

# Etude du séchage solaire sous serre des boues d'épuration par convection forcée

Tebr CHAMMEM<sup>1\*</sup>, Hatem MHIRI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Unité de Thermique et Thermodynamique des Procédés Industriels, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Route de Ouardanine 5000 Monastir-tunisie.

\* (Tebr CHAMMEM : [chamem\\_tebr@yahoo.fr](mailto:chamem_tebr@yahoo.fr))

**Résumé** - Nous présentons une étude du séchage convectif forcé de la boue d'épuration urbaine assuré par un ventilateur de soufflage pour favoriser le transfert de l'eau et l'évacuation de l'air humide à l'extérieur. Des simulations aérauliques effectuées sur des serres de séchage ont permis d'évaluer les vitesses à la surface des boues et de prévoir les performances de séchage. Une nouvelle configuration de ventilation a été proposée et simulée sous Fluent, basée sur le balayage d'air par des fentes linéaires. L'influence de la vitesse superficielle sur l'évolution des conductances de transfert est également soulignée.

## Nomenclature

$d$	largeur du fente de soufflage(m)	$Sic$	siccité de la boue
$h_c$	coefficient de transfert sensible(W/m <sup>2</sup> K)	$T$	température, K
$km$	coefficient de transfert de masse	$t$	temps, s
$L$	nombre adimensionné (L=x/d)	$X$	teneur en eau, kg eau.kg <sup>-1</sup> Ms
$Ms$	matière sèche		

## 1. Introduction

L'effet de serre repose sur le fait que les murs de la serre et son toit transparents aux rayonnements solaires laissent pénétrer la chaleur du soleil mais ne transmettent pas les rayons infrarouges.

Le séchage solaire des boues utilise ce concept pour accélérer le processus d'élimination de l'eau contenue dans les boues déshydratées. L'échauffement de la surface des boues, grâce au rayonnement solaire et au rayonnement infrarouge émis par le matériau transparent de la serre, permet d'augmenter la pression de vapeur d'eau à la surface des boues et par suite de favoriser l'évaporation. Un flux d'air frais généré par un ventilateur et admis sous la serre permet d'évacuer la vapeur d'eau issue du séchage.

Au cours du séchage d'un milieu poreux tel que les boues, les transferts de chaleur et de masse s'effectuent d'une façon couplée. Le transport de masse est celui de la vapeur d'eau entre la surface des boues et l'air sous la serre.

Récemment, plusieurs approches théoriques ou expérimentales concernant le séchage convectif en surface, ont été développées afin d'étudier les caractéristiques de séchage et déterminer le coefficient de transfert thermique au cours du séchage. Une meilleure compréhension du procédé est aussi indispensable et passe nécessairement par la recherche scientifique. Bongiovanni [1] étudie l'influence de l'étape de déshydratation sur le séchage convectif de boues synthétiques et de boues urbaines. Carrère-Gée [2] envisage le séchage en couche mince par ébullition de boues d'hydroxyde d'aluminium et développe une méthode pour la conception et le dimensionnement du procédé. Ferrasse [3] développe des outils pour la caractérisation et la compréhension du comportement de boues d'épuration dans un procédé de séchage conductif avec agitation. Léonard [4] aborde le séchage convectif d'un échantillon individuel de boue obtenu par extrusion suivi de sa texture. Rayan slim [5] étudie un modèle de séchage solaire, met en évidence sa dépendance des conditions climatiques. L'enjeu

majeur était de concevoir un procédé de séchage qui valorise l'utilisation de l'énergie solaire et fournit le complément d'énergie nécessaire pour améliorer les performances de séchage sur un cycle annuel de gestion des boues. Les pompes à chaleur sont proposées comme solution assurant l'appoint d'énergie.

La configuration du système de ventilation dans une serre de séchage définit les caractéristiques d'écoulement en général, et plus précisément les vitesses induites à la surface de la boue. Une première étape de modélisation aéraulique de la serre s'avère nécessaire puisqu'elle permet de souligner l'effet des conditions aérauliques sur la vitesse d'écoulement, et l'effet de cette dernière sur la convection et donc l'évaporation. Dans ce contexte et devant les incertitudes qui pèsent sur les filières de valorisation, le séchage solaire sous serre se positionne comme un procédé alternatif, qui permet de réduire les volumes des boues avec un minimum de dépenses énergétiques et préserve, en ajustant au mieux la valeur de la siccité finale de la boue

## **2. Aéraulique**

La conception de l'aéraulique dans la cellule constitue un point clé pour le dimensionnement du dispositif. L'objectif étant d'établir un écoulement en forme d'un rideau d'air rasant la surface des boues avec un profil de vitesse homogène assuré par des fentes linéaires de soufflage. Une première étape de modélisation s'avère nécessaire et permet de prévoir les configurations assurant une bonne maîtrise de l'écoulement d'air et des profils de vitesses superficielles favorisant les échanges convectifs à l'interface des boues. Pour cette raison on a opté à changer la position de la fente de soufflage au dessus la surface de la boue dans le but d'obtenir une position optimale.

## **3. Condition au limites appliquées et modèles de calcul**

L'étude de l'écoulement d'air dans la maquette était déjà indispensable pour être certain de maîtriser la vitesse moyenne à la surface de la boue. La géométrie de la maquette est choisie de longueur 60cm, de largeur 50 cm et de hauteur 35 cm. D'autre part, les fentes de soufflage et de reprise d'air sont positionnées de manière à assurer l'adhérence du jet à la surface des boues. La fente d'admission est située à 9 cm de la surface des boues et la fente d'extraction est située à 4cm de la surface des boues dans un premier temps.

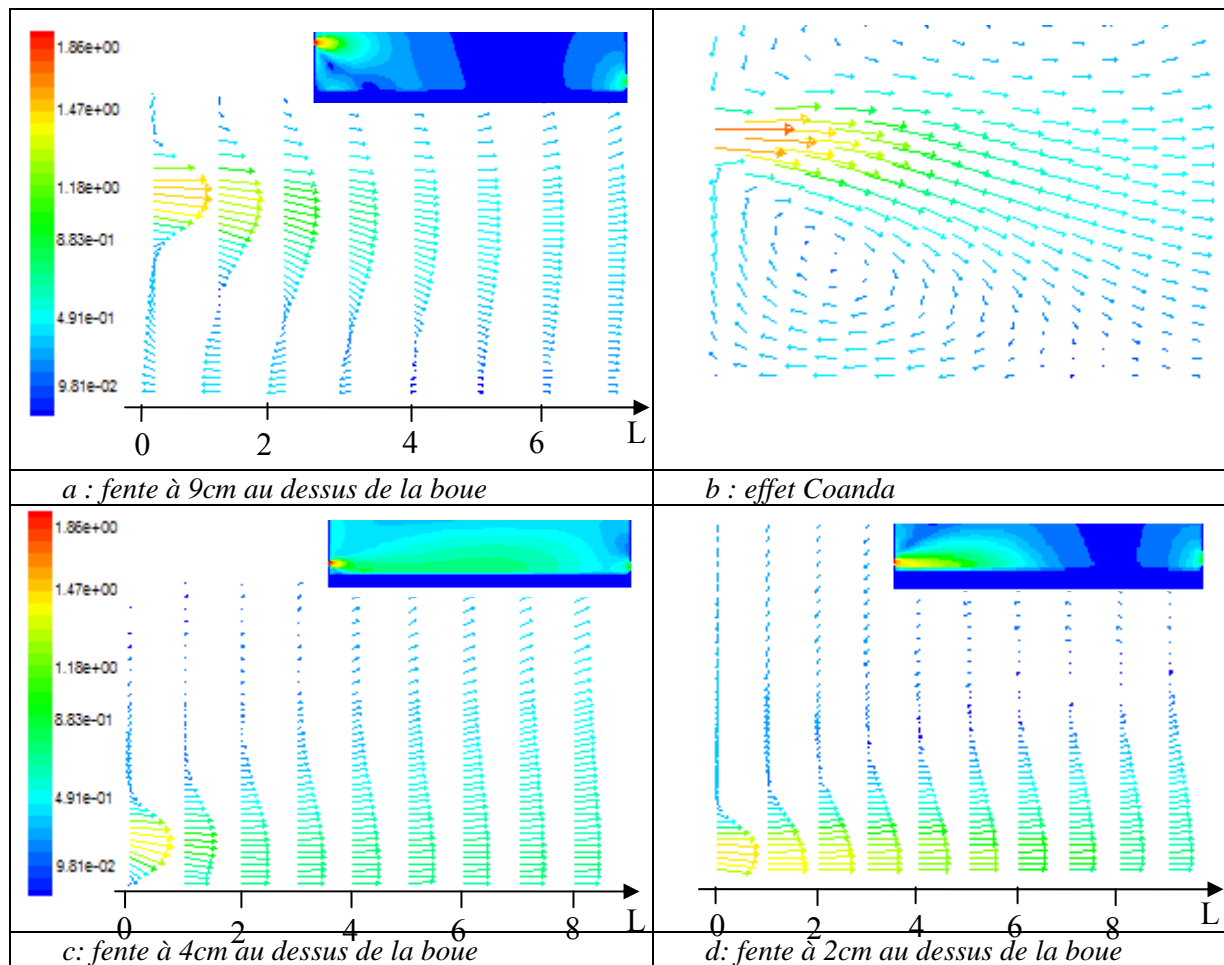
Cette géométrie est décrite et maillée sous Gambit et ensuite modélisée sous Fluent. Le soufflage est imposé en tant que vitesse uniforme à la fente de soufflage. Une condition de pression de sortie est imposée à la fente de sortie. Les conditions aux limites de type "Paroi" sont utilisées pour limiter les volumes d'air, tel est le cas des parois de la serre, des murets ainsi que la surface des boues où on a imposé des conditions de transport d'espèce ou des conditions de diffusion de matière. Le modèle de turbulence retenu est le modèle k-ε standard. Le maillage est choisi sur la base d'un compromis entre la précision de la description de la géométrie, les ressources informatiques disponibles et le temps de calcul.

## **4. Résultats des simulations aérauliques de la serre**

### **4.1. Profil de vitesses à la surface des boues**

La figure (1) trace les vecteurs vitesses à la surface des boues. A l'aval des vantelles d'admission, la vitesse moyenne d'air est de l'ordre de 2 m/s et s'atténue au fur et à mesure que l'écoulement pénètre dans la serre.

Les résultats de simulations montrent sur la figure (1.a et 1.b) qu'à la sortie de la fente, le jet d'air subit une déviation vers la surface inférieure immobile et y reste collé. Par ailleurs, le tracé des vitesses superficielles montrent une première zone de turbulence à proximité de la fente de soufflage.



La figure 1: décrit le suivi des vecteurs vitesses résultant des simulations aéraulique.

L'adhérence spontanée d'un jet fluide à une paroi qui se trouve au voisinage de sa trajectoire est bien connue des praticiens de la ventilation. L'effet Coanda et l'adhérence des jets à la paroi sont responsables d'un tel comportement.

La mécanique des fluides donne une explication à l'effet Coanda par l'existence d'une zone où se crée une baisse de pression dirigée vers le bas et qui tient le jet attaché à la boue, comme celle représentée à la figure (1.b)

L'existence de ces phénomènes dépend étroitement de quelques paramètres cruciaux tels que la vitesse d'écoulement du jet, l'intensité du débit et la position de la fente de soufflage par rapport à la surface de la boue. La figure 1 montre que la position de la fente à 4cm de la boue est le plus adéquate puisque le flux d'air peut atteindre la distance maximale tout en rasant la surface de la boue, par contre la position de la fente à 9cm de la boue n'est pas favorable puisque il y a formation d'une zone morte à la sortie de la fente, quant à la position de la fente à 2 cm de la boue le flux d'air reste collé à la surface et ne peut pas atteindre toute la longueur de la serre.

## 5. Étude du séchage convective sur un échantillon de boue

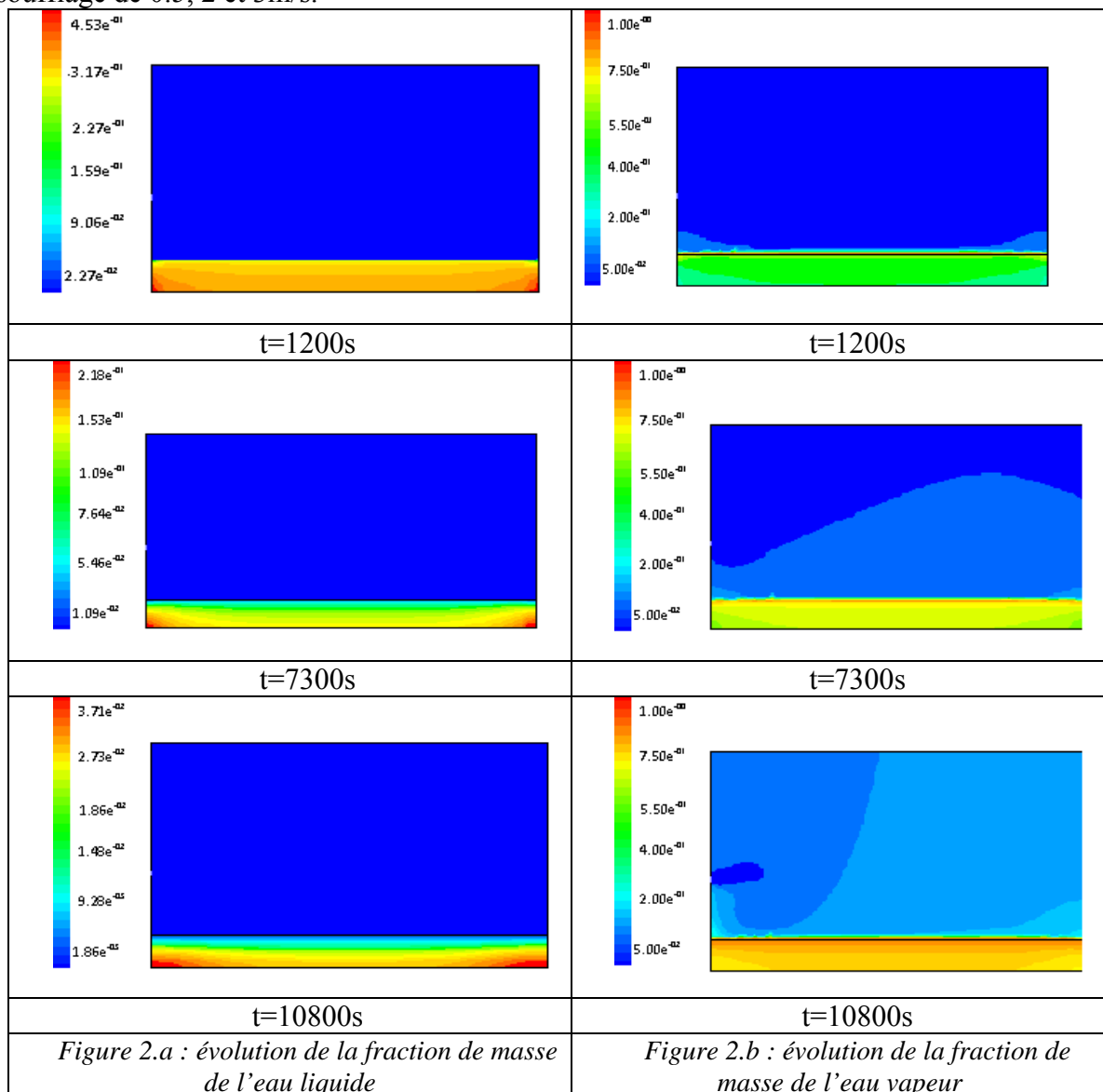
L'objectif des essais est d'évaluer les transferts de masse en fonction de la siccité des boues pour une vitesse de soufflage donnée. Ensuite, l'effet de variation du débit d'air sur la cinétique de séchage est investigué.

L'analyse du séchage consiste à déterminer l'évolution du flux massique d'eau en fonction de la teneur en eau du produit à sécher. A ce fin on a opté de résoudre ce problème en simulant le séchage sur le code de calcul Fluent.

### 5.1. Conditions opératoires

L'air soufflé n'est pas conditionné. Sa température et son humidité relative sont celles de l'air ambiant. Au cours des essais, la température d'air variait entre 25 et 30 °C. Les essais sont effectués avec trois vitesses d'air différentes : 0.5 m/s, 2 m/s et 3 m/s. La teneur en eau initiale lors des essais est de l'ordre de 5 kg<sub>eau</sub>/kg Ms.

Les conditions de soufflage sont simulées sous Fluent pour déterminer le coefficient de convection à la surface des boues dans la serre, ainsi que l'évolution de la teneur en eau suite au séchage. La figure 2 trace l'évolution de la fraction de masse de l'eau liquide existant dans la boue au cours du séchage ainsi que la fraction de masse de l'eau vapeur formée. Les résultats tracés sur la figure 3 sont obtenus avec une température de 27 °C et une vitesse de soufflage de 0.5, 2 et 3m/s.



## 5.2. Influence du débit de ventilation sur le transfert de chaleur et de masse

On remarque que l'augmentation des vitesses d'air à l'interface des boues entraîne une augmentation de la quantité d'eau évaporée donc une intensification des échanges convectifs. Par ailleurs, la comparaison des courbes présentées sur les figures 3 et 4 suggèrent que cette augmentation de vitesse induit un assèchement plus rapide de la surface d'échange. Au fur et à mesure que la vitesse superficielle augmente, l'effet d'assèchement devient plus dominant.

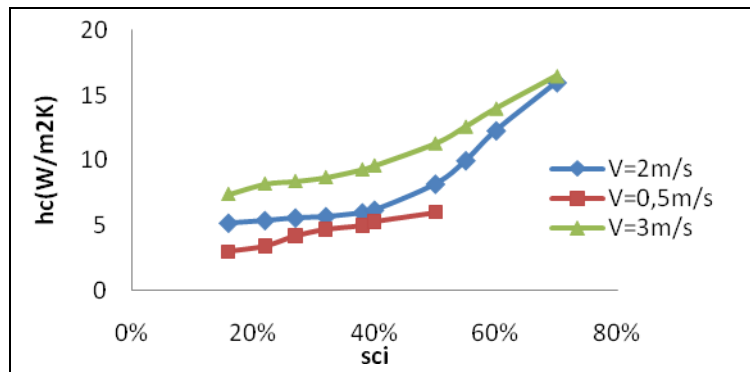


Figure 3 : Evolution de coefficient de transfert sensible en fonction du débit de ventilation

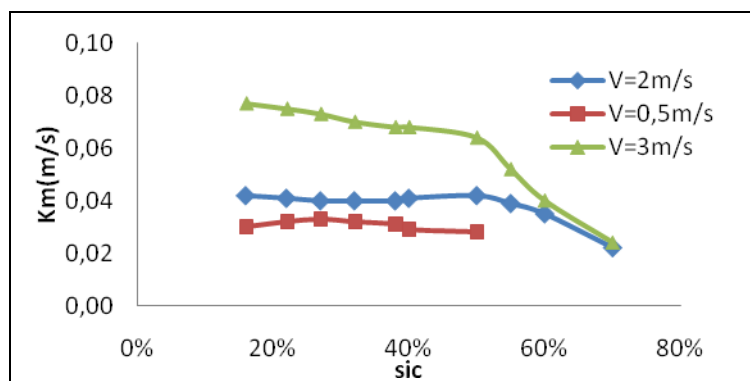


Figure 4 : Evolution des conductances de transfert de masse en fonction du débit de ventilation

Une augmentation du débit de ventilation engendre une intensification des échanges convectifs sensibles observée à la figure 3. Dans le cas de la convection forcée, le coefficient de transfert de chaleur dépend des nombres adimensionnels de Reynolds ( $Re$ ) et de Prandtl ( $Pr$ ). D'autre part, quel que soit le débit d'air testé, la conductance sensible adopte une allure croissante au cours du séchage : au fur et à mesure que la siccité des boues augmente, la conductance sensible augmente.

Pour les trois vitesses superficielles testées, une période de transferts latents constants est observée jusqu'à ce que la siccité critique soit atteinte, suivie d'une période de dégradation des transferts latents. L'augmentation de la vitesse superficielle réduit l'épaisseur de la couche limite où se situent les échanges air-boues, ce qui se traduit par un accroissement des coefficients de transferts latents comme le montre la figure 4.

Au delà de 2m/s l'évolution de la teneur en eau reste presque constante. On va donc adopter une vitesse de soufflage de 2m/s pour valider nos résultats obtenues avec le code de calcul industriel Fluent avec les résultats expérimentales ainsi que les résultats obtenues par les corrélations physique classique présenté par Amadou Houa[6].

La figure suivante trace l'évolution de la teneur en eau sur base sèche en fonction du temps pour les résultats obtenus par le code de calcul Fluent, les résultats expérimentaux et les résultats obtenus par des corrélations physiques présentés par Amadou haoua[6].

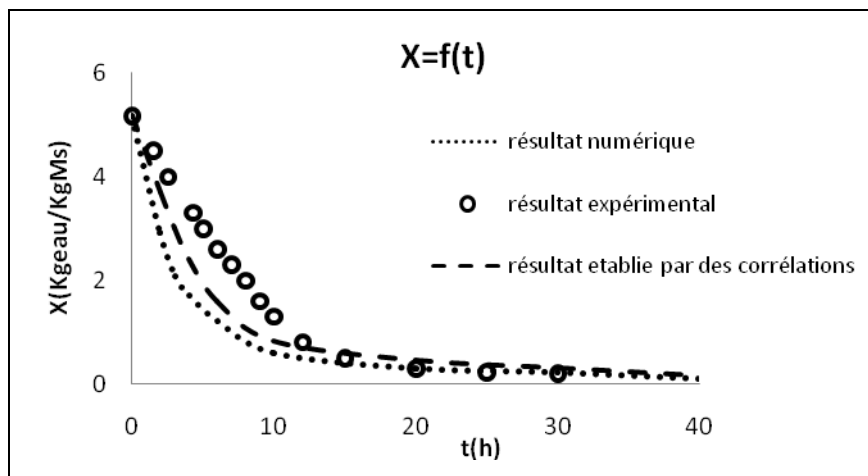


Figure 4 : Comparaison des valeurs simulées et expérimentales ( $T_a=48,04^\circ\text{C}$ ,  $H_r=30,52\%$ ,  $V=1,65\text{m/s}$ ).

## 6. Conclusion

La quantité d'eau évaporée en surface ainsi que l'efficacité du séchage dépendent donc de l'intensité des échanges convectifs de chaleur et de masse qui varient en fonction du régime d'écoulement, du débit d'air soufflé et de l'état de l'interface boues-air. La modélisation de tout procédé de séchage nécessite l'analyse des phénomènes de transferts convectifs de chaleur et de masse ayant lieu à l'interface de séchage. La compréhension de l'interaction existant entre l'écoulement externe et la surface de séchage est essentielle pour concevoir et améliorer le procédé de séchage étudié.

## Références

- [1] Bongiovanni, J.-M., Traitement des boues résiduaires par l'association en série d'une déshydratation mécanique et d'un séchage thermique, *Thèse de doctorat*, Université de Pau et des Pays de l'Adour (1998).
- [2] Carrère-Gée, C., Etude du séchage indirect d'une fine couche de boue d'hydroxyde d'aluminium en ébullition : application au cylindre sécheur, *Thèse de doctorat*, Université Paul Sabatier de Toulouse 3, (1999).
- [3] Ferrasse, J.-H., Développement d'outils expérimentaux pour le dimensionnement de procédés de séchage conductif avec agitation : application à des boues de stations d'épuration urbaines, *Thèse de doctorat*, Centre Energétique & Environnement, Ecole des Mines d'Albi Carmaux(2000).
- [4] Léonard, A., Etude du séchage convectif de boues de station d'épuration suivi de la texture par microtomographie à rayons x, *Thèse de doctorat*, Faculté des Sciences Appliquées Université de Liège (2002).
- [5] Slim Rayen, Etude et conception d'un procédé de séchage combiné de boues de stations d'épuration par énergie solaire et pompe à chaleur, *Thèse de doctorat*, l'Ecole des Mines de Paris (2007).
- [6] Amadou Haoua, modélisation du séchage solaire sous serre des boues de stations d'épuration urbaines, *thèse de doctorat*, université louis pasteur – strasbourg 1, (2007).