secondaires, études de laboratoire à l'appui, montrant qu'au cours du temps, tous les composés sont retraités en continu et de plus en plus oxydés, pour finalement se débarrasser de tous les COV. Cet argument n'est pas pertinent, voire trompeur, puisque dans un cas réel d'utilisation, l'air n'est pas traité dans une pièce fermée à l'atmosphère stationnaire, et qu'il existe un apport continu de nouveaux COV (meubles de la pièce, tapis, papier peint, occupants), qui, à cause de leur oxydation partielle, vont mener à des niveaux stationnaires de produits secondaires dangereux. Afin de corriger cela, les futurs systèmes devront démontrer une plus grande efficacité d'oxydation en un seul passage afin de réduire effectivement les niveaux de COV et de prévenir la formation de COV secondaires.

Ces dispositifs sont couramment présentés par leurs fabricants comme supérieurs aux filtres à charbons actifs, à cause de la durée de vie limitée de ces derniers. Cependant, les dispositifs à OPC sont également sujets aux effets du vieillissement. Tout d'abord, les poussières déposées (aussi bien organiques qu'inorganiques) sur les surfaces catalytiques entraînent leur encrassement et inhibent complètement le système au bout d'un certain temps. Ensuite, ce même dépôt de poussière pose problème aux lampes UV et empêche une irradiation correcte des catalyseurs. Enfin, l'efficacité de la lampe décroît au cours du temps, et avec elle l'efficacité du processus tout entier. Par conséquent, bien que les dispositifs de traitements de l'air par OPC soient actuellement l'objet de beaucoup de promotions commerciales, leur supériorité face des technologies traditionnelles lors d'une utilisation dans le cadre de systèmes réels, reste encore à établir – contrairement à leurs effets secondaires négatifs qui sont, eux, formellement établis.

4.4. Plasmas non-thermiques

Un plasma n'est rien d'autre qu'une phase gazeuse contenant de hautes concentrations d'ions, n'obéissant donc pas aux lois des gaz standard. C'est pour cette raison qu'il est considéré comme un quatrième état de la matière. Un plasma non-thermique (PNT) (quelquefois appelé « plasma froid ») est un cas particulier de plasma : il correspond à un système présentant une grande différence de température entre les espèces atomiques et les électrons dans le plasma. Il existe diverses façons de créer un PNT de façon contrôlée, à l'aide de décharges électriques sous conditions atmosphériques. Cela permet de créer un grand nombre d'ions et d'espèces chimiques extrêmement réactives, pouvant provoquer des réactions physiques et/ou chimiques permettant la transformation à température ambiante de particules polluantes aéroportées. Par exemple, l'oxydation de matière organique en phase gazeuse peut être accomplie par des radicaux libres de l'oxygène, pouvant convertir les COV et détruire la membrane cellulaire des cellules biologiques. En plus de cela, les ions adsorbés dans les membranes cellulaires peuvent provoquer des dommages physiques et mener à l'inactivation de la fonction biologique des cellules. C'est pourquoi les PNT ont émergé comme un outil prometteur pour le traitement à la fois des COV et des contaminants biologiques aéroportés. Cependant, la commercialisation de cette technologie est limitée par la haute énergie requise et les sous-produits moléculaires produits dans le plasma (comme l'ozone, les oxydes azotés...) qui peuvent être dangereux s'ils sont libérés dans l'environnement. En outre, les PNT, comme les systèmes à OPC, ne suppriment pas la matière particulaire.

5. Technologies hybrides

La combinaison synergique de plusieurs techniques peut permettre de surmonter leurs limitations intrinsèques. On parle alors de technologies hybrides, et cette approche est de plus en plus employée, depuis ces dix dernières années.

5.1. Filtrations mécanique et moléculaire combinées

La première technologie hybride, et la plus répandue pour le traitement de l'air, consiste à combiner filtrations mécanique et moléculaire. Un adsorbant moléculaire (charbon actif, KMnO_4 , etc.) est placé en série avec un filtre particulaire. De cette façon, les particules, de même que les COV, peuvent être retirés du flux d'air. L'adsorbant est généralement placé en aval du filtre mécanique, afin que les odeurs et les COV émanant des matières particulaires et biologiques capturées dans le filtre soient supprimés. Comme l'adsorbant est l'étape finale du traitement dans cette configuration, il faut prendre garde à ce que les particules du média d'absorption ne soient pas relâchées dans le flux d'air. Afin de l'éviter, le média doit être fermement scellé dans un matériau de support, ou alors intégré au média du filtre, ce qui permet de n'avoir qu'un seul élément dans le filtre ; mais ce n'est pas toujours possible à cause de la grande différence de durée de vie entre les médias de filtration mécanique et moléculaire.

Les systèmes combinant filtrations mécanique et moléculaire peuvent faire preuve d'une bonne efficacité pour filtrer particules et COV, mais ils ne peuvent en aucun cas empêcher le développement de matière biologique pouvant potentiellement être relâchée dans l'air.

5.2. Filtres avec photo catalyseurs et IGUV

Combiner la filtration mécanique avec l'IGUV et/ou l'OPC constitue une tentative plus récente d'utiliser un système hybride pour résoudre le problème de traitement de multiples catégories de polluants aéroportés. De tels systèmes sont conçus pour capturer la matière par filtration mécanique puis irradier la surface du média de filtration avec des UV germicides. Lorsque l'OPC est utilisée, le média filtrant est simplement recouvert avec un catalyseur approprié. Ce principe est alléchant à première vue ; néanmoins, à cause du parcours rectiligne des rayons lumineux, ces derniers ne peuvent pas traiter la totalité de la surface puisque certaines parties sont occultées : ceci limite grandement l'utilité pratique et les performances à long-terme. Les filtres mécaniques à haute efficacité sont plissés afin de diminuer leur perte de charge, et par conséquent la lumière ne peut atteindre les crevasses dans certains plis. Qui plus est, l'amoncellement de matières (organiques et inorganiques) sur la surface du filtre empêche la lumière d'atteindre le catalyseur et court-circuite peu à peu le mécanisme de l'OPC. Placer les éléments IGUV/OPC en aval du filtre ne résout pas ce problème, car le temps de résidence des polluants en aval du flux est trop court pour recevoir des doses suffisantes d'IGUV, et le support catalytique ne fournit pas ou peu d'efficacité de capture, en tout cas pas suffisamment pour empêcher le relargage d'espèces biologiques ayant peuplé le filtre. En outre, des problèmes de sécurité intrinsèque, dus à une oxydation partielle et une production résultante de sous-produits dangereux de la réaction d'OPC sont également reprochés à ces systèmes.

5.3. HEPA-MD

Une des technologies hybrides apparue le plus récemment est appelée HEPA-MD, et a été introduite en France par la société Airinspace. Cette technologie consiste en un système de réacteur à trois étages, conçu pour fournir une filtration « HEPA » (High Efficiency Particle Arrestation, c'est-à-dire assurant un abattage de 99,97% de toutes les particules d'une taille supérieure ou égale à 0,3 μ m, en un seul passage), ainsi qu'une décontamination biologique de l'air. Ce système réalise tout cela en combinant un PNT en amont, couplé avec une unité de filtration améliorée électriquement (FAE), suivi d'un post-filtre catalytique afin de transformer tout sous-produit chimique indésirable. Les polluants sont tout d'abord traités par le PNT en étant partiellement oxydés et ionisés. Leur charge permet alors une collection extrêmement efficace par FAE. Une fois capturées, les espèces chimiques produites par le plasma diffusent à travers le média de collecte et oxydent complètement toute matière organique restante. Contrairement aux traitements par rayonnement lumineux, ce mécanisme en phase gazeuse est capable d'atteindre tout le volume du filtre. L'étage final du filtre est conçu pour adsorber et convertir catalytiquement tout sous-produit gazeux en utilisant un mélange original de catalyseurs efficace à température ambiante.

Jusqu'à aujourd'hui, la technologie HEPA-MD a exclusivement été utilisée pour des applications en milieu hospitalier, en particulier pour protéger des patients immuno-déprimés. Cela signifie que ce dispositif a été soumis, comme tout matériel médical, à une évaluation rigoureuse. Il est de plus approuvé par la FDA (Food and Drug Administration, l'administration américaine des denrées alimentaires et des médicaments), ce qui a conduit en retour à des systèmes relativement coûteux. Des développements sont en cours pour proposer des systèmes plus abordables et de ce fait utilisables pour d'autres applications, comme les transports publics ou le transport aérien.

Bien que la technologie HEPA-MD soit optimisée pour un abattage particulaire et une décontamination biologique associée, des recherches suivent leur cours afin d'y adjoindre une réduction efficace des COV, par un choix judicieux de combinaisons plasma-catalyseur. De nombreux laboratoires de recherches publics ont récemment fait des progrès sensibles dans ce domaine (12,13).

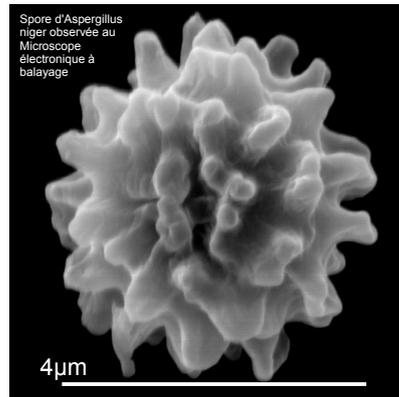
6. Conclusion et perspectives

Traiter les trois types de polluants (particulaires, biologiques et chimiques) pour la QAI à l'aide de systèmes faisant preuve d'une efficacité à long terme, économiquement abordables et facilement applicables à des cas concrets, reste encore un défi. La voie la plus efficace pour le relever semble résider dans le développement de systèmes hybrides associant différentes technologies. Malheureusement, devant ces systèmes assez complexes, l'utilisateur final a du mal à formuler un jugement critique vis-à-vis de ses besoins. Cette situation est d'autant plus préoccupante que beaucoup de déficiences sont occultées par des campagnes de publicité agressives faisant la promotion de systèmes révolutionnaires et peu coûteux. Un exemple récent est le cas de Sharper Image, qui introduisit, il y a peu de temps, un produit appelé « Ionic Breeze » sur le marché américain. En plus d'être inefficace, ce dispositif relâchait de dangereux sous-produits dans l'environnement et il a été heureusement retiré du marché par les autorités régulatrices. Cet exemple doit alerter le consommateur et lui faire prendre conscience que des promesses alléchantes peuvent cacher de mauvaises surprises.

7. Bibliographie

- [1] **Bergeron V., Metahni A.** «La Qualité de l'air intérieur : une préoccupation croissante», Annales des falsifications, de l'expertise chimique & toxicologique, 971, 32-40 (2009)
- [2] **EN 13779** – Ventilation dans les bâtiments non résidentiels – Exigences de performances pour les systèmes de ventilation et de conditionnement d'air (2007)
- [3] **NF EN779** – Filtres à air de ventilation générale pour l'élimination des particules. Exigences, essais, marquage (2002)
- [4] **NF EN1822** – Filtres à air à très haute efficacité et filtres à air à très faible pénétration (HEPA et ULPA) (1998)
- [5] **Eurovent 4/4** – Méthode d'essai de filtres à l'aérosol de chlorure de sodium par photométrie de flamme (1984)
- [6] **Eurovent 4/5** – Méthode d'essai de filtres à air utilisés en ventilation générale (1992)
- [7] **Simmons R.B., Crow S.A.**, « Fungal colonization of air filters for use in heating, ventilating, and air conditioning (HVAC) systems”, J. Ind. Microbiol. 14(1), 41-45 (1995)
- [8] **Bancroft K., Maloney S.W., McElhaney J., Suffet I.H., and Pipes W.O.** “Assessment of bacterial growth and total organic carbon removal on granular activated carbon contactors”, Appl. Environ. Microbiol., 46(3), 683-688, (1983)
- [9] **Tuckerman M.A., Knuth R.P., Carey W.F.** “Air Treatment System”, US Patent 5616172 (04/01/1997).
- [10] **Riley R.L., Kaufman J.E.**, “Effect of relative humidity on the inactivation of airborne *Serratia marcescens* by ultraviolet radiation”, Appl. Microbiol., 23(6), 1113-11120 (1972)
- [11] **Hodgson A.T., Sullivan D.P., Fisk W.J.** “ Evaluation of ultra-violet Photocatalytic Oxidation (UVPCO) for Indoor Air Applications: Conversion of Volatile Organic Compounds at Low Part-per-Billion Concentrations”, Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-58936 Sept. 30, 2005.
- [12] **Subrahmanvam, Ch., Renken, A., Kiwi-Minsker**, “Novel catalytic non-thermal plasma reactor for the abatement of VOC's.”, Chemical Eng. Journal, Vol. 34, N°163, 78-83 (2007).
- [13] **Subrahmanvam, Ch., Renken, A., Kiwi-Minsker**, Catalytic abatement of volatile organic compounds assisted by non-thermal plasma: Part II. Optimized catalytic electrode and operating conditions”, Applied Catalysis B: Environmental, Vol. 65, N°162, 157-162 (2006).

Investigations Expérimentales



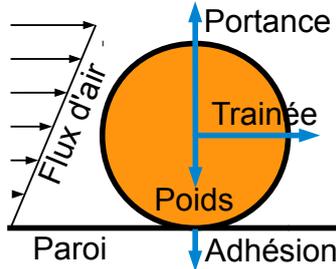
Les infections nosocomiales sont une cause majeure de mortalité chez les grands brûlés. Elles sont dues aux cumuls de facteurs de risques comme la brûlure elle-même, l'immunosuppression qui en résulte, les thérapies agressives et l'hospitalisation prolongée. De plus, l'atmosphère chaude et humide est propice aux croissances fongiques ainsi qu'aux phénomènes aérodynamiques favorisant le transport aéroporté de contaminants.

Les spores fongiques aéroportées peuvent être inhalées par les patients et également se déposer sur des surfaces inertes. Une fois déposées, peuvent-elles être remises en suspension par un courant d'air ? Nous avons étudié la question par deux approches complémentaires, expérimentale et numérique. Les résultats obtenus montrent qu'une fois déposées, les spores fongiques ne sont pas réentraînées par de faibles courants d'air (~1m/s). En revanche, le phénomène de déposition et de réenivol peut être observé si les vitesses mises en jeu sont plus importantes, comme c'est le cas par exemple sur les pales des ventilateurs tels ceux que l'on trouve sur des appareils d'utilisation courante : ordinateurs portables, appareils de monitoring, dispositifs d'échantillonnage de l'air, etc. Cette observation met en évidence le risque de contamination croisée que représente l'utilisation de tels dispositifs.

Ci-contre, l'expérience de réenivol de microparticules mise en place au sein du laboratoire de physique de l'ENS de Lyon. Les particules dont soit des billes de verre d'une taille allant du micromètre au millimètre, soit des spores d'Aspergillus niger. Elles sont déposées sur différents substrats possédant des caractéristiques physiques différentes (verre, papier, mica atomiquement lisse) puis soumises à un flux d'air tangentiel.

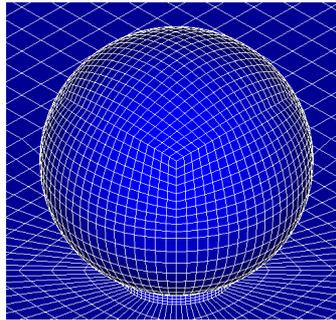


Simulations Numériques



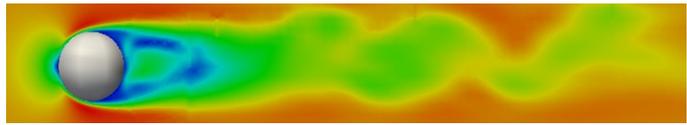
La simulation numérique permet, à l'aide de Code_Saturne, le code de calcul open source développé par EDF R&D, de compléter les études expérimentales par des études numériques. Nous utilisons pour cela des géométries simplifiées sur lesquelles nous résolvons les équations de la mécanique des fluides. Ces études numériques sont validées en les comparant avec les résultats expérimentaux. Elles permettent alors d'avoir accès à des informations qu'il aurait été difficile voire impossible de mesurer expérimentalement.

Développée depuis le début des années 30, la Mécanique des Fluides Numérique est une méthode employée intensivement dans le milieu de la recherche et de l'ingénierie. Elle a permis la validation du concept du "presque tout dans la chambre" imaginé par le Professeur Mimoun pour le nouveau Centre de Brûlés de l'Hôpital Saint Louis



Ci-contre, un exemple du type de maillage utilisé pour les simulations d'écoulements autour de particules. Le principe de la Mécanique des Fluides Numérique est de découper la géométrie considérée en petits éléments dans lesquels les équations sont résolues. Plus les éléments sont fins, plus les calculs sont précis, et plus ils sont longs. Une des difficultés consiste donc à trouver le juste compromis entre rapidité et précision.

Ci-dessous, un exemple de simulation de l'écoulement de l'air autour d'une sphère. Ce type de simulation permet de calculer les forces qui s'exercent sur cette sphère, et par analogie sur une spore fongique, lorsqu'elle est soumise à un écoulement d'air.



Une fois déposées sur une surface, les spores se réenivolent difficilement. Il faut donc décontaminer l'air ainsi que les surfaces de la chambre.

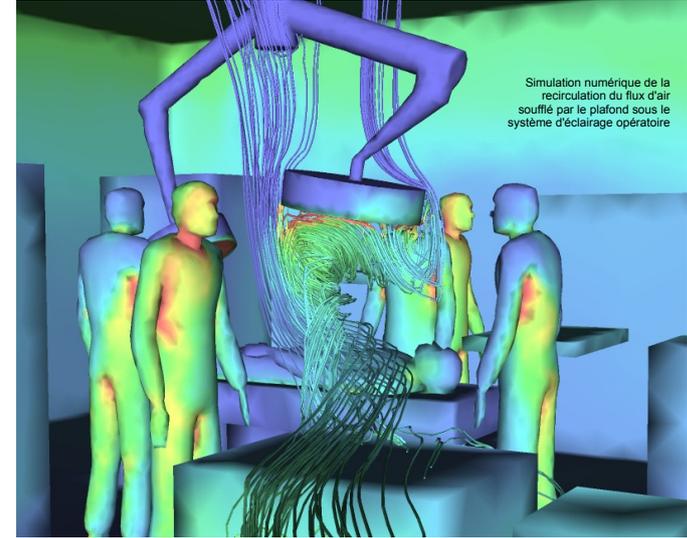


Ci-contre, la chambre expérimentale de l'Hôpital Saint Louis et son plafond soufflant à basse vitesse équipé d'un dispositif de décontamination de l'air. Cette chambre pilote a permis la réalisation de nombreuses expériences comme l'étude de la protection du patient par le flux d'air soufflé par le plafond, la sédimentation de spores fongiques, la caractérisation de dispositifs d'échantillonnage de l'air ou encore l'efficacité de traitements fongicides. C'est elle qui a également permis la mise en évidence des phénomènes de bascule thermo-hydraulique et du risque d'accumulation haute de contaminants.

Le profil de vitesse choisi possède une sur-vitesse au centre et est atténué par des jupes pour la meilleure protection possible du patient et de l'équipe. Les mannequins, chauffés par des résistances électriques, simulent la présence de l'équipe médicale.

Ci-contre, le type de ventilateur employé pour mettre en évidence l'existence d'un phénomène de déposition et de réenivol de spores d'Aspergillus niger. Placé dans une atmosphère contaminée, le ventilateur capte les spores, qui adhèrent à ses pales. Utilisé dans une atmosphère saine, le ventilateur contamine alors cette dernière, car les spores se détachent des pales.

Le risque mis en évidence ici est critique car de nombreux appareils utilisés dans les zones à atmosphère contrôlée comportent ce type de ventilateurs, et sont utilisés successivement dans différentes chambres. Le risque de contamination entre les patients est par conséquent accru. Y remédier serait pourtant simple, en plaçant adéquatement des filtres sur les appareils en question.



La Mécanique des Fluides Numériques donne aux méthodes de prophylaxie un éclairage nouveau, comme l'illustre la récente collaboration entre EDF R&D et le nouveau Centre de Brûlés de l'Hôpital Saint-Louis. Une étude complète en modélisation numérique, mise en place après des expérimentations préalables au laboratoire de Physique de l'ENS de Lyon, puis validée par une campagne de mesures effectuée dans la chambre expérimentale pilote de l'Hôpital Saint-Louis, et réalisée à l'aide de Code_Saturne, nous permet de mieux comprendre et d'anticiper les mécanismes physiques responsables de l'adhésion sur des surfaces ainsi que du réenivol des spores fongiques, et par conséquent d'établir des protocoles plus efficaces afin d'en limiter la propagation en milieu sensible.

Les ventilateurs (biocollecteurs, ordinateurs, monitoring, etc.) sont un vecteur de contamination croisée.

Les progrès de la médecine ont rendu possible une amélioration considérable du traitement des grands brûlés, avec pour conséquence l'augmentation du nombre de patients immunocompromis en service de réanimation. Ces patients sont extrêmement vulnérables à la contamination fongique de leurs tissus respiratoires par la déposition de spores aéroportées, comme celles de l'Aspergillus.

L'Aspergillus est une espèce fongique omniprésente et responsable de nombreuses affections cutanées et respiratoires. C'est une des espèces les plus rencontrées sur les surfaces des blocs opératoires. La mortalité d'une aspergillose pulmonaire invasive non traitée est proche de 100%. Malgré les récents progrès diagnostics et thérapeutiques, les protocoles de chimioprévention n'ont pas montré d'efficacité significative. Le contrôle du risque environnemental, par la décontamination de l'air et des surfaces, reste la seule stratégie efficace.

L'approche combinée expérimentale et numérique que nous avons adoptée permet de mettre en lumière certains vecteurs de contamination inconnus auparavant, comme les ventilateurs présents dans de nombreux appareils électroniques. Il est donc vital que l'outil physique soit rapidement intégré aux moyens mis à la disposition des médecins lors de la conception des centres de prise en charge des brûlés ainsi que de la mise en place des protocoles prophylactiques associés.

PUBLICATIONS

- Bergeron V., Metahni A. *La qualité de l'air intérieur : une préoccupation croissante* Annales des falsifications, de l'expertise chimique et toxicologique, 971, 32-40, 2009
- Bergeron V., Metahni A. *Quelles technologies pour améliorer la qualité de l'air intérieur ?* Annales des falsifications, de l'expertise chimique et toxicologique, 972, 50-58, 2010
- Beauchène C. et al., *Accumulation and transport of microbial-size particles in a pressure protected intensive care room: CFD modeling and experimental evidence*, BioMed Central 2011

CONGRÈS

- Mimoun M., Beauchène C., *Apport de la simulation numérique dans la maîtrise de la contamination aéroportée - Application aux centres de grands brûlés*, 29e congrès de la SFETB, 2009
- Beauchène C. et al., *Airflow modeling by computational fluid dynamics for optimizing control for airborne microbial contamination in an intensive care room for severely burned patients*, European congress of clinical microbiology and infectious diseases, 2010

Contact : amine.metani@gmx.com

APPORT DE LA SIMULATION NUMÉRIQUE À LA MAÎTRISE
DE L'AÉROCONTAMINATION CHEZ LE GRAND BRÛLÉ
Étude de la Déposition et du Ré-envol de Spores d'*Aspergillus*

A. Metani (1,2)

F. Derouin (3)

C. Beauchêne (2)

V. Bergeron (1)

M. Chaouat (4)

S. Benhamadouche (2)

M. Mimoun (4)

(1) : Laboratoire de Physique de l'École Normale Supérieure de Lyon

(2) : EDF Recherche et Développement, Chatou

(3) : Laboratoire de Parasitologie-Mycologie de l'Hôpital Saint Louis, EA 3520,
Université Paris Diderot, Paris

(4) : Centre de Brûlés de l'Hôpital Saint Louis, Paris

Auteur principal et correspondant : Amine Metani

amine.metani@gmx.com

EDF R&D

6 quai Watier

78401 Chatou Cedex

RÉSUMÉ :

L'infection est la principale cause de décès chez les grands brûlés. La gravité de leurs blessures et leur système immunitaire compromis en font des patients extrêmement vulnérables. Afin de contrôler le risque d'infection, la priorité maximale est d'empêcher tout contact avec des agents infectieux et d'éliminer ceux qui se développent. Du fait de l'important degré d'exposition du grand brûlé, le facteur environnemental joue un rôle important lors de son infection nosocomiale. Omniprésentes en milieu hospitalier, et à l'origine de nombreuses pathologies invasives, les spores d'*Aspergillus* font l'objet d'une attention particulière. Afin de contrôler l'environnement et de minimiser le risque d'infection, nous avons besoin de comprendre en profondeur comment les spores sont transportées dans l'air, et comment elles se déposent sur des surfaces et s'en ré-évoient. Pour y répondre, une collaboration a été initiée en 2003 entre EDF Recherche et Développement (R&D) et le Centre de Brûlés de l'Hôpital Saint Louis à Paris, dans le but de mettre en pratique le concept du « Presque tout » dans la chambre, qui fait de la salle d'opération, de réanimation et de la chambre une seule et même pièce.

Le travail effectué repose sur la combinaison de mesures expérimentales et de simulations numériques. Les expérimentations sont menées au sein du Laboratoire de Physique de l'École Normale Supérieure de Lyon (LPENSL) et à l'Hôpital Saint Louis à Paris ; les simulations numériques épaulant ces expérimentations et permettant la conception des nouvelles chambres sont réalisées avec des outils numériques développés par EDF R&D. Ce travail a d'ores et déjà permis d'identifier, pour la première fois, des sources de contamination comme les ventilateurs de refroidissements d'appareils électroniques, et de

montrer comment la conception ou l'aménagement des chambres peuvent augmenter ou au contraire limiter le risque de contamination aéroportée.

Ainsi, en rendant possible une meilleure compréhension des phénomènes physiques complexes responsables de la déposition des spores fongiques sur des surfaces, de leur ré-entraînement dans l'air de la pièce, ces études permettent d'établir des protocoles contrôlant et limitant leur propagation dans les zones sensibles de façon plus efficace.

Mots clés : *Aspergillus* ; Déposition / ré-envol ; Expérimentation ; Simulation numérique

ABSTRACT :

Infections are the primary causes of death in burn patients. These patients are particularly vulnerable due to their immune compromised condition and severity of wounds. Thus preventing contact with infectious agents and eliminating those that do invade is of utmost priority for infection control personnel in this field. Moreover, environmental factors play an important role in nosocomial infections in burn patients due to their high degree of exposure. Of particular concern, *Aspergillus* fungal spores, which are ubiquitous in the hospital environment, are known to cause a wide range of invasive diseases. Therefore, in order to control the environment and minimize the risk of infection, an in-depth understanding of the transport of the spores through the air, and their deposition/re-entrainment onto and from surfaces is needed. Collaboration between EDF Research & Development (EDF R&D) and the Burn Center at Saint Louis Hospital was started in 2003 to address this need. The essence of the effort is to implement the concept of a global approach that integrates the patient's room, the operating theater, and the intensive-care room.

The research being conducted relies on combining experimental measurements with Computational Fluid Dynamics. Experimental investigations are carried out in the Physics Department at the École Normale Supérieure de Lyon, Lyon, France and at Saint-Louis Hospital in Paris, France. Numerical simulations to support these investigations and develop new room design features are performed with computational methods developed at EDF R&D. This work already enabled the identification of contamination sources like electronic devices' fans, and should allow for a better understanding of the physical phenomenon responsible for fungal spore deposition on surfaces, and re-entrainment into the

room air, and consequently to establish more efficient protocols to control and limit their propagation in sensitive areas.

Keywords : *Aspergillus* ; Deposition & re-entrainment ; Experimentation ; Computational Fluid Dynamics

1 – INTRODUCTION

Dans les mécanismes de transmission des infections nosocomiales, il est habituel d'opposer contamination manuportée et aéroportée, cette dernière étant la plus difficile à maîtriser [5]. La pertinence d'une telle distinction reste cependant à démontrer sachant qu'en réalité, une contamination n'est pas toujours purement aéroportée ou manuportée, mais peut être croisée : un contaminant présent sur une surface peut être remis en suspension, et un contaminant aéroporté peut se déposer sur une surface et être de nouveau manuporté.

L'efficacité des systèmes de traitement de l'air est indéniable et a permis de nets progrès dans la prévention des infections aérotransmises. Cependant les systèmes sont rarement le fruit d'études rhéologiques approfondies. Pourtant, la compréhension des phénomènes physiques complexes entrant en jeu lors de la déposition et du ré-envol de contaminants aéroportés permettrait de mieux dimensionner et d'adapter les dispositifs de protection, voire de proposer des moyens simples de prévention. D'autant que l'intuition est systématiquement trompeuse lorsqu'il s'agit d'étudier des mouvements d'air soumis à des interactions physiques extrêmement complexes et complètement invisibles. À ce titre, la Mécanique des Fluides est un outil rigoureux pouvant aider à cette compréhension en rendant possible la visualisation de ces phénomènes. C'est une discipline de la Physique étudiée depuis deux millénaires et dont les équations sont formalisées depuis trois cents ans.

La Simulation Numérique en Mécanique des Fluides, ou CFD pour « Computational Fluid Dynamics », est une méthode développée depuis le début des années 30, qui permet de résoudre numériquement des équations dont la résolution analytique est impossible. Elle est aujourd'hui utilisée intensivement

dans les milieux de la recherche, de l'ingénierie et de l'industrie. Elle a participé à la validation du concept du « presque tout dans la chambre » imaginé par le professeur Mimoun pour le nouveau Centre de Brûlés de l'Hôpital Saint Louis et peut trouver de nombreuses autres applications en milieu hospitalier [1].

Notre démarche de recherche s'est appuyée conjointement sur des études expérimentales et sur des simulations numériques, les deux approches étant interactives et complémentaires. Les expérimentations ont permis de déduire des lois de comportement qui sont alors numérisées ; d'autre part, les résultats majeurs prédits par la modélisation numérique ont été systématiquement comparés aux résultats expérimentaux. Ainsi validées, il arrive que les simulations numériques nous donnent alors accès à d'autres informations difficiles voire impossibles à envisager à priori sur un plan expérimental.

Notre objectif était d'être capables d'apporter des réponses à des questions très concrètes :

- Une fois déposée sur une surface, une spore peut-elle être remise en suspension par un mouvement d'air ?
- Certaines surfaces ou certains contextes sont-ils plus favorables que d'autres à l'adhésion ou au ré-envol de spores ?

2 – MATÉRIELS ET MÉTHODES

Notre démarche de recherche s'est appuyée conjointement sur des études expérimentales et sur des simulations numériques, les deux approches étant interactives et complémentaires. Les expérimentations ont permis de déduire des lois de comportement qui ont été numérisées, tandis que les résultats majeurs prédits par la modélisation numérique ont été systématiquement comparés aux résultats expérimentaux. Ainsi validées, il arrive que les simulations numériques nous donnent alors accès à d'autres informations difficiles voire impossibles à envisager *à priori* sur un plan expérimental.

Dans ce cadre, nous avons abordé l'étude des mécanismes de dépôt / ré-
envol de spores fongiques, en émettant l'hypothèse que les données acquises pourront être extrapolées, ou servir de base à l'étude de l'aérotransmission d'autres agents pathogènes.

Le choix d'*Aspergillus* a été guidé par le fait que ce champignon filamentueux est responsable d'infections graves chez les malades immunodéprimés et les brûlés [4, 6-8, 10, 11]. Pour des raisons de sécurité, nous avons travaillé avec *Aspergillus niger* (cf figure 1) et non *Aspergillus fumigatus* qui est réputé être plus virulent. En effet, leurs spores ont une géométrie similaire. Le champ d'étude étant extrêmement vaste, nous nous sommes focalisés sur un problème très précis : comprendre comment une conidie mise en mouvement par l'air va interagir avec les surfaces environnantes, et comment elle va interagir avec d'autres conidies.

Les travaux expérimentaux ont été menés à la fois au Laboratoire de Physique de l'École Normale Supérieure de Lyon et dans une chambre pilote simulant en taille réelle une chambre de grands brûlés et située à l'Hôpital Saint

Louis (*cf figure 2*). Cette chambre est équipée d'un plafond soufflant à basse vitesse, octogonal et à profil de vitesse convexe, lui-même muni d'un dispositif de décontamination de l'air par plasma. Il a été développé par la société Airinspace, qui commercialise des dispositifs de décontamination de l'air pour le milieu hospitalier. Les expériences menées ont porté sur trois principaux sujets :

- la sédimentation de spores aéroportées
- le ré-envol de spores déposées sur des surfaces
- l'efficacité et la rémanence de traitement fongicides

Pour cela deux bancs d'essais ont été mis au point au LPENSL. Le premier consiste en une cuve en plexiglass d'un volume de 1 m³, dans laquelle nous avons réalisé toutes les expériences nécessitant l'aérosolisation de spores fongiques (*cf figure 3*). Le second est un dispositif permettant d'appliquer un flux d'air tangentiel à des particules déposées sur une surface, et de les observer tangentiellement et perpendiculairement à l'aide de caméras ultra-rapides (*cf figure 4*).

Pour réaliser les infections expérimentales, un nouveau dispositif d'aérosolisation de spores par soufflage a été mis au point [9], venant en complément du nébuliseur Colison, couramment employé dans les études d'aérosolisation de particules inertes ou microbiennes. Bien que ce nébuliseur soit recommandé par la plupart des normes européennes et internationales, il présente l'inconvénient de nécessiter une mise en solution des spores, réputées hydrophobes. Le dispositif dont nous avons réalisé un prototype comporte, dans sa partie centrale, un espace permettant de recevoir un milieu de culture sur lequel on peut ensemercer l'espèce fongique désirée (*cf figures 5 et 6*). Après quelques jours de croissance, jusqu'à la production de spores, on peut aérosoliser des spores

« natives » en insufflant de l'air sous pression. Son inconvénient principal réside dans la difficulté à contrôler la concentration fongique aérosolisée.

Les travaux numériques sont quant à eux menés au sein des laboratoires de Recherche et Développement d'EDF, Chatou, France. Le principe de la Simulation Numérique est de mailler la géométrie considérée, c'est à dire de créer un domaine de calcul représentant la zone à modéliser, composé de petits éléments dans lesquels les équations sont résolues, cellule par cellule (*cf figure 7*). Plus les éléments sont fins, plus les calculs sont précis, mais plus ils sont longs. Une des difficultés consiste donc à trouver le juste compromis entre rapidité et précision. Le domaine de calcul ainsi créé représente un espace virtuel qui reproduit au plus près les phénomènes physiques.

Dans ce cadre, les simulations réalisées se sont attachées à calculer les forces qui s'exercent sur une spore, ici modélisée par une sphère, ou sur des groupes de spores déposées sur une surface et soumises à un écoulement d'air. Ceci afin de déterminer si les spores sont remises en suspension, et le cas échéant, de calculer leur future trajectoire.

3 – RÉSULTATS

3.1 – Évaluation des capacités d'adhésion des spores

Les mesures réalisées sur le banc d'essai du LPENSL montrent que lorsqu'une spore d'*Aspergillus niger* se dépose sur une surface plane, les forces d'adhésion sont tellement intenses en regard de la taille (4µm) et de la masse de la spore que de faibles mouvements d'air, avec des vitesses d'un ordre de grandeur ne dépassant pas le mètre par seconde, ne peuvent pas la remettre en suspension. Ce résultat est à nuancer en fonction de la rugosité des surfaces étudiées, car plus les surfaces sont lisses et moins les spores y adhèrent.

3.2 – Efficacité des traitements fongicides

Nous n'avons pas noté de différence significative d'efficacité entre différents traitements fongicides du commerce que nous avons utilisés (Anios, Vesimin) en fonction de la surface à laquelle ils étaient appliqués (inox, verre, polypropylène, carrelage émaillé). L'efficacité de ces fongicides ne semblent donc pas dépendre de la surface traitée (*voir figure 8*). De plus, aucun matériau ne s'est révélé plus favorable qu'un autre à l'adhésion des spores.

3.3 Étude du phénomène de réenvol

Le phénomène de ré-envol s'observe rarement si les vitesses de l'air mises en jeu ne sont pas importantes. On peut donc supposer peu probable qu'un ré-envol ait lieu depuis des surfaces comme les murs ou les plafonds suite à de simples mouvements d'air provoqués par le passage de personnes. Il peut néanmoins se produire depuis des surfaces soumises à des flux d'air d'une vitesse suffisamment élevée. C'est le cas sur les pales des ventilateurs qui sont employés

pour le refroidissement de nombreux dispositifs électroniques d'utilisation courante : ordinateurs portables, biocollecteurs, appareils de monitoring, etc. (voir figure 9). Ces ventilateurs captent les spores et les relarguent de façon complètement incontrôlée. Nous avons donc mis en évidence un contexte plus favorable à la déposition et au ré-envol simultané de spores.

Le risque mis en évidence ici est critique car de nombreux appareils utilisés dans les zones à atmosphère contrôlée comportent ce type de ventilateurs, et peuvent être utilisés successivement dans différentes chambres pour grands brûlés ou autres zones à risque. Le risque de contamination croisée entre les patients est par conséquent accru. Il est possible d'y remédier en plaçant tout simplement des filtres de façon adéquate sur les appareils en question. Néanmoins, cela imposerait sans doute de redimensionner ces ventilateurs à cause des pertes de charges supplémentaires induites par l'ajout des filtres.

3.4 La « bascule thermo-aéraulique »

La « bascule thermo-aéraulique » est un bon exemple de phénomène aéraulique 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. Le terme « bascule » est employé car tandis qu'un flux d'air passe de la première pièce à la deuxième par la partie haute de la porte, un second flux d'air passe de la seconde pièce à la première par la partie basse. Ce phénomène est en réalité dû à la différence de température entre les deux pièces.

Ce phénomène a été mis en évidence par la modélisation numérique, et a été confirmé ensuite expérimentalement dans la chambre pilote : lors de l'ouverture du sas d'accès à la chambre, des contaminants pouvaient passer du sas

à la chambre.. En outre, il a été mis en évidence qu'au-delà d'un écart de quelques degrés, ce phénomène est proportionnel à la différence de température entre les deux pièces contiguës.

La numérisation des flux nous a également permis de mettre en évidence un risque de recirculation du flux d'air soufflé par le plafond sous les systèmes d'éclairage opératoire (*voir figure 10*) et une recirculation en boucle entre la jupe située autour du plafond soufflant et le plafond de la pièce, qui couplée à un effet thermique, peut générer une accumulation haute des contaminants ; ou encore le fait que le flux d'air issu du plafond soufflant, lorsqu'il est perturbé par une source de chaleur, peut revenir sur le patient au lieu d'être évacué.

Ces résultats ont été acquis par numérisation puis validés expérimentalement en réalisant des aérosols de spores d'*Aspergillus niger* dans la chambre « pilote » de l'Hôpital Saint-Louis.

4 – DISCUSSION

Les études réalisées dans le cadre d'un Programme Hospitalier de Recherche Clinique (PHRC) antérieur à la thèse dont il est question ici ont permis d'une part, de dimensionner les composants novateurs créés par la société AirInSpace pour le plafond soufflant et de comprendre les schémas aérauliques générés par ces derniers afin de maîtriser la qualité de l'air ; d'autre part de valider le concept du « presque tout » dans la chambre qui a conduit à un ensemble architectural équipé de deux sas et d'une chambre/salle de réanimation/salle d'intervention. Ce fut une avancée importante dans la maîtrise des écoulements d'air dans une chambre pour grands brûlés. La poursuite de ces travaux dans le cadre d'une thèse de science et donc d'une approche plus « amont » a permis de mieux comprendre comment les spores fongiques de l'air se déposent et se ré-voient.

Si des spores se déposent sur des surfaces, il est peu probable qu'elles soient ré-entraînées dans l'air à cause du passage d'une personne ou de l'ouverture d'une porte à proximité (sans effet additionnel tel que des mises en vitesse liées par exemple à des différences de température entre les pièces). En conséquence de quoi il apparaît nécessaire de prêter une attention particulière à la décontamination des surfaces en leur appliquant des traitements adéquats, même si le passage à proximité d'une surface potentiellement contaminée n'est pas à redouter.

En outre, les phénomènes aérauliques peuvent aller à l'encontre de l'intuition, comme le montre l'exemple de la bascule thermo-aéraulique. Nous sommes en effet face à un courant d'air qui va d'une pièce en dépression à une pièce en surpression, alors que c'était précisément ce que l'on cherchait à éviter. Cela signifie qu'un contaminant présent dans le sas, qui fait normalement office

de « puits », absorbant tout ce qui provient de l'extérieur comme ce qui sort de la chambre, peut sous certaines conditions s'en échapper.

Cet exemple nous montre que l'approche combinant expérimentations et calculs numériques n'est pas séquentielle : il faut procéder de façon parallèle et de la même façon que certains phénomènes ne peuvent pas aujourd'hui être modélisés, d'autres ne peuvent pas non plus être mesurés, d'où l'intérêt d'une approche où la simulation comme l'expérimentation peuvent revêtir une dimension prédictive. Dans le cas de la bascule thermo-aéraulique, le phénomène a d'abord été mis en évidence par le calcul numérique, avant d'être confirmé par l'expérience dans la chambre pilote de l'hôpital Saint-Louis.

À l'opposé, le phénomène de capture et relargage de spores fongiques par des ventilateurs a été découvert expérimentalement. Mais pour comprendre en profondeur ce qu'il se passe sur les pales des ventilateurs, la simulation numérique est indispensable car il est impossible d'effectuer des mesures de vitesses de l'air au milieu d'un ventilateur en marche. Les expérimentations et les calculs numériques doivent donc être menés simultanément car les découvertes peuvent surgir de l'un comme de l'autre.

5 – CONCLUSION

Les spores fongiques étant par nature aéroportées, et finissant pas se déposer sur une surface, les problèmes de contamination manuportée ou aéroportée peuvent difficilement être découplés. Une grande partie d'entre elles ne se ré-envoleront pas, il est nécessaire de traiter les murs, sols et plafonds à l'aide de produits fongicides dont l'efficacité et la rémanence doivent être précisément quantifiées.

Nous n'avons pas identifié de surfaces plus propices à la déposition et/ou au ré-envol de spores fongiques. En revanche, nous avons clairement identifié un cas de figure où ce phénomène pose un problème majeur. Il s'agit des ventilateurs de refroidissement d'appareils électroniques : ce sont des vecteurs de contamination croisée. Nous avons également identifié numériquement puis reproduit expérimentalement des configurations de chambres de brûlés plus propices à une contamination par voie aérienne. L'exemple de la bascule thermo-aéraulique et celui de la recirculation du flux d'air issu du plafond démontrent l'utilité de la simulation numérique pour évaluer ces risques impossibles à intuire.

6- PERSPECTIVES

La physique, et plus particulièrement la mécanique des fluides, ainsi que les savoir-faire expérimentaux et numériques qui lui sont associés, permettent d'avoir une vision neuve des problématiques complexes et interdisciplinaires propres au milieu hospitalier, notamment dans le cadre de la lutte contre l'infection nosocomiale. La méthodologie employée permet de conduire des études rigoureuses pouvant mener à terme à des améliorations significatives des méthodes de prévention de l'infection, que ce soit par la mise en place de systèmes de traitement de l'air performants, l'amélioration des protocoles de soins ou encore la modification des comportements induisant un risque.

Elle permet en effet de mettre en lumière certains vecteurs de contamination auparavant mal identifiés, comme les ventilateurs présents dans de nombreux appareils électroniques. Ce simple exemple démontre à lui seul qu'il est vital que d'une part, l'expertise aéraulique soit utilisée lors de la conception des centres de prise en charge des brûlés, et que d'autre part tous les personnels intervenant dans les centres de brûlés et plus généralement dans toutes les zones à atmosphère contrôlée soient sensibilisés à la maîtrise du risque d'aérocontamination. Car l'étude de la dispersion des spores dépasse largement le cadre des problèmes spécifiques aux grands brûlés pour s'étendre par exemple à ceux des services d'hématologie ou encore de transplantation d'organes.

En permettant de voir l'invisible, la simulation numérique vise véritablement à comprendre le comportement des flux d'air et par conséquent à éviter des dysfonctionnements aérauliques liés non seulement à la géométrie de la pièce et aux effets du matériel sur les écoulements d'air mais également aux comportements humains à risques impossible à déceler sans visualisation.

REMERCIEMENTS :

La thèse dont ce travail est extrait est l'aboutissement d'un long cheminement visant à améliorer la protection du brûlé contre le risque de contamination aéroportée. Pour ce faire, un partenariat de recherche entre les équipes du Centre de Brûlés et EDF R&D a été créé dès 2003. Dans ce contexte, le rôle spécifique d'EDF R&D a porté sur la compréhension par la modélisation numérique et l'expertise aéraulique des écoulements d'air.

Les études réalisées dans le cadre d'un PHRC ont permis une avancée importante dans la maîtrise des écoulements d'air dans une chambre pour grands brûlés, mais si satisfaisante qu'elle soit, cette avancée ne pouvait pas permettre d'appréhender les phénomènes complexes fondamentaux qui sont à l'origine du risque de contamination, tels que la déposition et le ré-envol de particules.

C'est pour répondre plus précisément à ce besoin qu'elles ont été prolongées par une thèse co-financée par EDF R&D et la Fondation EDF dans le cadre d'un projet de Mécénat de Compétences, et bénéficiant également d'un financement de l'ANRT sous la forme d'une bourse CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la Recherche). À ce stade, le travail est fondamental et nécessairement très amont par rapport à la problématique générale : cela représente un premier pas dans la compréhension de ces phénomènes complexes et il est nécessaire que ces travaux de recherches soient poursuivis.

La compréhension de ces phénomènes représente donc la réponse à un besoin fondamental du secteur hospitalier qui devrait permettre non seulement de progresser dans la maîtrise de la contamination à l'intérieur des centres pour grands brûlés, mais plus largement de progresser dans la maîtrise du risque infectieux en milieu hospitalier, véritable problème de santé publique.

FIGURES :

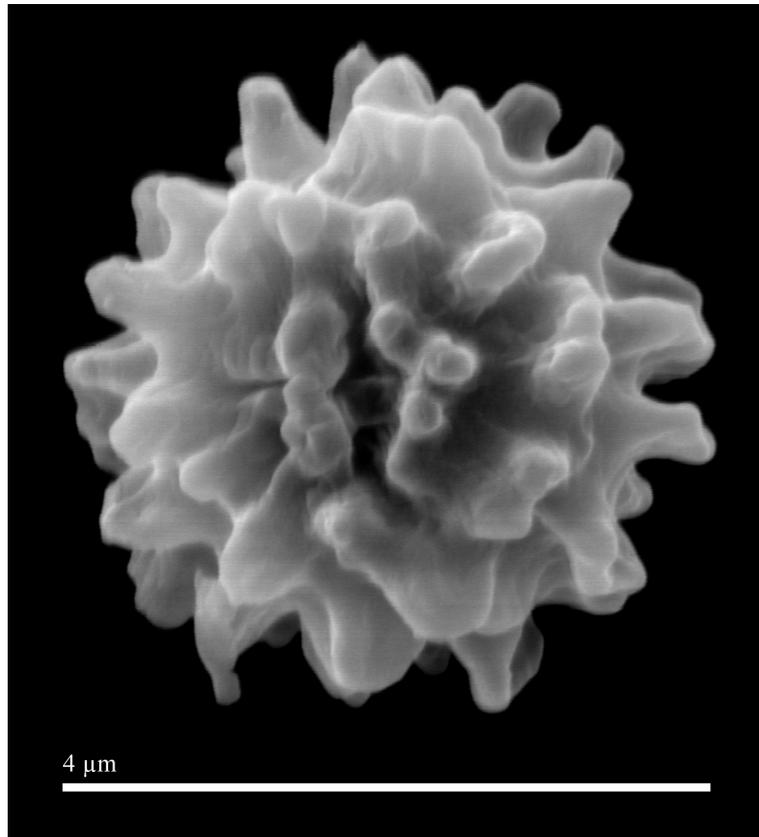


figure 1



figure 2



figure 3

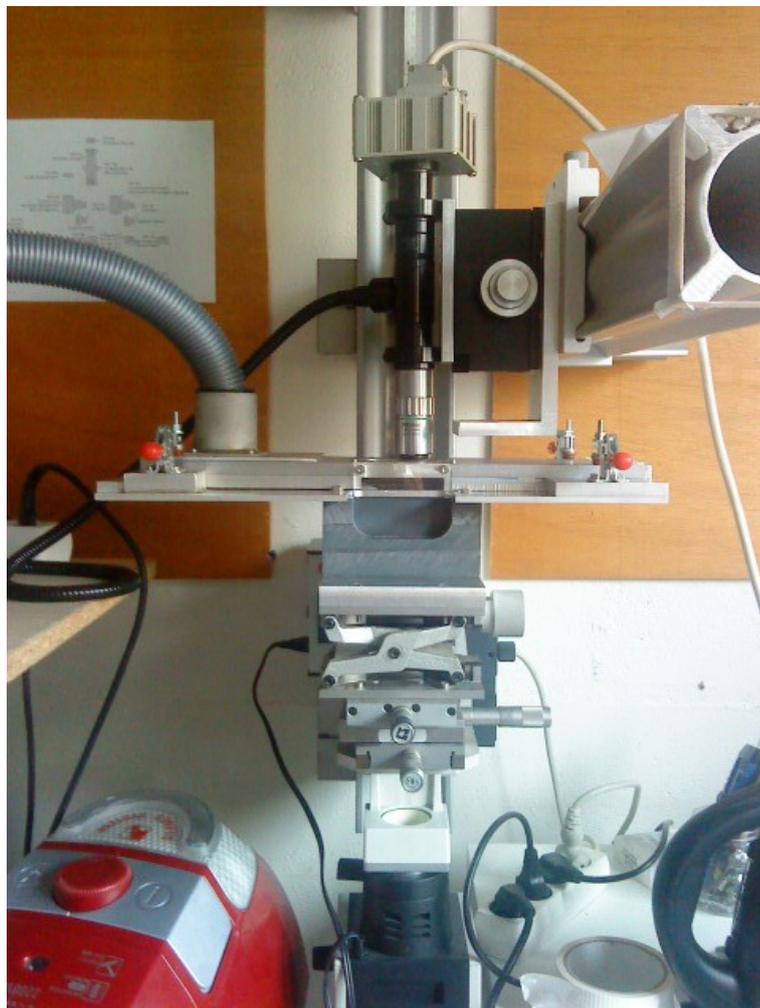


figure 4



figure 5



figure 6

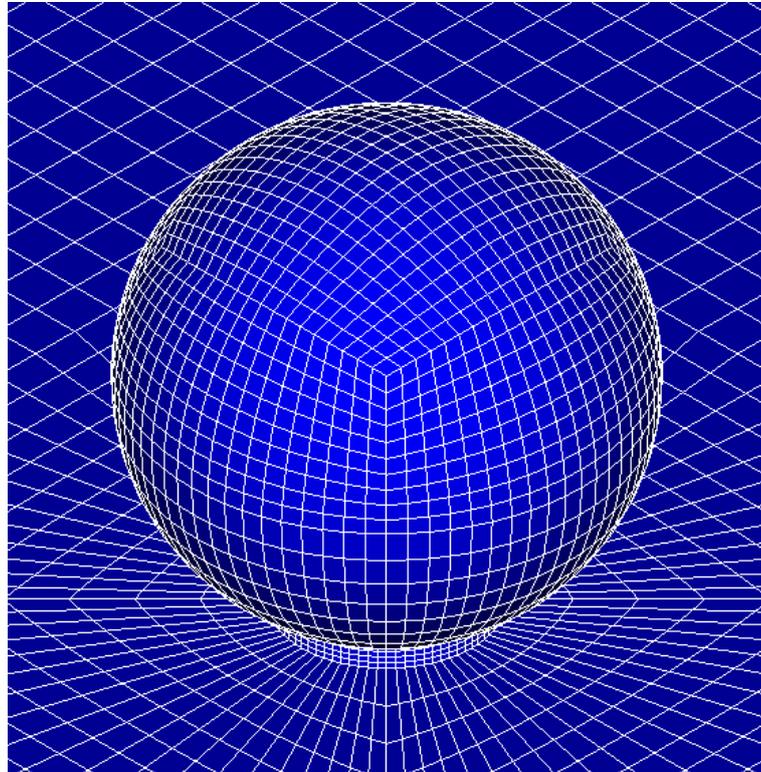


figure 7

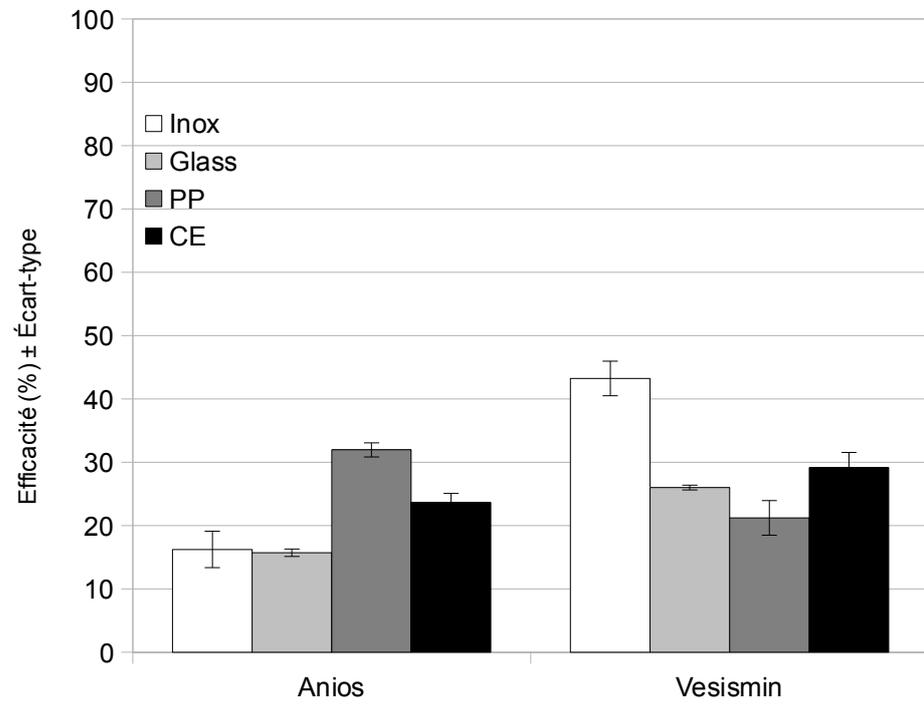


figure 8



figure 9

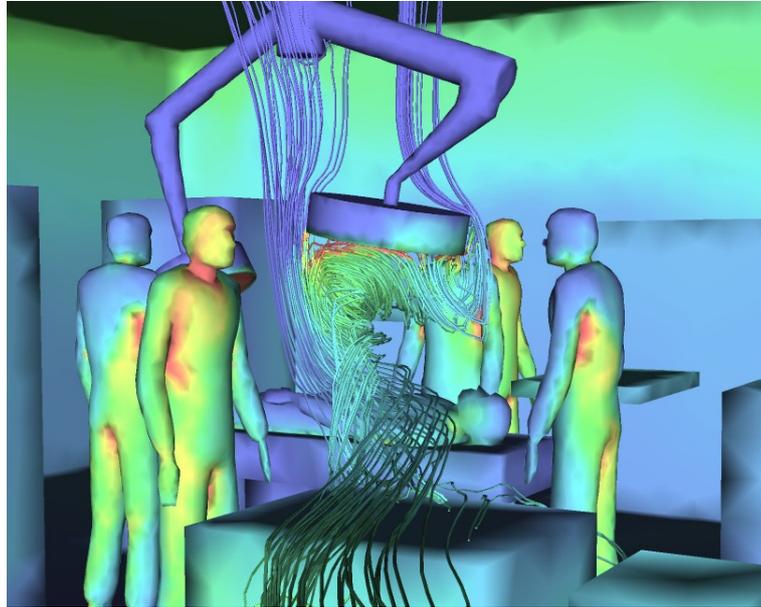


figure 10

LÉGENDE DES ILLUSTRATIONS :

figure 1 : Spore d'*Aspergillus niger* observée au Microscope Électronique à Balayage

figure 2 : Chambre expérimentale pilote de l'Hôpital Saint Louis

figure 3 : Cuve en plexiglass utilisée au Laboratoire de Physique de l'ENS de Lyon pour y créer des aérosols fongiques

figure 4 : Montage expérimental permettant de visualiser le ré-envol de particules à l'aide d'un microscope et d'une caméra rapide

figures 5 et 6 : Prototype de dispositif d'aérosolisation de spores par soufflage

figure 7 : Exemple de maillage utilisé pour modéliser l'écoulement autour d'une spore, ici représentée par une sphère

figure 8 : Efficacité de deux fongicides du commerce testés sur quatre matériaux usuels préalablement contaminés avec *Aspergillus niger*

figure 9 : Ventilateur de refroidissement de dispositifs électroniques

figure 10 : Simulation numérique de l'écoulement du flux d'air soufflé par le plafond

PUBLICATIONS :

1. Beauchène C. et coll. Accumulation and transport of microbial-size particles in a pressure protected intensive care room: CFD modelization and experimental evidence. BMC Infect Dis. 2011 Septembre;11:58
2. Bergeron V. Metani A. La qualité de l'air intérieur, une préoccupation croissante. Ann Fals Exp Chim Tox. 2009 Décembre;971:32-40.
3. Bergeron V. Metani A. Quelles technologies pour améliorer la qualité de l'air intérieur ? Ann Fals Exp Chim Tox. 2010 Janvier;972:50-8.
4. Bodey G.P. The emergence of fungi as major hospital pathogens. J Hosp Inf. 1988;11:A:411-26
5. Desenclos J.C. La transmission aérienne des agents infectieux. Med Mal Infect. 2008;38:449-51
6. Faure O. Fricker-Hidalgo H. Lebeau B. Mallarety M.R. Ambroise-Thomas P. Grillot R. Eight-year of surveillance of environmental fungal contamination in hospital operating rooms and haematological units. J Hosp Inf. 2002;50:155-60
7. Gangneux J.P. et coll. Surveillance mycologique de l'environnement pour la prévention de l'aspergillose invasive : propositions de standardisation des méthodologies et des modalités d'application. La Presse Médicale. 2002;31:18:841-48
8. I.N.V.S. Enquête de prévalence des infections nosocomiales. 2006
9. Lee J.H. Hwang G.B. Jung J.H. Lee D.H. Lee B.U. Generation characteristics of fungal spore and fragment bioaerosols by airflow control over fungal cultures. J Aero Sci. 2010;41:319-25
10. VandenBergh M.F.Q. Verweij P.E. Voss A. Epidemiology of nosocomial

infections : invasive aspergillosis and the environment. *Diag Micro Infect Dis.* 1999;34:221-27

11. Vasselle A. Rapport sur la politique de lutte contre les infections nosocomiales. O.P.E.P.S. 2006

CONGRÈS :

- Mimoun M. Beauchêne C. Apports de la simulation numérique dans la maîtrise de la contamination aéroportée – Application aux centres de grands brûlés. 29^e Congrès de la SFETB; Juin 2009; Arcachon.
- Beauchêne C. et coll. Airflow modelization by Computational Fluid Dynamics for optimizing control for airborne microbial contamination in an intensive care room for severely burned patients. European congress of clinical microbiology and infectious diseases; Avril 2010; Vienne (Autriche).
- Mimoun M. Beauchêne C. Maîtrise du risque de contamination aéroportée dans une chambre pour grands brûlés. 1^{er} congrès franco-marocain de brûlologie – Société Marocaine de Brûlologie; Octobre 2011; Marrakech.
- Metani A. Bergeron V. Beauchêne C. Benhamadouche S. Derouin F. Mimoun M. Maîtrise de risque de contamination aspergillaire. 32^{ème} congrès de la SFETB; Juin 2012; Nantes.