



HAL
open science

Intensification des transferts en agroalimentaire : approches numériques et expérimentales

Olivier Rouaud

► **To cite this version:**

Olivier Rouaud. Intensification des transferts en agroalimentaire : approches numériques et expérimentales. Génie des procédés. Université de Nantes, 2016. tel-02357509

HAL Id: tel-02357509

<https://hal.science/tel-02357509>

Submitted on 10 Nov 2019

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.

Intensification des transferts en agroalimentaire : approches numérique et expérimentale

Synthèse des travaux de recherche

En vue d'obtenir le diplôme d'Habilitation à diriger des Recherches

Olivier Rouaud

12/12/2016

Présentée publiquement devant le jury ci-dessous

Jean-Christophe BATSALE, <i>Rapporteur</i>	Professeur, ENSAM, I2M Bordeaux
Lionel ESTEL	Professeur INSA ROUEN, LSPC – EA 4704
Denis FLICK, <i>Rapporteur</i>	Professeur, AgroParisTech, GENIAL INRA UMR 1145
Christophe GOURDON, <i>Rapporteur</i>	Professeur à L'ENSIACET, Toulouse, UMR 5503
Michel HAVET	Professeur ONIRIS, GEPEA UMR 6144
Jack LEGRAND	Professeur Université de Nantes, GEPEA UMR 6144
Lingai LUO	Directeur de Recherche CNRS, LTN CNRS UMR 6607

Table des matières

Introduction	3
Parcours professionnel Contexte scientifique	7
I. Curriculum vitae détaillé	8
I.1. Titres et formation	8
I.2. Cursus professionnel et fonctions exercées.....	8
I.3. Activités administratives	9
II. Activités d'enseignement	9
II.1. Cadre structurel des activités d'enseignement.....	9
II.2. Thématiques abordées et volume horaire	10
II.3. Réflexions sur l'enseignement et liens enseignement - recherche.....	11
III. Activités de recherche.....	13
III.1. Cadre structurel des activités de recherche.....	13
III.2. Intégration dans des programmes de recherche et collaborations – activités d'encadrement et reconnaissance internationale des compétences.....	14
III.3. Valorisation du travail de recherche	14
III.4. Bilan synthétique des activités – contexte scientifique et partenariats	15
Présentation des activités de recherche : Intensification des transferts	19
I. Intensification des transferts par convection forcée	20
I.1. Préambule	20
I.2. Intensification des transferts pour la décontamination de surface.....	20
I.3. Intensification des transferts lors de la congélation	25
I.4. Intensification des transferts appliquée à la cuisson du pain	31
I.5. Conclusions.....	33
II. Intensification des transferts par vent ionique ou électroconvection.....	34
II.1. Introduction.....	34
II.2. Génération du vent ionique - principe	34
II.3. Choix d'une méthode expérimentale adaptée pour l'étude des écoulements EHD	35
II.4. Dispositif expérimental dédié à l'intensification.....	38
II.5. Résultats pour les configurations mono fil.....	39
II.6. Vers la modélisation des procédés utilisant le vent ionique.....	46
II.7. Applications et analyse de l'efficacité	48
II.8. Conclusions et perspectives	51
III. Intensification des transferts par Micro-ondes.....	52
III.1. Introduction.....	52
III.2. La modélisation comme outil d'investigation	53

III.3. Applications.....	57
III.4. De la nécessité d'estimer les paramètres diélectriques.....	62
III.5. Autres applications.....	66
III.6. Conclusions et perspectives	67
IV. Perspectives : intensification par combinaison de technologies	68
IV.1. Intérêt des procédés électrothermiques.....	68
IV.2. Chauffage ohmique	69
IV.3. Procédés combinés pour une rupture technologique	74
IV.4. Perspectives générales et démarche scientifique.....	76
Références bibliographiques	81
Annexes	87
A1 – Implication dans les programmes de recherche	88
A2 - Encadrements et co-encadrements dans le cadre des activités de recherche	89
A3 - Valorisation des activités de recherche	91

Introduction

Ce mémoire décrit mes activités des recherches dédiées à l'intensification des transferts dans le domaine agroalimentaire. Si pour le Génie des Procédés l'intensification des transferts est souvent synonyme de miniaturisation, celle qui nous intéresse dans ce document est entendue au sens large et concerne l'emploi de méthodes de design et le développement de tout appareil ou dispositif particulier qui aura pour but d'augmenter la vitesse de diffusion de la température et/ou de la masse et plus généralement d'améliorer l'efficacité des transferts entre une source et un produit. Elle peut avoir comme résultat la diminution de la durée des traitements d'un aliment avec l'assurance d'obtenir un produit satisfaisant. D'un point de vue fonctionnel pour le transfert thermique, il s'agit d'augmenter le coefficient de transfert global, la surface du transfert ou encore l'écart de température entre l'environnement et le produit traité thermiquement. Ces éléments peuvent être améliorés indépendamment les uns des autres ou de manière conjointe. On pourra aussi utiliser, comme on le verra plus tard, des dispositifs permettant de générer la chaleur au sein même de la matrice alimentaire. Des transferts intenses supposent généralement des investissements importants et/ou une grande consommation d'énergie. Les problèmes concernant l'intensification des transferts ont donc un fort caractère technique et économique à la fois. Mais comme il n'est pas question, ici, d'augmenter la consommation énergétique (et par conséquent le coût de fonctionnement), les recherches d'optimisation des procédés étudiés s'inscrivent dans le cadre d'une utilisation rationnelle de l'énergie. Outre la diminution attendue de la consommation énergétique, la contrainte évidente à respecter concerne la qualité sanitaire des produits alimentaires qui doit être préservée.

La première partie du document décrit mon parcours professionnel et le cadre structurel et scientifique de mes activités. Le lien entre enseignement et recherche est souligné et des données chiffrées et factuelles sont présentées pour permettre de quantifier le travail réalisé durant mes années d'activités d'enseignant-chercheur. Un bilan synthétique des actions de recherche et des collaborations clôt cette partie.

La deuxième, dédiée à la recherche, débute par un chapitre consacré à des techniques d'intensification qualifiées de passives car elles reposent soit sur l'augmentation des vitesses d'écoulement par l'utilisation de jets, soit sur l'utilisation d'écart de température importants entre le produit et le fluide. Les travaux présentés illustrent en filigrane l'apport de la double démarche expérimentale et numérique. Ils dessinent la méthodologie scientifique généralement adoptée où le développement de modèles mathématiques décrivant les transferts nécessite également la mise au point de dispositifs expérimentaux qui vont des outils de mesure au procédé préindustriel.

Le deuxième chapitre s'intéresse à l'amélioration des échanges engendrée par des écoulements secondaires dus à l'utilisation d'un champ électrique. Il s'agit donc d'une technique active qui requiert une énergie supplémentaire. L'application de séchage étudiée nous a permis de développer une démarche scientifique complète. La mise au point d'un banc expérimental, les choix de systèmes de mesures adéquats et la méthodologie expérimentale qui en découle, le développement de modèles numériques couplés... sont autant d'éléments nécessaires à une analyse fine de la physique, la démarche étant conclue par une évaluation énergétique.

Le troisième chapitre traite également de techniques actives utilisant l'électricité mais l'intensification des transferts n'est pas liée ici à une modification des écoulements mais à l'apport d'une source volumique au sein même du produit. Les travaux présentés montrent l'intérêt de la simulation numérique pour l'accès à des données difficilement mesurables, autant indispensables à la simulation elle-même (propriétés diélectriques), qu'à l'analyse des phénomènes mis en jeu.

Le dernier chapitre est consacré aux études en cours et à celles envisagées. L'orientation vers des technologies privilégiant l'apport de sources internes est explicitée avec l'ajout de techniques

complémentaires comme le chauffage ohmique. La combinaison de différentes sources énergétiques est proposée comme solution pour parvenir à des procédés éco-efficients garants de la qualité du produit alimentaire. La démarche scientifique, déjà esquissée dans les chapitres précédents, y est également précisée. Elle est caractérisée par l'utilisation conjointe de l'expérimentation et de la modélisation des transferts couplés intégrant des termes sources issus de l'électromagnétisme, dans un domaine restreint aux procédés thermiques et frigorifiques de l'agroalimentaire. J'espère ainsi montrer comment cette démarche spécifique peut s'inscrire dans l'environnement plus global et fortement multi-disciplinaire d'un laboratoire de Génie des Procédés, et contribuer ainsi à l'avancée des connaissances pour relever certains défis scientifiques et sociétaux du 21^{ème} siècle.

Parcours professionnel
Contexte scientifique

I. Curriculum vitae détaillé

Olivier Rouaud

Né le 30 octobre 1972,

Marié, 3 enfants,

Service militaire effectué de 10/96 à 08/97

Coordonnées professionnelles :

ONIRIS, Site de la Géraudière

CS 82225

44322 NANTES Cedex 03

☎ 02.51.78.54.23

✉ : olivier.rouaud@oniris-nantes.fr

Maître de Conférences du Ministère de l'Agriculture (6^{ème} échelon), section CNECA 3

I.1. Titres et formation

2002 : **DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE NANTES** dans la spécialité : Thermique, Énergétique et Génie des Procédés, option : Mécanique des Fluides. Mention très honorable avec les félicitations du jury, prix Novatlante 2004¹.

Études numériques et expérimentales de dispositifs de protection contre la contamination aéroportée dans les industries alimentaires.

Mots clés : salles blanches, taux de brassage, efficacité de la ventilation, protection rapprochée, agroalimentaire, écoulements instationnaires, jets plans, PIV, FID, simulations numériques.

1998 : **DIPLOME ÉTUDES APPROFONDIES (DEA)** en Thermique, Énergétique et Génie des Procédés (option Thermique). Institut des Sciences de l'Ingénieur en Thermique, Énergétique et Matériaux (I.S.I.T.E.M.), actuellement École Polytechnique de l'Université de Nantes. Mention Bien.

1996 : **MAITRISE DE PHYSIQUE** option Transferts d'Énergie et de Matières, de l'Université de Nantes. Mention Assez Bien.

Autres formations : formation pédagogique (Ministère de l'Agriculture 2006-2007) – 3 semaines et demi.

I.2. Cursus professionnel et fonctions exercées

2005-présent : **Maître de Conférences**, section CNECA 3, au département Génie des Procédés Alimentaires d'ONIRIS (École Nationale Vétérinaire, Agroalimentaire et de l'Alimentation Nantes-Atlantique)

2003-2004 : **Maître de Conférences contractuel** du Ministère de l'Agriculture, département Génie des Procédés Alimentaires, à l'E.N.I.T.I.A.A. (École Nationale des Ingénieurs des Techniques des Industries Agricoles et Alimentaires)

¹ Prix de thèse décerné par la Conseil Général de Loire-Atlantique

- 2002-2003 : **Chargé d'Études** à l'E.N.I.T.I.A.A. dans le cadre du projet Européen 'Bugdeath' du 5^{ème} PCRD.
- 2001-2002 : ½ poste d'**Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (ATER)** au département Génie Civil de l'IUT de Rennes.

I.3. Activités administratives

Les activités administratives dans lesquelles je suis impliqué sont listées ci-après dans un ordre d'importance décroissante, en termes d'investissement et par conséquent de temps de travail.

- Responsable du département d'enseignement GPA (Génie des Procédés Alimentaires) d'ONIRIS – à partir de septembre 2016. – Adjoint : sept 2013- août 2016
- Membre élu du Conseil d'Administration d'ONIRIS en tant que représentant des Maîtres de Conférences et assimilés – depuis juillet 2014.
- Membre suppléant de la commission nationale des enseignants-chercheurs pour le collège des Maîtres de Conférences, section CNECA 3 – depuis le 1^{er} janvier 2014.
- Membre titulaire du jury Ingénieurs - depuis septembre 2014.
- Membre titulaire du Conseil de perfectionnement depuis 2011.
- Membre titulaire à la Commission de contrôle des opérations électorales d'ONIRIS –depuis juillet 2014.
- Membre titulaire de la section disciplinaire compétente à l'égard des usagers et autres personnels exerçant des fonctions d'enseignement – depuis janvier 2015.

II. Activités d'enseignement

La fonction d'enseignant-chercheur impliquant par définition des activités d'enseignement il m'apparaissait important de dresser un bilan de ces activités afin notamment de montrer l'adéquation qui peut exister entre recherche et enseignement.

II.1. Cadre structurel des activités d'enseignement

Outre des vacances réalisées durant mon doctorat et à l'IUT de Rennes (½ ATER), mes activités d'enseignement ont réellement débuté à la suite de mon recrutement, en janvier 2004, comme Maître de conférences contractuel au département Génie des Procédés Alimentaires (GPA) de l'École Nationale des Ingénieurs des Techniques des Industries Agricoles et Alimentaires (E.N.I.T.I.A.A.). Depuis janvier 2010, l'E.N.I.T.I.A.A. et l'École Nationale Vétérinaire de Nantes (ENVN) ont fusionné pour former ONIRIS, Ecole Nationale Vétérinaire, Agroalimentaire et de l'Alimentation Nantes-Atlantique. L'un des 12 établissements publics d'enseignement supérieur et de recherche du Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, ONIRIS propose donc 2 cursus spécifiques, le cursus vétérinaire et le cursus ingénieur. L'école est également accréditée à délivrer le doctorat et est membre de la ComUE Université Bretagne Loire.

ONIRIS est composée de 5 départements d'enseignement, soit propres à chaque filière - Génie des Procédés Alimentaire pour la filière Ingénieur ; Sciences Cliniques (SC) et Santé des Animaux d'Élevage et Santé Publique (SAESP) pour la filière vétérinaire – soit commun aux deux – Biologie, Pathologie et Sciences des Aliments (BPSA) et dans une moindre mesure, Management, Statistique et Communication (MSC) pour l'enseignement des langues. La Figure 1 propose une représentation

graphique de la taille de chaque département (personnels permanents et contractuels). Le département GPA dans lequel j'enseigne est composé de 6 professeurs, 8 maîtres de conférences, 4 enseignants de BTS, 1 ingénieure de recherche, 3 ingénieurs d'étude, 3 techniciens, 1 adjointe technique et 1 secrétaire. A partir de septembre 2016, j'ai pris la direction du département qui était dirigé depuis 2013 par Marie de Lamballerie, Professeure en Génie des Procédés que j'assistais alors en tant qu'adjoint.

La filière Ingénieur qui concerne presque l'intégralité de mes activités d'enseignement recrute à partir de BAC+2 et s'étend sur 6 semestres (du S5 au S10, ce dernier semestre étant constitué intégralement par le stage en entreprise). Une centaine d'élèves est diplômée chaque année mais ce nombre ne cesse d'augmenter en raison du démarrage de la formation d'Ingénieurs par Apprentissage (IPA) en septembre 2015. Une orientation spécifique vers les Biotechnologies de la Santé est proposée depuis 2011 à partir du semestre 8 (S8) et concerne environ 15% des Ingénieurs. J'interviens pour ma part dans la filière originelle qui forme des ingénieurs généralistes aux métiers du Secteur Alimentaire.

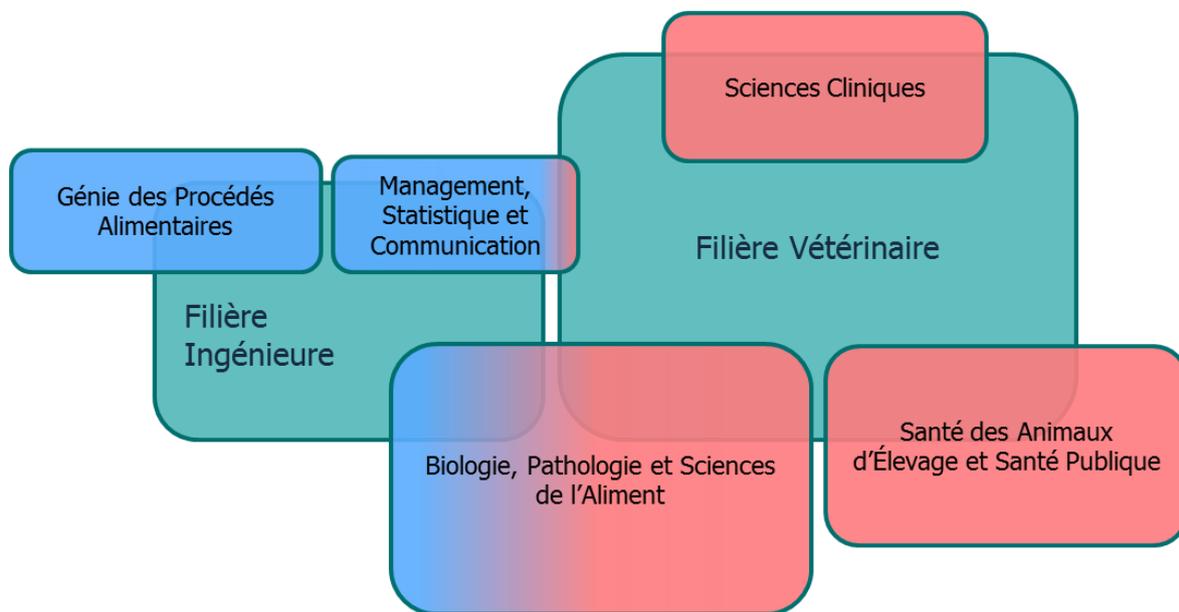


Figure 1. Les départements d'enseignement au sein d'ONIRIS (septembre 2016) – représentation graphique des effectifs.

II.2. Thématiques abordées et volume horaire

Chaque semestre, l'enseignement est structuré en modules, eux-mêmes composés d'Unités de Valeur (UV) qui constituent les éléments de base de la formation. Les UV dans lesquelles j'interviens concernent les Sciences pour l'Ingénieur et particulièrement la Physique au sens large (Thermodynamique, Transferts Thermiques, Mécanique), socle de connaissance indispensable au Génie des Procédés Alimentaire. Elles s'intéressent à certaines de ses applications - Applications frigorifiques en 2^{ème} année, Micro-ondes, Tubes à Passage de Courant, Chauffage Ohmique pour l'Électrothermie Innovante en 3^{ème} année - et à des méthodologies, outils ou méthodes d'évaluation connexes – Efficacité énergétique en 2^{ème} année, Simulation numérique en 2^{ème} et 3^{ème} année, Éco-conception d'installations, Mesures de propriétés thermophysiques en 3^{ème} année. Au total, mes activités d'enseignement représentent un volume horaire compris entre 240 et 300 h éq.TD. A celles-

ci s'ajoutent des interventions à ONIRIS en BTS - cycle de renforcement pour la préparation aux études d'ingénieurs - et à l'Université de Nantes - Licence Professionnelle Outils Informatiques pour le Génie des Procédés pour une initiation à l'efficacité énergétique et dans la filière Ingénieur Génie des Procédés et Bioprocédés de Polytech'Nantes (Unité d'Enseignement Ecoulements et Transferts).

II.3. Réflexions sur l'enseignement et liens enseignement - recherche

Objectifs de formation et méthodologie

ONIRIS forme des ingénieurs généralistes à double culture technologique produits et procédés. Ils doivent donc acquérir des compétences liées aux procédés de fabrication de produits alimentaires afin de pouvoir, plus tard, résoudre les problèmes complexes relatifs à la mise en œuvre de produits ou de systèmes. L'enseignement de matières théoriques comme la Thermodynamique ou les Transferts de chaleur, reste d'autant plus délicat que la majorité des élèves ingénieurs de l'école a des préjugés négatifs vis à vis de cet enseignement, sans doute parce que ceux-ci sont pour la plupart issus de formations préparatoires à connotation biologique. Leur transmettre les bases fondamentales nécessaires à la compréhension des phénomènes physiques et à leur formalisation, notamment mathématique, représente un challenge auquel est confronté l'ensemble des enseignants chercheurs du département GPA. L'illustration des concepts théoriques par des exemples concrets devient ainsi nécessaire mais ne doit pas occulter les concepts de base qui constituent le socle du Génie des Procédés. On pense notamment aux notions de bilans (matière, énergie et quantité de mouvement) qui sont exposées dans ces cours plus fondamentaux de 1^{ère} année et aux équations fondamentales de transfert qui en découlent. Des outils de simulation dédiés recherche tels COMSOL Multiphysics® peuvent ainsi être utilisés pour offrir une visualisation des résultats théoriques. Ils montrent également aux étudiants le formalisme rigoureux inhérent à toute modélisation mécanistique. Au fur et à mesure de l'avancée dans le cursus, les enseignements se veulent plus spécifiques et de nouvelles notions apparaissent parfois (l'électromagnétisme pour l'Électrothermie Innovante par exemple). Là encore, l'étudiant sera d'autant plus réceptif qu'il comprendra la finalité de l'enseignement proposé. Le recours à des exemples et résultats (non confidentiels) issus de contrats de collaboration avec des industriels est alors un plus.

Cet exercice délicat d'illustration peut donc être alimenté par des résultats issus de travaux de recherche mais aussi par les méthodologies utilisées pour obtenir ces résultats. Dans chaque enseignement j'essaie ainsi de donner aux étudiants le goût de la démarche scientifique. Si celle-ci repose classiquement sur plusieurs étapes – 1) définition de la problématique, 2) émission d'hypothèses, 3) documentation et expérimentations, 4) analyses des résultats, 5) conclusion – je leur montre que cette démarche n'est pas linéaire. Si la description du ou des problèmes précède généralement l'émission d'hypothèses qui doivent être cohérentes et argumentées (d'où l'importance des sciences fondamentales) l'analyse de la bibliographie puis celle des résultats issus d'expérimentations (au sens large) pourra par exemple impliquer la reformulation du problème lui-même. Toutes ces notions sont particulièrement vues lors des encadrements de projets (2^{ème} et 3^{ème} année) et aussi dans le cadre d'enseignements spécifiques ayant trait à la modélisation.

Concrètement, il s'agit donc de rendre acteur l'étudiant, d'attiser sa curiosité, de susciter sa réflexion... qu'il comprenne plutôt qu'il apprenne (par cœur) – les corrélations donnant le nombre de Nusselt en fonction de paramètres adimensionnels dans les cours de Transferts de Chaleur en sont un exemple frappant. Intéresser un étudiant avide de recettes – pas forcément un comble pour quelqu'un qui se destine aux métiers de l'agroalimentaire – à la complexité des phénomènes physiques propres aux procédés alimentaires reste une entreprise difficile. Appuyer son enseignement sur des résultats ou

exemples issus d'une recherche à finalité industrielle fait partie des moyens mis en œuvre pour parvenir à cette fin.

Liens entre enseignement et recherche

Les liens entre activités de recherche et enseignement peuvent être explicites. Les techniques expérimentales que j'ai pu développer lors de mes travaux de recherche sur les méthodes de mesure des propriétés thermophysiques de produits alimentaires (programme européen 'Bugdeath²') ont par exemple servi de base à l'élaboration du cours donné en 3^{ème} année. L'enseignement portant sur les traitements micro-ondes bien qu'antérieur à mes activités de recherche sur ce sujet, bénéficie maintenant de mon expérience accumulée dans ce domaine depuis 10 ans (co-encadrement de 4 thèses et de plusieurs Master). Des projets réalisés en 2^{ème} année et 3^{ème} année concernent également les traitements micro-ondes (une dizaine de projets à ce jour). L'enseignement portant sur l'Efficacité Énergétique que j'ai construit pour les Ingénieurs 2^{ème} année est en relation avec mon implication dans certains programmes ANR. L'ensemble de ces enseignements a notamment bénéficié des idées débattues dans un groupe de réflexion sur l'Efficacité Énergétique qui s'est réuni entre 2009 et 2011 sous l'égide du groupe thématique Énergie de la Société Française de Génie des Procédés. L'objectif de ce groupe était la création d'un Benchmark pour sensibiliser les ingénieurs process aux concepts d'intégration énergétique. Outre Michel Havet et moi-même pour ONIRIS, ce groupe était constitué de partenaires académiques (ENSIACET, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Chalmers University of Technology), de centres techniques (TECALIMAN, Centre Technique du Papier), d'industriels tels Veolia et EDF, de l'ADEME et d'un éditeur de logiciels dédiés (ProSIM).

Le lien Recherche – Enseignement est aussi présent lors de l'encadrement des projets Ingénieurs 3^{ème} année. Ces projets sont constitués d'une phase bibliographique réalisée au S9 entre octobre et décembre, suivie de 2 mois et demi de phase pratique dans nos locaux. Les sujets de ces projets sont souvent en rapport avec des thèmes de recherche émergents ou déjà existant au laboratoire et de plus en plus reliés à des collaborations de recherche avec des industriels. Sur les 11 projets déjà encadrés, 3 ont concerné les applications micro-ondes, 2 se sont intéressés aux applications de l'électroconvection, 2 étaient en relation avec le projet BRAISE³, 2 encore avec les projets CRYOMAX et CRYOMASS⁴ et l'un portait sur le chauffage ohmique.

Si la frontière entre enseignement et recherche est perméable il faut bien différencier la finalité de chacune des deux activités. Les projets d'étudiants dont les sujets s'inscrivent dans le cadre de contrats de recherche sont bien à vertu pédagogique, l'étudiant est la cible et la recherche le support. Dans certains cas pourtant, ces projets peuvent servir pour la mise au point de protocoles de mesures ou pour des études de faisabilité. Un sujet que j'ai proposé en 2008 intitulé '*Économie d'énergie lors de la cuisson du pain grâce à l'utilisation des micro-ondes et de l'infrarouge*' a par exemple participé à la mise en place du projet BRAISE.

Les liens entre recherche et enseignement peuvent être plus subtils. Mes activités de recherche ont ainsi participé aux réflexions qui ont donné lieu à la nouvelle mouture de la dominante 3^{ème} année (PEPS) de la rentrée 2015. Autrefois constituée d'un tronc commun associé à deux voire trois parcours spécialisés, la formation se veut aujourd'hui plus cohérente car centrée autour d'un projet de conception d'installations industrielles pour l'élaboration d'un ou de plusieurs produits et où toutes les composantes de la dominante devront être utilisées. Une similitude existe entre les enseignements dispensés et mes activités de recherche dans la notion d'échelle, essentiellement spatiale. L'accent est

² Bugdeath: Predicting microbial death during heat treatments on foods', 5^{ème} PCRDT, 2001-2004

³ BRAISE 'Boulangerie RAISONnée et Efficacité énergétique', ANR ALIA, 2009-2013

⁴ Projets avec partenaire privé portant sur la cryogénie, 2010-2013

notamment porté sur la nécessité de relier les phénomènes physiques à l'échelle du produit (Modélisation Multiphysique) au dimensionnement des procédés (Électrothermie innovante) puis à une échelle encore supérieure qui est celle d'un atelier de production voire de l'usine (Éco-conception des Procédés). Comme on le verra dans les chapitres suivants, on retrouvera ces notions d'échelles spatiales et temporelles différentes dans l'axe Ingénierie de l'Énergie du GEPEA et dans une moindre mesure, dans mes propres activités de recherche.

III. Activités de recherche

III.1. Cadre structurel des activités de recherche

Le GEPEA

Mes activités de recherche sont menées au sein du laboratoire '**Génie des Procédés, Environnement et Agroalimentaire**' (GEPEA); unité mixte de recherche associée CNRS depuis le 1^{er} janvier 2002 (UMR CNRS 6144). Dirigée par Jack Legrand, professeur de l'Université de Nantes, cette unité comprend, outre une partie d'ONIRIS, le Laboratoire de Génie des Procédés de St-Nazaire (Université de Nantes) et le Département des Systèmes Énergétiques et Environnement de l'École des Mines de Nantes. Les objectifs du GEPEA sont d'une part de mettre au point des méthodologies pour l'étude des phénomènes physiques liés au Génie des Procédés (écoulement/transfert/séparation/réaction...) et d'autre part de développer des interfaces entre Génie des Procédés, Chimie, Biochimie et Biologie pour traiter des problématiques liées à l'Environnement, à l'Énergie, à l'Agroalimentaire et à la Valorisation des Substances notamment celles issues du Monde Marin. Pour ce faire, la recherche dans cette unité est organisée autour de 4 axes :

Ingénierie de l'Environnement,

Ingénierie de l'Énergie,

Matrices et Aliments : Procédés, Propriétés, Structure, Sensoriel (MAPS²),

Bioprocédés et Séparation en Milieu Marin.

L'UMR comptait, en juin 2015, **213** personnes et parmi elles, **80** enseignants-chercheurs et chercheurs titulaires (dont 38 HDR), **4** enseignants-chercheurs associés, **32** personnels administratifs et techniques, **88** doctorants et **13** post-doctorants, enseignants-chercheurs invités et ATER. Cet effectif peut être comparé à celui de 2006 qui comportait 50 enseignant-chercheurs, 42 personnels administratifs et techniques, 75 doctorants et 11 post-doctorants, enseignants-chercheurs invités et ATER. Fort de cette évolution croissante, le laboratoire représente le plus grand laboratoire de Génie des Procédés de l'Ouest et le 3^{ème} pôle français en Génie des Procédés. Il a été noté **A+ par l'AERES** en 2010 et bénéficié d'une **excellente expertise** de la part de l'**HCERES** début 2016.

Mes activités de recherche s'inscrivent principalement dans l'axe '**Ingénierie de l'Énergie**', qui comportait, en juin 2015, **18** enseignants-chercheurs et chercheurs. Créé en 2008, j'en ai assumé pendant plus d'un an la co-responsabilité avec Mohand Tazerout de l'École des Mines de Nantes. Suite au souhait de ce dernier de quitter la direction de l'axe, Michel Havet a pris la responsabilité de cet axe en mai 2010. Ce choix a été fait pour des raisons de visibilité externe - M. Havet étant professeur - et il a été décidé qu'il n'y aurait plus de co-responsable ou d'adjoint. Durant mon implication dans la direction de l'axe nous avons défini avec M. Tazerout et des collègues d'ONIRIS, les 3 thématiques de l'axe dont la problématique repose sur l'optimisation des systèmes énergétiques en interaction avec leur environnement. Si l'une des thématiques concerne les procédés de valorisation énergétique des

résidus, mon activité de recherche se développe plus particulièrement dans les 2 autres qui sont : **l'Intensification des transferts dans les procédés** et les **Stratégies d'utilisation de l'énergie**. On pourra dans ces 2 axes différencier plusieurs échelles spatiales et temporelles. Le premier s'intéressera essentiellement aux petites échelles, celles du procédé ou du produit et concernera des échelles de temps courtes (de la seconde à l'heure). Le second portera sur des stratégies qui s'étendront des procédés jusqu'au territoire (ville, pays) et donc concerneront une vaste échelle spatio-temporelle.

Structures connexes

Le GEPEA participe à des fédérations de recherche comme l'Institut Universitaire Mer et Littoral (IUML, FR CNRS 3473), la fédération Ingénierie des Biopolymères pour la Structuration de Matrices et de Matériaux (IBSM) et l'Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville (IRSTV). D'autre part, afin de renforcer sa visibilité régionale et nationale dans le domaine de l'agroalimentaire, le GEPEA a formé, avec le laboratoire Biopolymères, Interactions, Assemblages (BIA) du centre INRA Angers-Nantes, la Structure Fédérative de Recherche (SFR) dans le domaine de l'Ingénierie des Biopolymères pour la Structuration des Matrices et des matériaux (IBSM), créée le 1^{er} janvier 2012. Principalement localisé sur le site de la Géraudière, cette structure bénéficie de la complémentarité des 2 unités BIA et GEPEA et comporte 3 axes :

- Mécanismes d'élaboration des matrices alimentaires et des agro-matériaux : maîtrise et adaptation des procédés
- Fonctionnalités sensorielles et nutritionnelles : dynamique des matrices alimentaires
- Axe transversal : intégration et modélisation

Mes activités de recherche sont affichées dans ce dernier axe transversal. La SFR IBSM permet tout d'abord de formaliser les collaborations existantes entre le GEPEA et BIA et d'en initier d'autres. Elle a pour objectif également de faciliter le développement de coopérations avec d'autres structures de recherche régionales et nationales.

III.2. Intégration dans des programmes de recherche et collaborations – activités d'encadrement et reconnaissance internationale des compétences.

Mes activités de recherche se font le plus souvent dans le cadre de divers programmes financés qui vont du programme européen à la collaboration industrielle pure. J'ai ainsi participé à 4 programmes européens (1 en cours). Je me suis également impliqué dans 6 programmes nationaux (2 en cours) et parmi les 8 collaborations réalisées avec des partenaires industriels, 5 concernent des projets dont j'ai été le porteur. Ces différentes activités sont listées en annexe A1.

Ces activités de recherche se font grâce à l'encadrement de doctorants et de master. A ce jour, je comptabilise un peu plus de **290% de taux d'encadrement** dispersé sur **8 thèses**, dont 2 en cours. 3 thèses se rapportent à des programmes européens, 4 thèses ont bénéficié de financements Région dont l'une en partenariat avec le CNRS et 1 thèse d'un financement CIFRE.

J'ai également participé à l'encadrement d'une quinzaine d'étudiants en Master 1 et 2. Bien qu'il soit plus difficile de déterminer le parcours de ces étudiants, parmi les Master 2, 4 ont poursuivi en thèse (M. Yataghene, S. Curet, A. Rzigue et T-M. Giang) les autres ayant en premier lieu choisi des carrières dans le privé. Pour certains sujets de recherches, j'ai aussi encadré du personnel contractuel (ingénieur et post-doctorants). L'ensemble de ces activités d'encadrement est détaillé en annexe A2.

III.3. Valorisation du travail de recherche

La valorisation de mon travail de recherche s'effectue en partie à travers des communications scientifiques, dans des revues internationales de rang A ou dans des congrès, sous forme de

communications orales ou par le biais d'affiches. Certaines études ont également fait l'objet d'articles dans des revues professionnelles spécialisées, tandis que les rapports de fin de contrat témoignent des collaborations réalisées avec les entreprises. Les journaux de rang A dans lesquels sont publiés les articles concernent principalement le Génie des Procédés appliqué, pour la plupart, au domaine alimentaire. L'analyse bibliométrique réalisée mi-août 2016, grâce à Web of Science™ et portant sur les publications antérieures à 2016, donne un h-index de 9 et un nombre de citations annuelles présenté sur la Figure 2. Pour information le site Google Scholar donne quant à lui un h-index de 12.

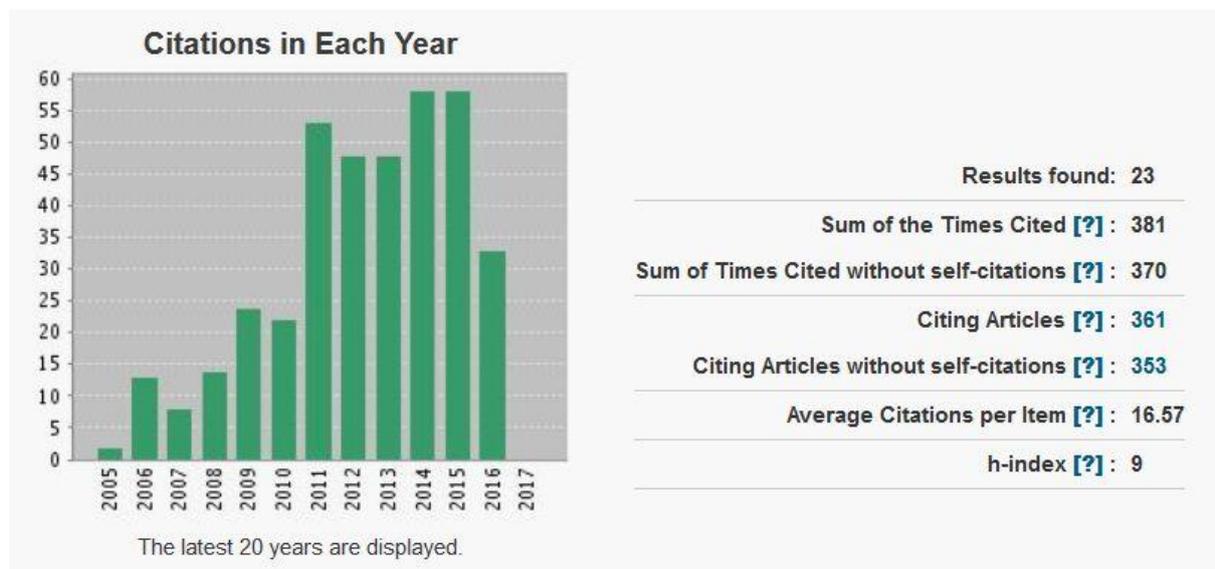


Figure 2. Capture d'écran du bilan annuel des citations au 17 août 2016, donné par Web of Science™

D'un point de vue purement comptable, le nombre d'articles dans des revues de rang A s'élève en septembre 2016 à 25 et celui dans des revues nationales spécialisées est de 9. 57 communications ont été présentées dans des congrès nationaux et internationaux, dont 42 sous forme orale, 11 ayant été présentées par mes soins. A noter que 2 communications ont été agrémentées d'un prix : le prix du meilleur article (Best Paper Award) lors de FoodOPS 2015 et le prix Biot-Fourier au dernier congrès français de thermique en 2016. Ces diverses valorisations sous forme écrite sont détaillées en annexe A3. Dans cette annexe figurent également mes activités de relecture pour des journaux de rang A.

III.4. Bilan synthétique des activités – contexte scientifique et partenariats

Mes activités de recherche se sont développées et enrichies au sein du GEPEA depuis 2002. Consacrées au thème Aéronautique pendant ma thèse, elles se sont progressivement orientées vers les phénomènes de Transferts de Chaleur et de Matière avec une forte notion applicative. Dans un contexte global de diminution des consommations énergétiques, l'orientation prise par mes activités de recherche porte sur l'intensification des Transferts dans le domaine du Génie des Procédés Alimentaires, avec une spécialisation dirigée vers les méthodes d'intensification actives utilisant l'électricité (micro-ondes, électrohydrodynamique et chauffage ohmique). La démarche scientifique adoptée s'appuie sur une utilisation simultanée de l'expérimentation et de la modélisation. Pour cette dernière, nous utilisons des logiciels de calculs commerciaux (MATLAB®, COMSOL Multiphysics®) de plus en plus performants. La maîtrise de ces outils complexes est nourrie par les nombreux échanges existant entre chaque

utilisateur du laboratoire ou d'ailleurs (collaborations nationales et internationales). Quant au travail expérimental, il consiste généralement à développer un dispositif à l'échelle du laboratoire, parfois à mettre au point des systèmes de mesures adaptés et toujours à traiter de manière cohérente les données extraites (par le développement et l'utilisation de routines MATLAB® par exemple).

La Figure 3 représente l'ensemble de mes activités de recherche retracées de manière chronologique, classées suivant les grandes thématiques abordées. A chaque thématique se rapportent les éventuels projets auxquels j'ai pu participer ainsi que les encadrements de thèses et de masters (*M.*) et les collaborations avec des chercheurs étrangers (*coll.*). Avant de détailler mes activités de recherche dans la partie suivante, on peut voir que l'activité 'micro-ondes' du laboratoire a atteint une certaine maturité et est maintenant reconnue à l'extérieur, comme en témoignent les différentes collaborations scientifiques entamées avec l'INRA et l'Université d'Oran (K. El Mecherfi) ou avec les différents partenaires des projets nationaux et internationaux (SP Food dans le cadre de Freeze-Wave⁵) et les diverses sollicitations industrielles (thèse Cifre + contrats). Cette activité s'insère dans une thématique plus générale qui concerne l'intensification par champs électromagnétiques et électriques. Je travaille ainsi depuis peu sur le chauffage ohmique qui, à l'instar des micro-ondes, génère une puissance volumique au sein du produit et ne nécessite donc pas le chauffage d'un fluide extérieur. Mes travaux concernent également l'amélioration des transferts par électroconvection où cette fois ci, l'énergie apportée par l'électricité est convertie en énergie cinétique via la création d'un vent 'ionique'. On notera dans la Figure 3 les activités annexes liées à la microencapsulation qui, bien qu'enrichissantes d'un point de vue scientifique (phénomènes de transferts complexes tant à simuler qu'à mesurer), ne rentrent pas dans le cadre du projet de recherche que je me suis fixé.

Se situer dans l'environnement national et international de la recherche est toujours délicat tant il reste difficile de lister de manière exhaustive l'ensemble des laboratoires et instituts qui ont travaillé sur des sujets similaires. On pourra néanmoins citer au niveau national l'UMR 1145 Genial (AgroParisTech et INRA), précisément l'équipe SP2 notamment pour la modélisation et les approches multi-échelles - avec qui il serait intéressant de collaborer pour leur démarche d'ingénierie inverse ainsi que certaines unités de recherche de l'IRSTEA, comme GPAN (Génie des Procédés Frigorifiques) pour leur expertise en procédés frigorifiques. Dans une moindre mesure – car moins tourné vers la recherche - les centres techniques comme le CTCPA, notamment celui d'Avignon pour l'utilisation à l'échelle industrielle de technologies innovantes, pourraient être des partenaires cohérents pour le dépôt de projets collaboratifs. Au cours de mes activités de recherche, plusieurs liens ont été tissés avec différents organismes comme le LTN (projets ENERGIAL⁶, BRAISE et PERLE2⁷) pour leurs compétences en énergétique, le centre INRA de Nantes-Angers (BRAISE, IAFAPOM⁸) pour les produits de panification et les protéines laitières, l'INRA de Theix (Bugdeath) pour les transferts, le LIMATB de Lorient – depuis peu IRDL – (BRAISE) pour les applications micro-ondes et infrarouge, le GIPSA-lab de Grenoble (Plug & Play⁹, BRAISE) pour l'automatique. D'autres collaborations ont vu le jour, celles-ci plus personnelles car sur des projets plus petits, impliquant beaucoup moins de partenaires. J'ai ainsi bénéficié de l'aide précieuse de T. Pham de l'Université de New South Wales pour la modélisation d'un procédé frigorifique, et j'ai pu travailler étroitement avec E. Bardy du Grove City College sur l'évaluation de l'efficacité énergétique des procédés de séchage électroconvectif. Bien évidemment, il

⁵ Freeze-Wave 'Innovative and low energy microwave assisted freezing process for high quality foods', 7^{ème} PCRD, 2015-2018

⁶ ENERGIAL, Programme Interdisciplinaire Énergie du CNRS, 2007-2008

⁷ PERLE2 'Pôle d'Excellence de la Recherche Ligérienne en Énergie', programme régional, 2011-2014

⁸ IAFAPOM 'Improvement of Acceptability of Foods of Animal and Plant Origin by the combination of Microwaves with proteolytic treatment', programme régional CAP-Aliment, 2016-2017

⁹ Capteurs Logiciels Plug & Play, ANR Blanc, 2008-2011

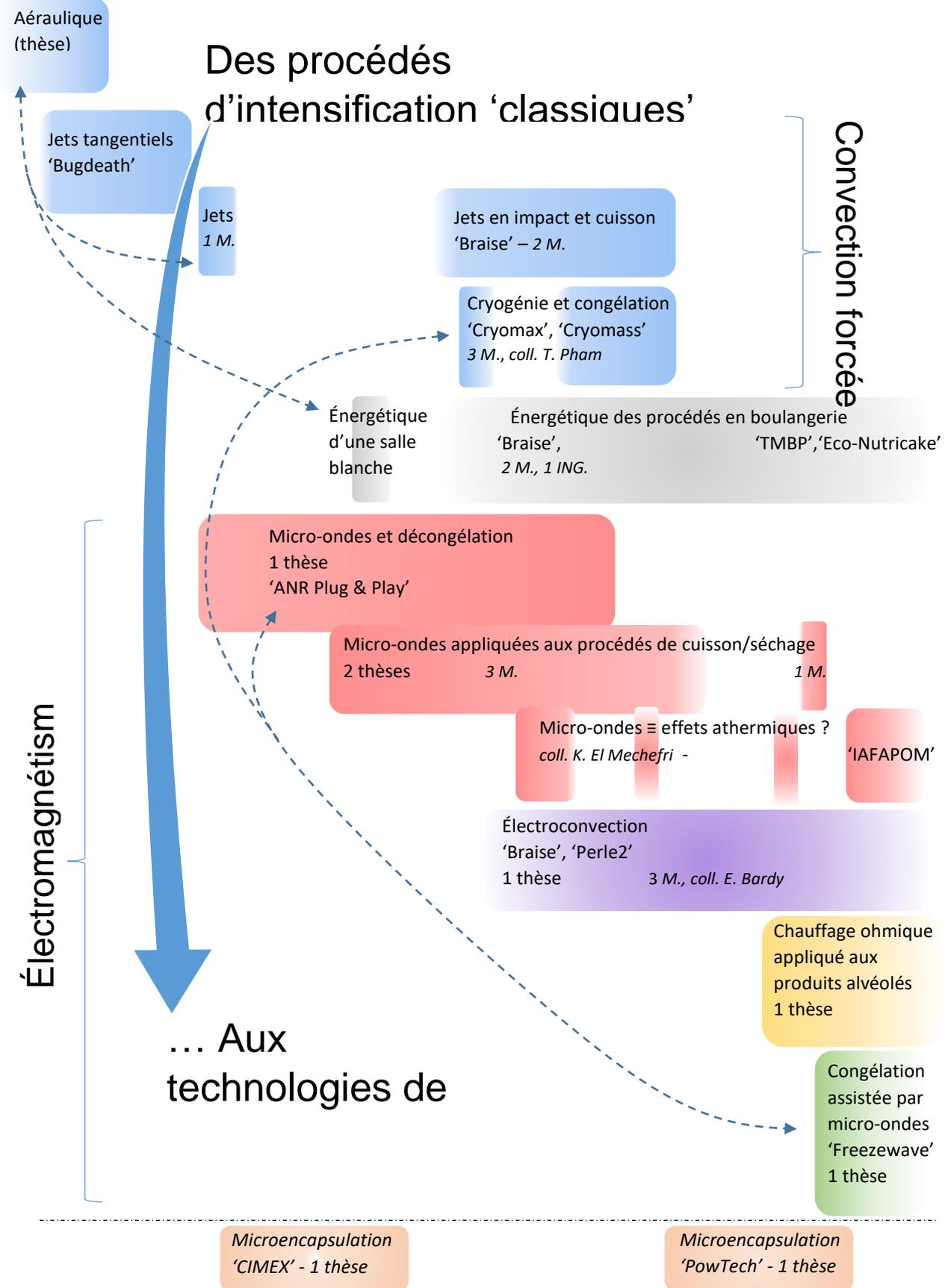


Figure 3. Bilan chronologique des principales actions de recherche menées depuis la soutenance de thèse

ne faut pas oublier les collaborations internes qui permettent de rendre cohérentes mes activités de recherche en les inscrivant dans une perspective plus générale portant sur l'amélioration des procédés de transformation des produits alimentaires : M. Havet (énergie, transferts, électroconvection), L. Boillereaux (automatique, énergie, micro-ondes), S. Curet (micro-ondes) de l'axe Ingénierie de l'Énergie et S. Chevallier (produits, analyse d'images), V. Jury et A. Le-Bail (produits de panification, transferts) de l'axe MA(PS)². Plusieurs équipes internationales nourrissent, par leurs travaux, les réflexions, les idées, les orientations prises par notre équipe lors de l'étude de certains procédés. Pour les applications micro-ondes et la modélisation des transferts couplés, on trouvera de précieuses informations dans les travaux de A. K. Datta de l'Université de Cornell (Datta and Anantheswaran, 2001) et dans ceux de l'équipe de T. Basak de l'Indian Institute of Technology Madras en Inde (Basak and Ayappa, 1997; Bhattacharya and Basak, 2006; Chandrasekaran et al., 2013). L'Université de McGill au Canada, avec V. Raghavan par exemple, travaille également beaucoup sur les technologies électriques (Singh et al., 2012; Venkatesh and Raghavan, 2004) et H. Ramaswamy a notamment publié, en collaboration avec S. Sastry de l'Ohio State University et M. Marcotte (Centre de Recherche et Développement d'Ottawa, Agriculture et Agroalimentaire Canada), un livre de référence sur le chauffage ohmique (Ramaswamy et al., 2014). Pour les applications liées au vent ionique on pourra encore se tourner vers le Canada avec les travaux de A. Martynenko et T. Kudra (Martynenko and Kudra, 2016) et K. Adamiak (Zhao and Adamiak, 2016) pour la partie plus théorique. En ce qui concerne les combinaisons de technologies, on trouvera dans une revue récente (Lee et al., 2016) un tableau regroupant les dernières études sur ce sujet, où l'on peut voir que des universités en Thaïlande et en Turquie font montre d'une activité importante, notamment en combinant micro-ondes, infrarouge et convection.

Mes activités de recherche sont détaillées dans la partie suivante. Elles constituent, je l'espère, une contribution à cette communauté de chercheurs qui s'intéresse aux procédés alimentaires innovants permettant d'intensifier les transferts.

Présentation des activités de recherche :
Intensification des transferts

I. Intensification des transferts par convection forcée

I.1. Préambule

Les trois études présentées dans cette première partie traitent de l'intensification des transferts thermiques réalisée en modifiant les caractéristiques des écoulements du fluide circulant autour des produits à traiter. Cette modification est soit d'ordre fluïdique (augmentation des vitesses du fluide, orientation de l'écoulement principal) soit d'ordre thermique (augmentation de l'écart de température entre le fluide et le solide). La première étude concerne un procédé de séchage/décontamination de surface, la seconde un procédé de congélation et la dernière un procédé de cuisson. Elles associent toutes, mais à des degrés divers, l'expérimentation et la simulation numérique. Si l'une est tournée vers la décontamination, la maîtrise des consommations énergétiques constitue l'un des enjeux principaux des deux autres procédés présentés.

I.2. Intensification des transferts pour la décontamination de surface

Contexte

Les intoxications alimentaires, toujours d'actualité au 21^{ème} siècle, sont dues à des contaminations par des organismes pathogènes que l'on retrouve principalement à la surface des aliments. Afin de décontaminer ces surfaces, on peut appliquer un traitement thermique approprié selon un couple temps/température dépendant de la nature du produit et du microorganisme que l'on souhaite éradiquer. Ces traitements permettent de limiter voire d'éviter l'utilisation d'additifs chimiques ou encore l'emploi de techniques d'irradiation, méthodes de décontamination qui remportent rarement l'adhésion des consommateurs. C'est dans ce contexte que le programme européen Bugdeath a vu le jour. Piloté par le Food Refrigeration and Process Engineering Research Center (FRPERC, Université de Bristol, UK), ce programme européen du 5^{ème} PCRDT regroupait 8 partenaires et avait pour objectif de concevoir des traitements de pasteurisation de surface plus efficaces et d'élaborer des modèles prédictifs de réduction du nombre de microorganismes durant ces procédés. Deux cinétiques de traitement étaient prévues ; l'une lente et 'douce', limitée à 30 min avec l'existence d'un plateau à 60°C, l'autre rapide et 'intense', de 10 s avec un pic de température de surface à 120°C (Figure 4). Pour ce cycle rapide, il était donc nécessaire de concevoir un système capable d'intensifier les transferts de chaleur à la surface du produit. L'originalité de l'étude reposait sur le fait qu'il s'agissait de créer un fort gradient thermique à l'intérieur du produit afin de ne pas cuire celui-ci mais bien d'unique-ment tuer les bactéries à sa surface.

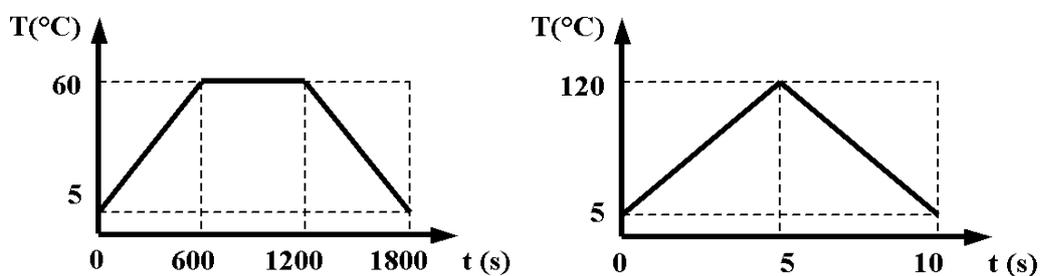


Figure 4. Programmes temps/température prévus pour la surface du produit.

L'ensemble des partenaires s'est orienté vers un démonstrateur capable de souffler, tangentiellement sur la surface du produit, de l'air chaud ou de la vapeur et de l'air froid pour la phase de refroidissement

rapide. Ce dispositif a été réalisé en trois exemplaires par le FRPERC. Destinataires d'un des exemplaires, nous l'avons instrumenté (Foster et al., 2006) pour pouvoir mesurer températures, hygrométries et pertes de masse (Figure 5).

Notre équipe s'est particulièrement intéressée aux traitements d'aliments non poreux par air chaud - le jet d'air chaud pouvait atteindre une température supérieure à 300°C en sortie de buse pour une vitesse moyenne de 20 m/s. Nous avons pour objectif de développer un modèle de transferts couplés masse/chaleur adapté à ce procédé. M. Havet coordonnait un 'Workpackage' intitulé 'Modélisation des transferts' et co-encadrait avec L. Boillereaux et A. Le-Bail la thèse de R. Zuñiga relative à ce sujet. Ces travaux de modélisation ont reçu le soutien appuyé d'A. Kondjoyan de l'INRA de Theix, également partenaire du programme. Pour ma part, arrivé en cours de projet, j'ai participé plus à l'exploitation du modèle qu'à son élaboration proprement dite (Kondjoyan et al., 2006a, 2006b; Zuñiga Ulloa et al., 2007). J'ai par ailleurs été amené à développer des méthodes d'estimation de paramètres (expérimentales et/ou numériques), tels les coefficients globaux d'échange en surface ou encore certaines propriétés thermophysiques comme la conductivité thermique ou la diffusivité massique.

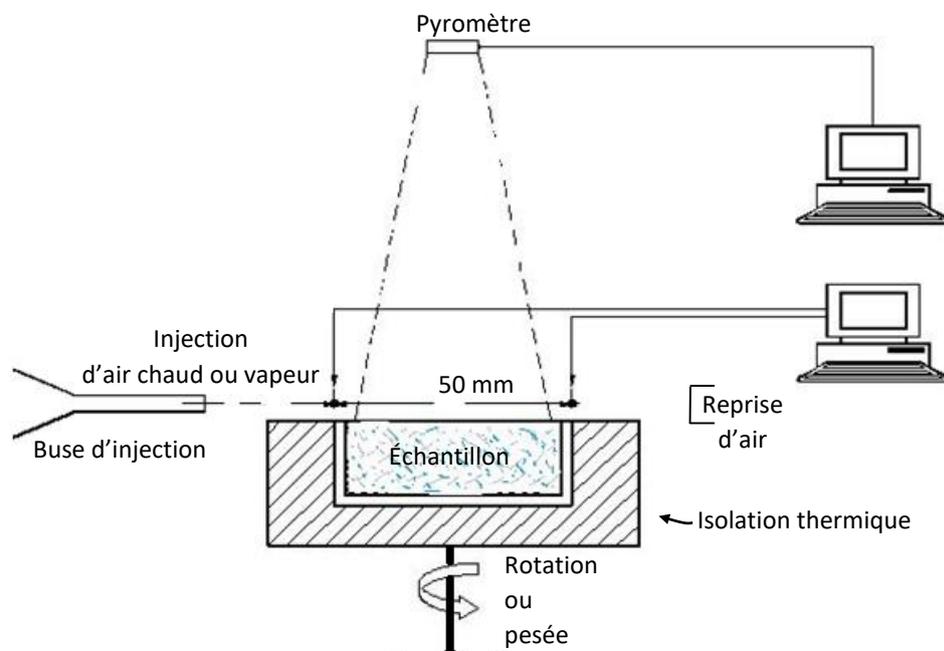


Figure 5. Représentation schématique du dispositif expérimental

Modélisation des transferts de masse et de chaleur

Au cours du traitement par air chaud, la surface est soumise à des échanges de chaleur par convection forcée (jet tangentiel) et par rayonnement. Ces flux engendrent une diffusion de la chaleur de l'extérieur vers l'intérieur et une forte évaporation en surface qui refroidit celle-ci et entraîne une migration de l'eau de l'intérieur vers l'extérieur du produit. De nombreux modèles couplés masse/chaleur existent dans la littérature mais ils sont souvent adaptés à des traitements doux (séchage) de milieux indéformables. Notre application était caractérisée par un traitement potentiellement très rapide et nous souhaitions prendre en compte la rétractation du produit qui avait été observée expérimentalement. Le modèle développé devait également prédire de manière la plus

fiable possible la température de la surface, puisque celle-ci était intégrée dans les modèles prédictifs de destruction microbienne élaborés par les microbiologistes partenaires du projet. La connaissance de l'activité de l'eau en surface était également un paramètre très important à connaître.

Nous avons opté pour une approche intermédiaire entre une formulation lagrangienne dans un repère basé sur la matière sèche et une formulation eulérienne qui suppose l'introduction d'un terme convectif lié au mouvement du solide. Cette démarche consiste à écrire les bilans de conservation dans un volume élémentaire dont les dimensions (en l'occurrence l'épaisseur pour le modèle 1D choisi) sont actualisées à chaque pas de temps. Ainsi, pour l'eau, en introduisant la loi de Fick et en appelant ρ_{MS} la masse volumique apparente de la matière sèche, la teneur en eau base sèche X est décrite par l'équation suivante :

$$\frac{\partial(\rho_{MS}X)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z^*} \left(\frac{\rho_{MS}}{(1+X)} D_{eff} \frac{\partial X}{\partial z^*} \right) \quad (1)$$

D_{eff} représente ici la diffusivité massique, variable dépendant à la fois de la teneur en eau et de la température. La prise en compte de la rétractation a été réalisée en écrivant la conservation de la masse de matière sèche dans un volume de contrôle caractérisé par une épaisseur Δz^* :

$$\Delta z^*(t) = \frac{\rho_{MS}(0)}{\rho_{MS}(t)} \Delta z^*(0) \quad (2)$$

Les conditions aux limites associées au modèle sont basées sur la conservation du flux d'eau en surface supérieure, la surface inférieure étant isolée (gradient de teneur en eau nul) :

$$-\rho_{MS} D_{eff} \frac{\partial X}{\partial z^*} = h_m \frac{M_w}{R} \left(a_w \frac{P_{sat}(T)}{T} - HR \frac{P_{sat}(T_{air})}{T_{air}} \right) \quad (3)$$

Dans cette équation apparaissent la pression de vapeur saturante P_{sat} , l'activité de l'eau a_w en surface de produit, l'humidité relative HR de l'air ainsi qu'un coefficient de transfert de masse h_m traditionnellement relié au coefficient de convection h par l'analogie de Lewis.

Les transferts de chaleur sont décrits de manière classique par la conservation de l'énergie dans le repère déformable. L'évaporation est seulement prise en compte en surface du produit.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z^*} \left(k \frac{\partial T}{\partial z^*} \right) \quad (4)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial z^*} = h(T - T_{air}) - L_w \rho_{MS} D_{eff} \frac{\partial X}{\partial z^*} \quad (5)$$

L_w représente ici la chaleur latente de vaporisation de l'eau, valeur comptée positivement. En surface inférieure des conditions d'isolation thermique était appliquée (gradient de température nul).

Toutes ces équations nécessitent la connaissance de plusieurs paramètres thermophysiques. J'ai notamment, à cette occasion, mis en place une méthode de mesure de la conductivité thermique d'aliments basée sur la sonde à fil chaud (Elustondo et al., 2001; Sweat, 1986). Si cette méthodologie a été appliquée à différents produits (viande de bœuf, poulet, pomme de terre), les traitements thermiques ont surtout été réalisés, à ONIRIS, sur de la pomme de terre, l'INRA de Theix se chargeant des expériences consacrées à la viande. Les propriétés thermophysiques manquantes étaient soit issues de la littérature, soit estimées à partir des données expérimentales.

Analyse des phénomènes physiques

Le modèle développé a permis de caractériser le procédé de décontamination et d'expliquer l'évolution de la température de la surface au cours du traitement (Figure 6). Celle-ci augmente rapidement dans les premiers instants où les phénomènes de convection prédominent. Lorsqu'elle atteint la température de bulbe humide de l'air, la vitesse de montée en température décroît et la courbe est caractérisée par un léger point d'inflexion ($t \approx 5$ s). Durant cette phase, la teneur en eau du produit en surface chute drastiquement et la température reprend ensuite son ascension. Les produits étudiés et notamment la pomme de terre sont des produits très humides et possèdent donc une activité de l'eau proche de 1. La déshydratation intense entraîne une forte diminution de l'activité de l'eau en surface et donc une baisse du flux massique, conséquence de la baisse du gradient de pression. La perte de masse n'est ainsi pas linéaire mais diminue légèrement au cours du traitement.

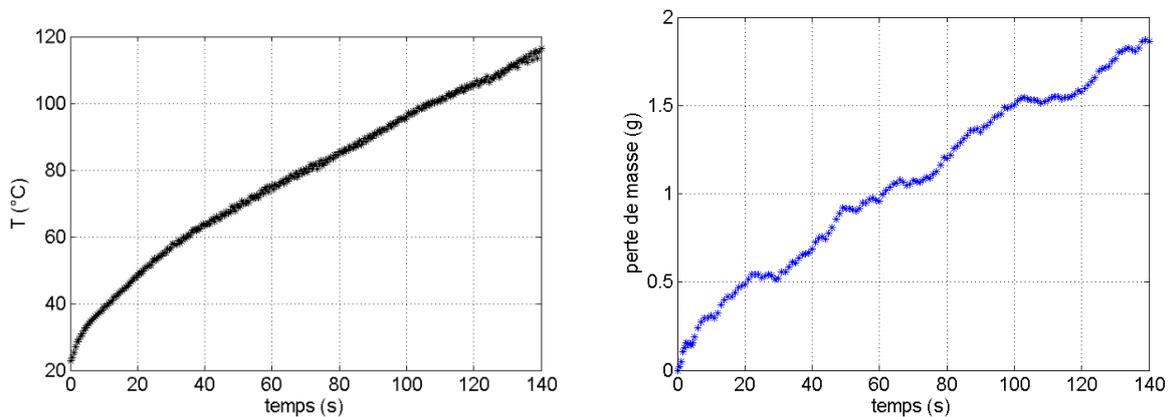


Figure 6. Température superficielle et perte de masse (moyenne glissante) d'un produit soumis à une décontamination par jet d'air ($T_{\text{air}} \approx 300^{\circ}\text{C}$, $HR \approx 0,06\%$) – exemple de résultats sur de la pomme de terre.

Détermination de propriétés thermophysiques par méthodes inverses

Si le modèle a été capable de nous renseigner sur les phénomènes physiques propres à ce procédé de déshydratation, c'est parce que les propriétés thermophysiques ont été définies comme dépendantes de la température et surtout de la teneur en eau. La conductivité, la masse volumique et la chaleur spécifique ont pu être mesurées mais la détermination de la diffusivité massique restait problématique. Nous avons montré qu'il était cependant possible d'estimer sa valeur à partir des données expérimentales. À l'initiative de L. Boillereaux, la méthode de recherche simplex de Nelder-Mead implémentée sous MATLAB® a été exploitée pour déterminer, par méthode inverse, cette diffusivité. Il ressort de la littérature qu'un modèle générique, reposant sur des lois d'Arrhénius, peut être utilisé pour la diffusivité massique :

$$D_{eff} = \left(D_1 \exp\left(\frac{-E_m}{X}\right) + D_2 \right) \exp\left(\frac{-E_0}{RT}\right) \quad (6)$$

La démarche était originale en ce sens que seule la température superficielle était utilisée pour estimer les 4 paramètres D_1 , D_2 , E_m et E_0 . D'autre part, le procédé pouvant être décomposé en 2 phases, le coefficient de convection était estimé au tout début du traitement et la diffusivité dans la deuxième phase, lorsque la diffusion d'eau constituait le paramètre limitant. Les valeurs obtenues pour le coefficient d'échange convectif ont été validées par des mesures réalisées à l'aide d'un échantillon d'aluminium instrumenté et une fois les paramètres de la diffusivité trouvés, l'évolution de la

température de surface obtenue numériquement était logiquement en parfaite adéquation avec les résultats expérimentaux (Figure 7). Les valeurs $D_1 = 0,46 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $D_2 = 1,47 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $E_m = 2,97$ et $E_0 = 15,79 \text{ kJ/mol}$ ont été indirectement validées pour ce cas de référence ($T_{\text{air}} \approx 180^\circ\text{C}$, $\text{HR} \approx 0,5\%$) quand les pertes de masses mesurées ont été comparées à celles prédites par le modèle (Figure 8).

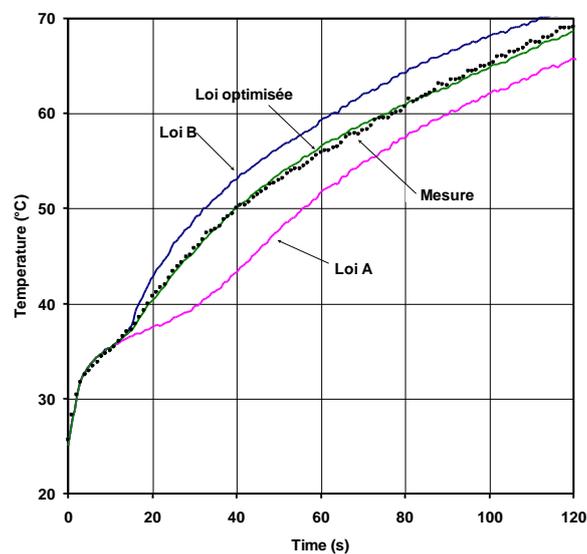


Figure 7. Températures superficielles expérimentale et prédite par notre modèle (loi optimisée), comparées à des prédictions numériques utilisant des lois de diffusion de la littérature (loi A : Maroulis, Kiranoudis, and Marinos-Kouris 1995 et loi B : Zogzas and Maroulis 1996) - $T_{\text{air}} \approx 130^\circ\text{C}$, $\text{HR} \approx 0,5\%$, produit = pomme de terre.

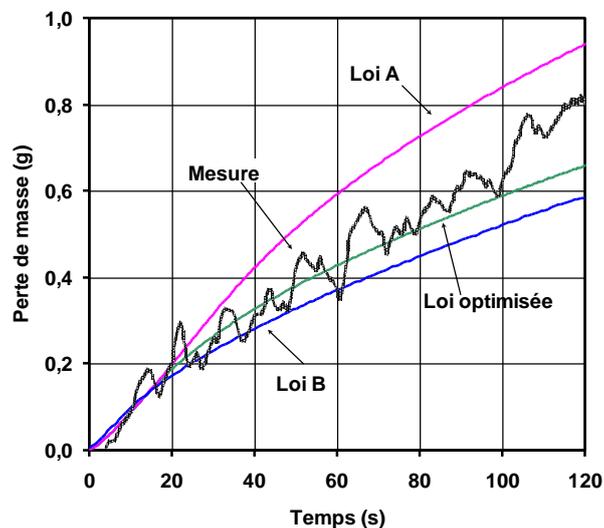


Figure 8. Pertes de masse expérimentale et prédite par notre modèle (loi optimisée), comparées à des prédictions numériques utilisant des lois de diffusion de la littérature (loi A : Maroulis, Kiranoudis, and Marinos-Kouris 1995 et loi B : Zogzas and Maroulis 1996) - $T_{\text{air}} \approx 130^\circ\text{C}$, $\text{HR} \approx 0,5\%$, produit = pomme de terre.

Le modèle a ensuite été utilisé pour prédire températures et pertes de masse dans d'autres conditions externes (variation de la température d'air notamment). Bien que les résultats aient été satisfaisants l'exploitation du modèle a mis en évidence une forte influence des conditions externes sur les

paramètres de la loi de diffusivité interne. Des hypothèses encore trop restrictives, comme une rétraction linéaire monodimensionnelle ou un coefficient de transfert de masse obtenu par l'analogie de Lewis, pourraient être à l'origine de cette sensibilité observée.

Le modèle développé a cependant montré tout son intérêt lorsqu'il a été utilisé comme simulateur du procédé de décontamination puisqu'il est capable de prédire les températures superficielles et internes d'un produit quelconque ainsi que la perte de masse subie, à condition de connaître ses propriétés physiques et thermiques. L'utilisation de ce simulateur associée à des mesures appropriées permet également d'estimer l'activité de l'eau en surface du produit (Kondjoyan et al., 2006a). La pertinence du modèle étant validée, une loi de commande a été ajoutée à celui-ci, permettant de contrôler efficacement le suivi d'une éventuelle température de consigne (Zuñiga Ulloa et al., 2006). Si des contraintes techniques n'ont pas permis de mettre en œuvre cette loi de commande, son efficacité a été vérifiée sur simulateur. Ce dispositif permet ainsi de modifier la température d'air pour que la température superficielle du produit suive une trajectoire imposée.

Conclusion

Les travaux réalisés durant ce programme m'ont permis d'appréhender pour la première fois la simulation numérique des transferts de masse et de chaleur à l'intérieur d'un aliment. Le modèle développé sous MATLAB® par (Zuñiga Ulloa, 2005) a pu être exploité pour la prédiction de la destruction microbienne et a également servi à l'élaboration d'une loi de commande. En plus de prédire la température superficielle, l'intérêt du modèle est qu'il donne accès à des données non mesurables en temps réel comme la teneur en eau en surface et l'activité de l'eau. Il a également montré que lors de traitements intenses, les gradients de teneur en eau sont très importants en surface du produit, ce qui par ailleurs impose une discrétisation spatiale très fine dans cette région (de l'ordre du micron).

1.3. Intensification des transferts lors de la congélation

Contexte

La congélation rapide d'un produit alimentaire est souvent synonyme de gage de qualité car elle engendre la formation de cristaux de glace plus petits, réduisant ainsi la détérioration des structures cellulaires de l'aliment. Les problèmes de pertes de masse par évaporation existent également dans les procédés de congélation. Ces pertes peuvent être diminuées en raccourcissant les temps de traitement et donc là encore en intensifiant les transferts thermiques entre le fluide froid et le produit que l'on désire congeler. Si le procédé de congélation est intensifié, texture, saveurs et qualités nutritionnelles sont ainsi a priori préservées après décongélation. Plutôt que d'augmenter le coefficient global d'échanges, on peut dans certaines conditions augmenter l'écart de température entre le produit traité et l'environnement. C'est ce qui permet l'usage de la cryogénie.

L'objectif initial de cette étude, réalisée en partenariat avec un industriel italien (SOL Group) était de caractériser un tunnel de surgélation cryogénique breveté par ce même partenaire. Cette collaboration qui s'est étendue sur à peu près 3 années nous a également permis de mettre au point un modèle de transfert masse-chaleur adapté aux conditions particulières d'une congélation cryogénique. L'idée n'était pas tant d'expliquer les phénomènes complexes de cristallisation lors d'une congélation rapide mais bien d'obtenir un modèle, le plus simple possible, capable de prédire le temps de congélation ainsi que la perte de masse engendrée par la congélation d'un produit non emballé. Le modèle était ensuite utilisé pour comparer différents procédés de congélation d'un point de vue énergétique.

Caractérisation d'un tunnel cryogénique

Ce travail a été pour nous l'occasion d'élaborer des stratégies pour qualifier les transferts de chaleur dans un tunnel, c'est-à-dire lors d'un traitement continu. Il s'agissait de comparer deux technologies de tunnel de surgélation, l'une classique, l'autre développée par le partenaire industriel. Un tunnel de surgélation cryogénique dit 'conventionnel' est généralement équipé de ventilateurs qui ne font que brasser le gaz froid et d'un extracteur situé au niveau de l'entrée des produits – ce qui permet de générer un écoulement à contre-courant. La technologie développée par la société SOL utilise deux extracteurs disposés aux extrémités et un système de ventilation différent : celui-ci est constitué de ventilateurs qui fonctionnent de manière inversée (circulation du gaz du bas vers le haut) et qui sont munis de déflecteurs renvoyant le gaz froid sur le produit. Les études expérimentales ont été réalisées sur un dispositif de tunnel qui pouvait aisément passer d'une configuration à l'autre. Pour cette étude nous avons développé différentes formes géométriques (Figure 9) grâce auxquelles ont pu être mesurés les coefficients d'échanges pour une température de consigne de tunnel de -80°C . Ces objets métalliques disposaient d'un système de chauffage par effet Joule qui permettait d'effectuer des mesures en régime permanent en différentes positions du tunnel. Plusieurs thermocouples étaient insérés dans chaque objet et les températures obtenues, variant très peu spatialement, ont validé l'hypothèse d'un phénomène thermique à nombre de Biot très faible. D'autres dispositifs ont été élaborés : des cylindres en aluminium posés sur des aiguilles équipées de thermocouples ont permis d'estimer le coefficient de transfert de manière plus locale et ces mêmes formes ont été déclinées dans un autre matériau – de la tylose, un gel de méthylcellulose constitué à 87% d'eau - pour pouvoir calculer des temps de congélation (Figure 10). Pour finir, des tests de congélation ont également été réalisés sur des produits réels (jus de pomme en briques).



Figure 9. Pièces d'aluminium instrumentées pour l'évaluation des coefficients de transferts de chaleur dans le tunnel.

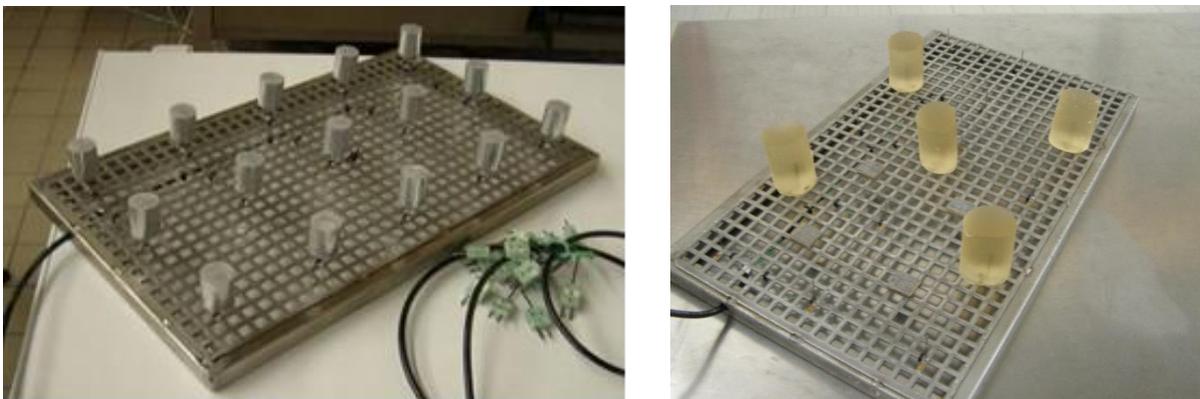


Figure 10. Cylindres posés sur un support instrumenté et cylindres de gel de méthylcellulose (tylose) disposés sur le même support.

Une caractérisation complète des tunnels a ainsi pu être réalisée. Les résultats ont montré qu'avec des déflecteurs et une circulation de gaz inversée, l'écoulement était canalisé par endroit, induisant une distribution de coefficients d'échanges beaucoup plus hétérogènes que dans une configuration conventionnelle (Gibeaud et al., 2010) avec des valeurs comprises entre 60 et 120 W.m⁻².K⁻¹. Le tunnel développé par SOL Group s'est avéré globalement plus performant en termes d'efficacité frigorifique – les consommations d'azote étaient mesurées à chaque expérimentation. En extrapolant les résultats à des conditions normales de fonctionnement nous avons pu montrer que la consommation d'azote par kg de produit pouvait être réduite de 25% par rapport à une surgélation dans un tunnel conventionnel et que la consommation électrique des ventilateurs était diminuée de 45% environ. Ces améliorations notables étaient liées à l'optimisation de l'aérodynamique au sein du tunnel et à une bonne gestion des systèmes d'extraction.

Au-delà des résultats portant sur l'efficacité d'un système d'intensification dédié à la congélation, cette étude nous a permis de développer une certaine expertise dans la mesure des performances d'installations frigorifiques (Le Bail et al., 2014). Les résultats ont par ailleurs montré l'influence de la forme géométrique sur les valeurs des coefficients d'échanges et la difficulté d'extrapoler des méthodes utilisables en laboratoire (écoulement maîtrisé, température de fluide constante) à des installations industrielles (écoulement peu maîtrisé, température de fluide variable en temps et en espace...).

Développement d'un modèle de transfert dédié à la congélation

Pour aller plus loin dans l'analyse des améliorations apportées par ce type d'intensification, nous avons décidé de développer un modèle associant transferts de chaleur et transferts de masse. Les phénomènes d'évaporation/sublimation sont en effet rarement étudiés dans les procédés de congélation alors qu'ils peuvent engendrer des pertes économiques conséquentes. Ce travail de modélisation a été réalisé en collaboration avec T. Pham, professeur à l'Université de New South Wales, Australie, alors en congé sabbatique dans notre école et spécialiste notamment des procédés frigorifiques et de leur modélisation. L'objectif était de développer un modèle relativement générique sous COMSOL® capable de prédire les temps de congélation et les pertes de masse associées en fonction des conditions externes. Le choix d'une simulation 1D a été justifié par la géométrie étudiée (plaque peu épaisse suffisamment large) et par des temps de calcul importants propres à la physique étudiée (changement de phase et transfert de masse).

L'approche adoptée pour prendre en compte le changement de phase reposait sur l'existence d'une fonction taux de glace f utilisée pour prédire l'augmentation de la teneur en glace X_g (kg de glace / kg de matière sèche) en cours de congélation. Celle-ci dépend de la teneur en eau liée X_b , c'est-à-dire la fraction d'eau non congelable, et d'une fonction f dépendant de la température en dessous de la température de congélation commençante et nulle au-dessus.

$$X_g = (X - X_b)f(T) \quad (7)$$

X_l , la partie liquide de la teneur en eau X est alors donnée par :

$$X_l = X - X_g \quad (8)$$

L'objectif était de pouvoir modéliser, à partir de cette seule fonction f et de la connaissance des propriétés en phases congelée et décongelée, l'ensemble des propriétés thermophysiques de l'aliment. La détermination de la forme de f a nécessité des mesures par calorimétrie différentielle

dynamique (DSC - Differential Scanning Calorimetry). Le signal calorimétrique a en effet été utilisé pour modéliser la chaleur spécifique apparente du produit étudié, exprimée en Joules par Kelvin par kilogramme de matière sèche :

$$Cp_{app} = C_s + X_l C_l + X_g C_g - L_g \frac{dX_g}{dT} \quad (9)$$

Où C_s , C_l , C_g sont respectivement les chaleurs spécifiques de la matière sèche, de l'eau liquide et de la glace alors que L_g représente la chaleur latente de congélation. Ce signal servait aussi à estimer la valeur de C_s en analysant la chaleur spécifique en phase décongelée, ainsi que la quantité d'eau liée X_b en calculant l'énergie libérée lors de la congélation (intégration du pic de changement d'état). En l'absence d'évaporation, l'équation de transfert à résoudre avait pour forme :

$$\rho_{MS} Cp_{app} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (10)$$

Où la masse volumique apparente de la matière sèche ρ_{MS} était notamment déduite en faisant l'hypothèse de l'additivité des volumes d'eau liquide, de glace et de matière sèche. Quant à la conductivité thermique k , elle était obtenue par un modèle de Levy (Pham and Willix, 1989).

Finalement, des simulations de la congélation d'un produit emballé (pour pouvoir éliminer les transferts d'eau) ont été réalisées et la comparaison entre résultats numériques et expérimentaux nous a orientés vers la forme empirique de la fonction f la plus adéquate :

$$f(T) = 1 - \left(\frac{T_c - 273,15}{T - 273,15} \right)^2 \quad \text{pour } T \leq T_c \quad (11)$$

$$f(T) = 0 \quad \text{pour } T \geq T_c$$

Où la température T est exprimée en Kelvin et T_c représente la température de congélation commençante.

Pour intégrer les transferts de masse à l'analyse, nous avons décidé de dissocier milieux poreux et non poreux avec les hypothèses suivantes. Pour les aliments non poreux, l'eau existe sous forme de liquide et de glace et la migration d'eau au sein du produit est due uniquement à la diffusion de la phase liquide. Pour les aliments poreux il faut rajouter la diffusion d'eau sous forme de vapeur à l'intérieur des pores. Quelle que soit la porosité, nous avons fait l'hypothèse que la diffusivité du liquide D_l était donnée par une loi empirique et que celle de la vapeur d'eau dans l'air pouvait être utilisée si elle était corrigée par le rapport entre la fraction volumique des pores (porosité ε_a) et un paramètre τ appelé tortuosité, fonction de la géométrie des pores et de leur agencement. En supposant que la vapeur d'eau dans le produit suit la loi des gaz parfaits et est donnée par $M_w P / (RT)$ en kg par m³ de pores, la teneur en eau base sèche X peut être déterminée en résolvant l'équation de transport suivante :

$$\rho_{MS} \frac{\partial X}{\partial t} = \nabla(\rho_{MS} D_l \nabla X_l) + \frac{M_w}{R} \nabla \left(\frac{\varepsilon_a}{\tau} D_v \nabla \frac{P}{T} \right) \quad (12)$$

En introduisant la fonction f dans l'équation (éq.12), on obtient finalement :

$$\rho_{MS} \frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \left(\rho_{MS} D_l \left[(1 - f(T)) \nabla X + (X_b - X) \frac{df}{dT} \nabla T \right] \right) + \frac{M_w}{R} \nabla \left(\frac{\varepsilon_a}{\tau} D_v \nabla \frac{P}{T} \right) \quad (13)$$

L'équation de transfert de chaleur est modifiée seulement pour les aliments poreux pour lesquels on peut rajouter un terme source qui prend en compte les phénomènes d'évapo-condensation dans les pores :

$$\rho_{MS} C_{p_{app}} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + L_w \frac{M_w}{R} \nabla \left(\frac{\varepsilon_a}{\tau} D_v \nabla \frac{P}{T} \right) \quad (14)$$

En ce qui concerne les conditions aux limites, elles se traduisent pour les transferts de masse par l'équation (éq.3). Pour les transferts de chaleur on doit prendre en compte l'évaporation et la sublimation éventuelle ce qui donne en surface :

$$-k \nabla T = h(T - T_{air}) + h_m \frac{M_w}{R} \left(a_w \frac{P_{sat}(T)}{T} - HR \frac{P_{sat}(T_{air})}{T_{air}} \right) (L_w + f(T)L_g) \quad (15)$$

On a ensuite cherché à valider le modèle avec des mesures expérimentales de températures et de pertes de masses réalisées lors de la surgélation de blocs de tylose installés dans une enceinte cryogénique ($T_{N_2} = -80^\circ\text{C}$, $h = 30 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$). Pour un gel mimant un aliment non poreux comme la tylose, la Figure 11 montre que les résultats numériques et expérimentaux concordent bien. Le manque de temps et de moyens ne nous a malheureusement pas permis de valider le modèle autrement plus complexe développé dans le cadre des aliments poreux. Toutefois une validation qualitative a pu être réalisée à partir de travaux précédemment effectués au laboratoire (Hamdami et al., 2004).

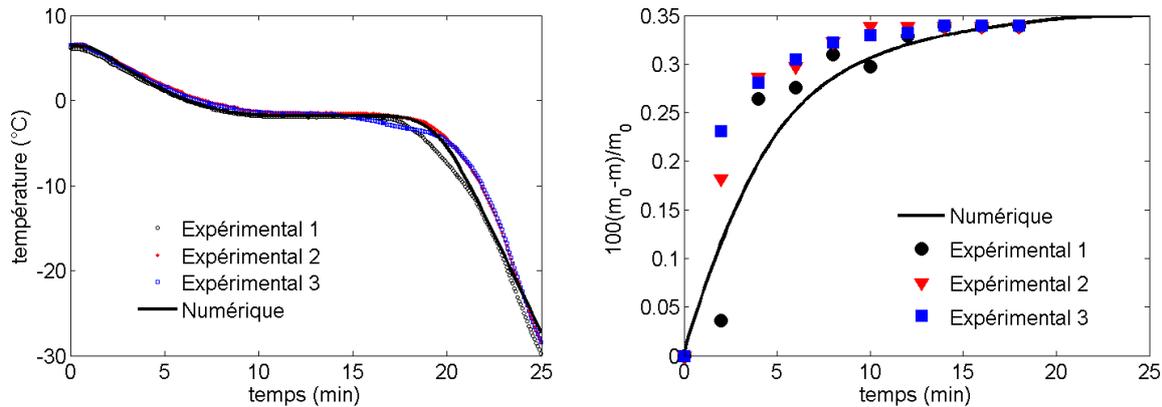


Figure 11. Températures du point le plus chaud et pertes de masse (m_0 représentant la masse initiale) lors de la surgélation d'un gel de méthylcellulose de forme parallélépipédique dans une enceinte cryogénique ($T_{N_2} = -80^\circ\text{C}$, $h = 30 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) – confrontation modèle / expériences

Nous avons considéré que les modèles étaient suffisamment pertinents pour pouvoir comparer les temps de congélation et les pertes de masse résultant de différentes conditions de traitement. L'objectif était de combiner une congélation cryogénique ($T_{N_2} = -80^\circ\text{C}$, $h = 30 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) avec une congélation à l'air froid ($T_{air} = -30^\circ\text{C}$, $h = 10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) et d'estimer l'énergie totale consommée pour opérer cette surgélation (température du point le plus chaud en fin de traitement = -18°C). À partir des bilans énergétiques issus de la simulation et des recommandations de l'ADEME pour la conversion en énergie primaire (Rouaud and Le Bail, 2015), les résultats peuvent ainsi être décrits par des représentations graphiques comme sur la Figure 12. Pour un temps de congélation sélectionné, la consommation totale du procédé combinant les deux environnements froids correspond à la somme des énergies présentées sur cette figure. La perte de masse en fonction de la méthode de congélation

choisie peut également être représentée de différentes manières, soit par rapport au temps total de congélation soit par rapport au temps passé dans la chambre cryogénique comme sur la Figure 13. Les valeurs numériques extraites de ces figures ne doivent cependant pas être prises comme valeurs absolues car elles dépendent de nombreux paramètres sujets à débat : conversion énergie frigorifique – énergie primaire, valeurs des coefficients de convection dans les installations... Ces figures montrent surtout l'intérêt de la simulation numérique qui va permettre de comparer plusieurs technologies et conduites de procédés, agissant ainsi comme un outil d'aide à la décision auprès des industriels.

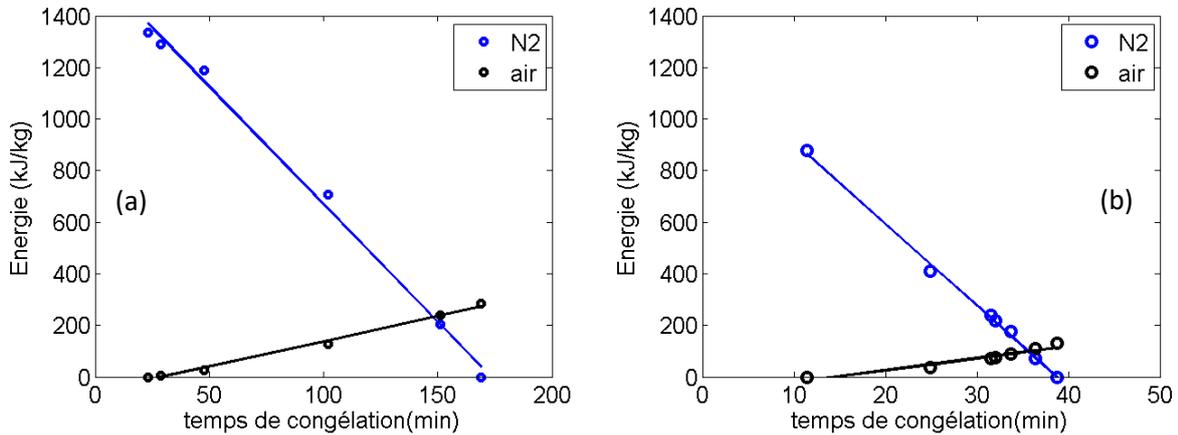


Figure 12. Exemples de consommations énergétiques dues à la surgélation d'un produit par cryogénie puis par air froid en fonction du temps total de congélation (passage de la température la plus chaude de 4 à -18°C) pour un aliment non poreux (a) et un aliment poreux (b).

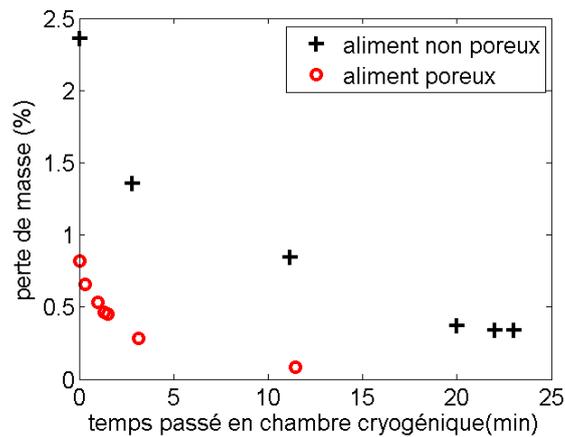


Figure 13. Exemples de pertes de masse simulées lors de la surgélation d'un produit par cryogénie puis par air froid en fonction du temps passé en chambre cryogénique pour un aliment non poreux et un aliment poreux.

Conclusion

L'intensification réalisée en jouant cette fois-ci, non plus sur l'intensification de l'écoulement, mais sur l'écart de température entre le produit traité et le fluide environnant suppose une augmentation des coûts énergétiques primaires. Cette intensification a cependant l'avantage ici de réduire les pertes de masse et d'améliorer la qualité du produit. Pour diminuer les coûts inhérents aux installations cryogéniques, une combinaison cryogénie-air froid reste une bonne option. Les études expérimentales et numériques menées dans ces différents projets ont montré cependant qu'il ne suffisait pas de descendre la température de surface en dessous de la température de congélation commençante pour stopper la perte en eau. Les temps de congélation et les pertes de masse dépendent également

énormément des caractéristiques des produits traités et une bonne connaissance des propriétés thermophysiques des produits est primordiale.

I.4. Intensification des transferts appliquée à la cuisson du pain

Contexte

Des études récentes, réalisées en 2014 et 2015 dans le cadre du master de C. Choimet et du projet TMBP¹⁰, ont permis de dresser un bilan énergétique actualisé du secteur de la Boulangerie/Pâtisserie en France. Avec une valeur de plus de 320 000 TEP, la consommation annuelle d'énergie brute du secteur boulanger représente plus de 6% de la consommation énergétique des industries agroalimentaires (Choimet, 2014). L'évaluation de la répartition de cette consommation au sein de chaque boulangerie confirme que les fours de cuisson constituent le poste le plus énergivore (45%) devant les procédés frigorifiques (réfrigération, congélation) et les chambres de pousse (Choimet and Rouaud, 2016). Sachant que seulement 25% de l'énergie consommée par un four classique est utilisée pour la cuisson du pain, l'intensification des transferts au sein des fours de boulangerie peut faire partie des solutions pour diminuer ces consommations énergétiques. La tâche 5 du projet BRAISE, tâche dont j'avais la charge, avait ainsi pour objectif de proposer des systèmes de cuisson innovants et c'est dans ce cadre qu'a été développé un four à jet en impact.

Des différentes étapes de conception aux essais préliminaires

L'utilisation de jets d'air en impact est un moyen efficace pour augmenter les transferts de chaleur entre l'air chaud du four et la surface des produits de panification. La cuisson de produits de dimensions variables comme les pains nécessite la disposition de jets multiples, afin d'assurer une certaine uniformité de traitement. La répartition des buses de soufflage en voûte, leur dimension et la position des reprises d'air ont résulté d'un compromis entre les enseignements tirés de la bibliographie, les résultats d'une étude numérique (Nedjar, 2011) et les contraintes techniques (facilité d'usinage, disponibilité de pièces aux dimensions précises...). Le four a ainsi été développé à partir d'un four M2 de chez Bongard, four utilisé dans sa version standard durant le projet BRAISE et pour lequel une caractérisation énergétique complète avait été faite. Le four à jet en impact développé, utilisé encore maintenant pour d'autres applications, dispose de 21 buses de soufflage de 32,5 mm de diamètre et de deux reprises latérales de part et d'autre de la sole (Figure 14). La vitesse d'air en sortie de buse est variable et peut atteindre 6 m/s. Les puissances des résistances de sole et de celle utilisée pour le chauffage de l'air sont également modifiables, ainsi que la quantité de buée injectée. Tous ces éléments font de ce dispositif un outil d'une grande flexibilité. Une caractérisation expérimentale complète a ainsi pu être réalisée pour plusieurs températures de consigne et plusieurs vitesses de jet. Une instrumentation de la sole en thermocouple a confirmé l'homogénéité de traitement apportée par la disposition des jets. Le four d'origine pouvait afficher des différences allant jusqu'à 50°C au niveau de la sole pour une température de consigne de 250°C. Ces écarts se réduisent à 5-10°C grâce à l'utilisation des jets. Des mesures de coefficients de transferts de chaleur ont également été effectuées à l'aide de cylindres métalliques de dimensions sensiblement identiques à celles de baguettes de pain. La méthodologie adoptée reposait sur une technique simple de mesures de températures de ces charges dans le four lorsque celui-ci avait atteint sa température de consigne (Abraham and Sparrow, 2004). Les coefficients de transferts peuvent atteindre 40 W.m⁻².K⁻¹ pour la plus forte vitesse et sont obtenus au niveau de la face avant du four, directement sous les jets. On observe en effet une légère différence entre le fond du four et la partie avant, les vitesses d'air augmentant légèrement au fur et à mesure qu'on se rapproche de la porte du four.

¹⁰ TMBP, Tests de Mesures en Boulangerie-Pâtisserie et MDE, privé, 2015-2016

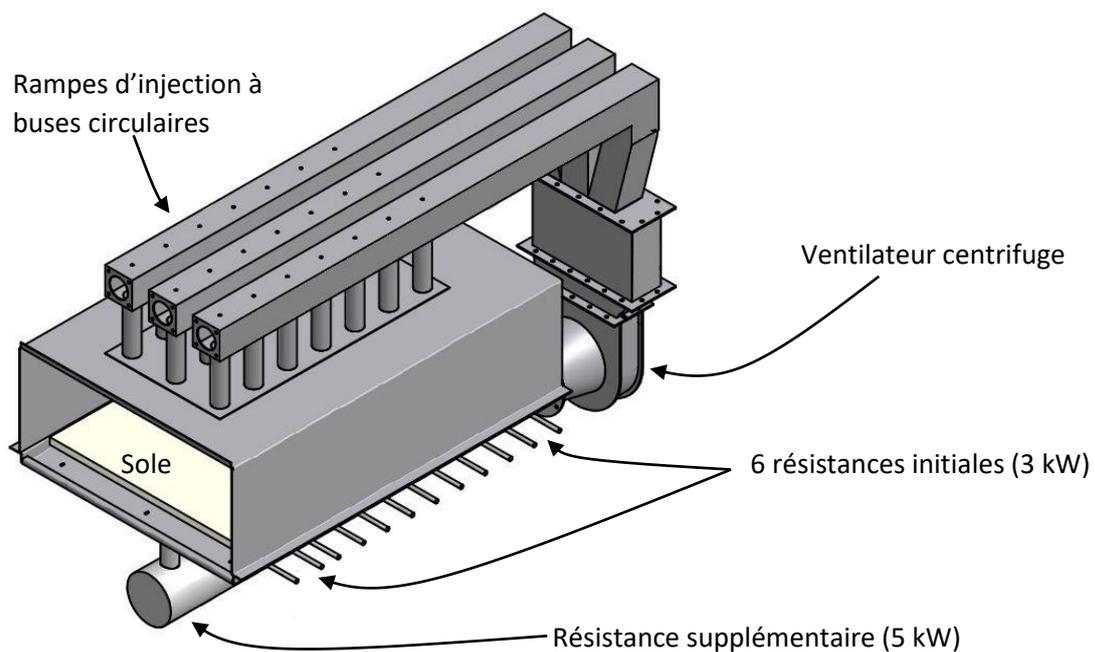


Figure 14. De la conception à la réalisation du four à jets en impact

Cuissons, qualité du pain et énergie

Il s'agissait, après l'analyse des coefficients d'échange, d'utiliser le four en phase de cuisson et de comparer les résultats avec des cuissons classiques réalisées dans le four d'origine. Les comparaisons étaient d'autant plus pertinentes que les 2 fours possèdent le même volume et la même surface de chauffe, une sole et un système de génération de buée identiques. Les résultats, basés sur la cuisson de petits pains et leur qualité, notamment en termes de texture (Chaunier et al., 2014), ont montré qu'il était possible de diminuer les températures de consigne et les temps de cuisson dans le nouveau four développé. D'un couple temps/température de 23 min/250°C pour une cuisson classique, le four à jet en impact permet de descendre le temps de cuisson à 15 min pour des consignes de température de 180°C pour la sole et 195°C pour la température des jets. La consommation énergétique lors des cuissons s'est ainsi trouvée réduite de plus de 17%.

Si la cuisson de pains dans ce type de four à température plus basse est tout à fait possible, il n'en demeure pas moins quelques différences, minimales donc acceptables, en termes de caractéristiques du produit. Ainsi, la croûte s'est avérée légèrement plus épaisse en raison de l'augmentation des transferts (Rzigue, 2012). Pour obtenir un produit de qualité identique, nous avons fait l'hypothèse qu'il était nécessaire pour le pain que la température de sa croûte suive une trajectoire bien définie. L'objectif était ensuite d'étudier, à l'aide d'un modèle mathématique réduit du processus de cuisson, la possibilité de diminuer la consommation énergétique en jouant sur les paramètres process. Un modèle mécanistique a ainsi été développé par l'équipe de M. Alamir du laboratoire CNRS GIPSA-lab de Grenoble (Alamir et al., 2013). Il a ensuite été utilisé dans un problème d'optimisation dans lequel les degrés de liberté étaient les profils d'actionnement (température d'air et coefficients de convection liés aux jets), le critère étant énergétique et les contraintes représentées par la poursuite de trajectoires. Les résultats obtenus ont été tout à fait intéressants car ils ont prédit une diminution énergétique maximum possible de l'ordre de 16%, soit proche des valeurs obtenues expérimentalement.

Conclusion

L'intensification des transferts a cette fois-ci été obtenue grâce à l'utilisation de jets orientés perpendiculairement aux produits traités. L'augmentation des coefficients de transferts par convection qui en a résulté permet d'améliorer l'efficacité énergétique du procédé de cuisson étudié. L'utilisation de modèles mathématiques dédiés à la cuisson des produits, suffisamment réduits pour pouvoir être intégrés dans des boucles de régulation, semble être encore une fois une solution prometteuse. Au-delà des résultats scientifiques montrant l'intérêt d'un tel procédé, la démarche adoptée pendant ce projet collaboratif a été riche d'enseignement. La phase de conceptualisation du four a montré les limites de la simulation numérique, tant du point de vue modélisation (problèmes des modèles de turbulence $k-\epsilon$ pour prédire les écoulements de type jets en impact) que du point de vue ressources numériques (nombre de mailles limité en configuration tridimensionnelle). Seules des études comparatives ont ainsi pu être réalisées, la validation des simulations restant qualitatives. Passer ensuite des résultats numériques aux plans sur papier, puis au dispositif réel suppose de lever des verrous techniques ou de les contourner et nécessite le plus en amont possible l'implication des personnels techniques. Bien que le prototype ainsi créé n'ait pas été valorisé par un dépôt de brevet, le laboratoire dispose maintenant d'un outil polyvalent qui n'a cessé d'être utilisé depuis sa création.

1.5. Conclusions

Les solutions d'intensification présentées dans cette partie sont relativement simples à conceptualiser. Il s'agit d'intensification de transferts convectifs assurée soit par l'augmentation des vitesses de fluide autour du produit (cas des jets) soit par l'augmentation de l'écart de température entre fluide et aliment traité (cas de la cryogénie). Ces différentes études m'ont permis de développer plusieurs compétences, que ce soit en modélisation (transferts masse/chaleur) ou en expérimentation (mise au point de dispositifs expérimentaux et de systèmes de mesures). Les perspectives de recherche – en ce qui me concerne – sont plus dédiées aux méthodologies et démarches scientifiques qu'aux procédés eux-mêmes. Les modèles de transfert de masse sont par exemple à améliorer mais ce travail devrait être fait sur d'autres procédés (séchage électrohydrodynamique, chauffage ohmique) et en collaboration avec des enseignants-chercheurs spécialistes des transferts dans l'aliment. Les travaux sur les fours de boulangerie devraient également perdurer (projet Eco-Nutricake¹¹), permettre ainsi la mise au point de nouveaux systèmes de mesure de coefficients de transferts

¹¹ Eco-Nutricake 'Éco-développement industriel de produits de biscuiterie et de pâtisserie nutritionnels destinés à restaurer l'équilibre alimentaire de populations à risque', Projet Industriel d'Avenir (PIAVE), 2016-2017

(convection/rayonnement) et évaluer la capacité des codes commerciaux de type COMSOL Multiphysics® à traiter ce genre de problématique intégrant écoulements et transferts de chaleur par convection, conduction et rayonnement.

II. Intensification des transferts par vent ionique ou électroconvection

II.1. Introduction

L'intensification des transferts aux interfaces fluide-solide peut être assurée par des méthodes actives qui consistent à perturber les couches limites en utilisant un dispositif supplémentaire consommant une faible quantité d'énergie. Parmi ces méthodes, les écoulements EHD – pour ElectroHydroDynamique – sont générés par des champs électriques caractérisés par une très haute tension et une très basse intensité.

Les travaux liés à l'utilisation de champs électriques à très haute tension ont été initiés au début des années 2000 par M. Havet. Ils portaient alors sur des applications de fumage électrostatique (Baron et al., 2008). L'intensification des transferts par application d'un champ électrique a été une première fois discutée dans la thèse de S. A. Ould Ahmedou (2010) où une démarche essentiellement numérique était utilisée pour démontrer le potentiel de ce procédé pour l'amélioration des coefficients de transferts convectifs. Les travaux réalisés par M. Hamdi (2014) poursuivent cette étude générale dans le cadre du programme régional PERLE2. L'accent est principalement porté sur la démarche expérimentale avec la construction d'un banc d'essai dédié au procédé de séchage basse température. Dans un canal où circule un écoulement d'air principal, un champ électrique localement intense va produire un 'vent ionique' induisant un écoulement d'air secondaire susceptible d'accroître les échanges convectifs. Bien que la littérature soit de plus en plus abondante sur le sujet (Martynenko and Kudra, 2016; Singh et al., 2012) allant même jusqu'à proposer des procédés à l'échelle préindustrielle (Lai, 2010), il reste nécessaire d'améliorer la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu dans le but d'optimiser les paramètres de fonctionnement d'un tel procédé. La démarche adoptée pour mener à bien ces recherches se veut la plus complète possible. Elle associe des techniques expérimentales complexes (PIV pour les écoulements, caméra infrarouge pour les températures) à la simulation numérique. Une fois l'intensification des transferts démontrée, les paramètres optimaux sont utilisés dans des applications de séchage de différents produits, la qualification du procédé étant notamment assurée par des analyses énergétique et exergetique. L'intensification des transferts par vent ionique ou électroconvection a également été utilisée dans d'autres géométries sur des produits réels et a donné lieu à différentes collaborations (D. Tarlet, Polytech'Nantes et E. Bardy, Grove City College, USA).

II.2. Génération du vent ionique - principe

Le vent ionique est lié au phénomène de décharge couronne qui apparaît lorsque le champ électrique près d'un conducteur est suffisamment élevé pour ioniser le fluide qui l'entoure. Se crée ainsi un plasma froid, quatrième état de la matière constitué d'un mélange de particules positives et négatives et macroscopiquement neutre. Pour obtenir ce champ électrique, il est nécessaire d'appliquer une différence de potentiel élevée de l'ordre de quelques kV à deux électrodes caractérisées par des rayons de courbure très différents (configurations pointe-plaque ou fil-plaque par exemple). Dans l'exemple de la Figure 15, lorsque la pointe est portée à un potentiel positif (anode) et la plaque reliée à la masse (cathode), le champ électrique intense au voisinage de l'anode accélère vers celle-ci les quelques électrons présents. Ces électrons peuvent ioniser des atomes ou des molécules, créant ainsi des électrons supplémentaires et des ions positifs : $A + e^- \rightarrow A^+ + 2e^-$. Les électrons ainsi libérés vont induire

des mécanismes d'ionisation successive (avalanche d'électrons) tandis que les ions positifs vont être repoussés par l'anode vers la limite de la zone d'ionisation. Au-delà de cette zone, en forme de couronne, le champ électrique est trop faible pour initier l'ionisation du gaz et les ions vont dériver vers la cathode suivant les lignes de champ (zone de dérive). Le déplacement des ions génèrent la mise en mouvement des particules neutres, essentiellement par transfert de quantité de mouvement. L'écoulement induit est appelé vent ionique (Figure 15).

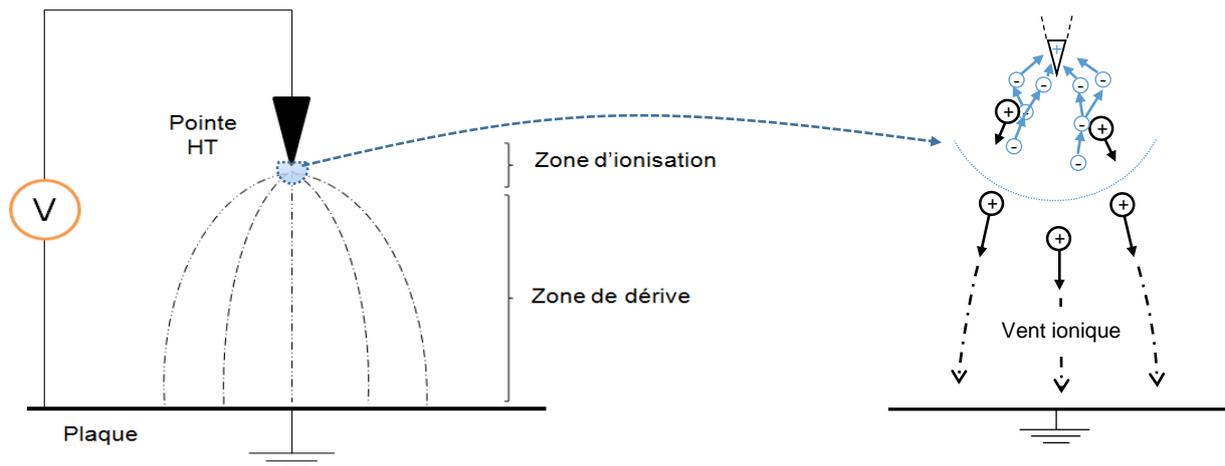


Figure 15. Schéma de principe de la décharge couronne (positive) dans une configuration pointe-plaque

II.3. Choix d'une méthode expérimentale adaptée pour l'étude des écoulements EHD

Caractérisation des écoulements

En faisant l'hypothèse que l'intensification des transferts due au vent ionique est un phénomène essentiellement convectif, la connaissance des structures des écoulements turbulents au-dessus de la surface traitée s'avère indispensable. Il est alors légitime de se tourner vers les techniques de mesure non intrusives par imagerie (PIV- Particule Image Velocimetry, SPIV – Stereo PIV, LDV – Laser Doppler Velocimetry,..) qui offrent une description globale de l'écoulement. L'utilisation de ces techniques de visualisation dans les gaz se heurte à une difficulté majeure qui concerne l'ensemencement. Lorsqu'on s'intéresse à l'écoulement du gaz et non à celui de particules comme dans le cas des précipitateurs électrostatiques, le traceur utilisé doit rester passif pour reproduire avec exactitude les structures tourbillonnaires présentes. Or la présence d'un champ électrique de plusieurs kV/cm risque d'influencer fortement le comportement des particules choisies comme traceur. C'est sans doute pour cette raison que les études expérimentales sur les écoulements secondaires liés à l'intensification des transferts sont rares. La contribution la plus importante reste l'étude menée par Tada et al. (1997) mais celle-ci est restreinte à une géométrie très petite, ce qui limite son extrapolation aux applications de séchage envisagées. D'autre part, quand les méthodes par imagerie sont utilisées, la justification du choix du traceur est rarement abordée. Toutes ces raisons nous ont amenés à réaliser une étude complète sur l'influence des traceurs sur la mesure de vitesse par PIV dans un écoulement EHD.

Dispositif expérimental

Un dispositif expérimental spécifique a été développé pour cette étude (Figure 16). La configuration pointe-anneau a été choisie car elle permet d'obtenir un écoulement canalisé de type jet axisymétrique. L'anode, électrode de décharge, est constituée d'une aiguille métallique de pointe hyperbolique. Elle est suspendue par une tige en téflon au sommet d'un cylindre de plexiglas. A l'extrémité inférieure du cylindre, collée à la paroi interne, se trouve la cathode matérialisée par un mince anneau d'aluminium. Le dispositif de décharge couronne est placée dans une enceinte fermée dans laquelle sont injectées les particules testées. Les mesures par PIV sont comparées à des mesures de vitesse d'air par tube de Pitot.

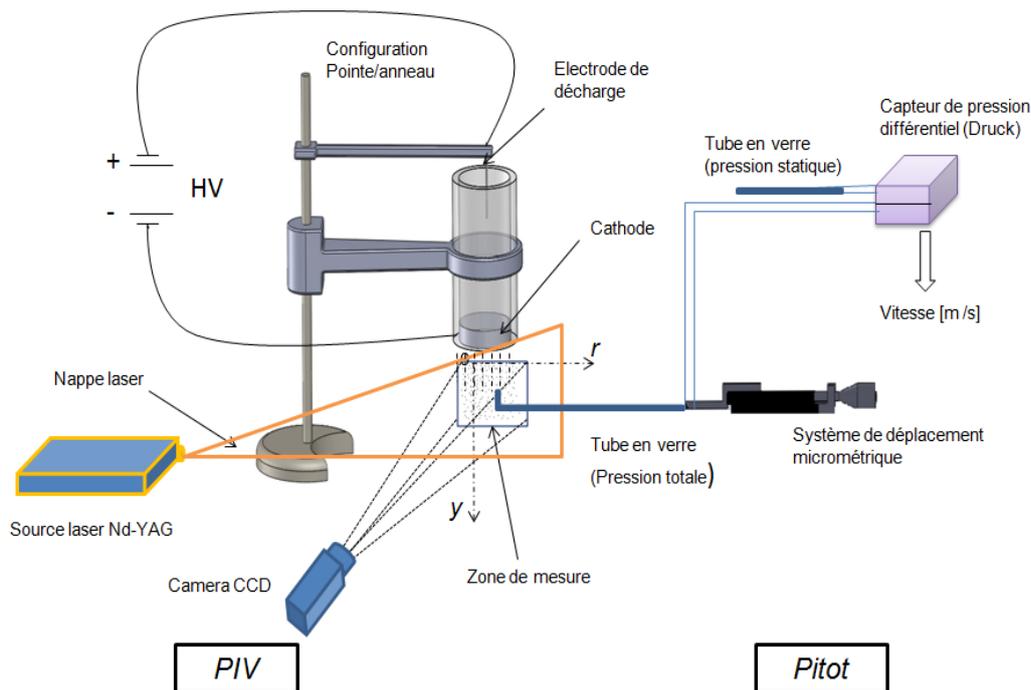


Figure 16. Dispositif expérimental utilisé pour le choix des traceurs (M. Hamdi, 2014)

Les traceurs, issus de la littérature, ont été choisis pour leurs caractéristiques physiques différentes. Ont ainsi été étudiés, deux types de fumée (encens et cigarette), deux sortes de particules métalliques (microballons de SiO_2 et particules de TiO_2), de la fumée d'huile et des billes de polymère de très faible densité (Expancel MicroSphere EMS).

Résultats

Les comparaisons entre profils de vitesse issus de la mesure par sonde Pitot et par PIV nous ont permis de montrer que seules les particules d'encens et les particules métalliques étaient adaptées aux mesures par imagerie dans les écoulements EHD. La plupart de ces résultats étaient attendus. En effet, classiquement, le choix des particules d'ensemencement peut se faire grâce à des critères basés sur certains nombres adimensionnels. Le nombre de Stokes est ainsi largement utilisé. Rapport entre le temps de relaxation de la particule et un temps caractéristique de l'écoulement, il permet d'évaluer le temps de réponse des particules vis-à-vis de changements de vitesses du fluide porteur. Pour l'ensemble des particules testées, il a été calculé comme étant strictement inférieur à 1, indiquant ainsi

que toutes les particules pouvaient être utilisées pour des mesures de vitesses d'air. Le nombre d'Archimède, caractérisant la flottabilité des particules, a également été estimé. Les valeurs obtenues, elles aussi très inférieures à l'unité ne permettaient pas de conclure sur la non adéquation de particules avec les écoulements EHD. Un troisième nombre adimensionnel était donc nécessaire pour tenir compte de l'influence du champ électrique sur le comportement des particules. Il s'agit du paramètre M , rapport entre la mobilité équivalente de l'air et la mobilité électrique K des particules :

$$M = \frac{\left(\frac{\epsilon_f}{\rho_f}\right)^{\frac{1}{2}}}{K} \quad (16)$$

Où ϵ_f et ρ_f sont respectivement la constante diélectrique et la masse volumique du fluide.

Atten et al. (1987) en se basant sur des calculs théoriques, indiquent que pour $M \gg 3$, les particules, bien que chargées, sont entraînées par le fluide et peu influencées par le champ électrique, alors que pour une valeur de $M \ll 3$, le fluide a peu d'effet sur les particules, en comparaison du champ électrique. La détermination du paramètre M pour nos particules testées confirme que l'huile et les microsphères sont affectées par le champ électrique et sont donc à proscrire. Rien n'indique cependant que la fumée de cigarette n'est pas adaptée.

Les paramètres adimensionnels ne sont donc pas suffisants pour déterminer avec certitude quelles sont les particules utilisables, la difficulté résidant notamment dans l'évaluation de la mobilité électrique K . Une méthode simple permet heureusement de faire un choix. La génération d'un vent ionique s'accompagne d'un courant de l'ordre de quelques microampères aux bornes des électrodes. Ce courant est une fonction non linéaire de la tension appliquée comme l'indique la Figure 17. La courbe courant/tension qui en résulte est une caractéristique du dispositif expérimental et permet de visualiser la tension seuil V_0 à partir de laquelle le vent ionique apparaît, ainsi que la tension de claquage au-delà de laquelle il y a apparition d'arc électrique.

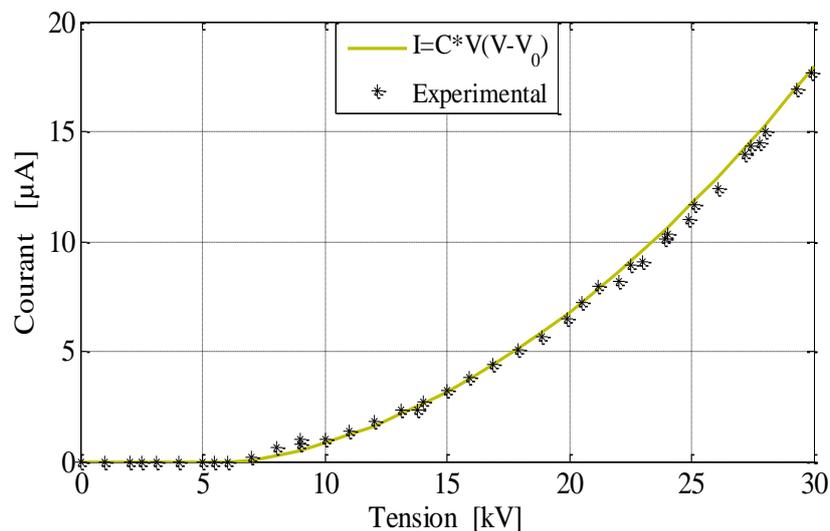


Figure 17. Courbe caractéristique courant/tension du dispositif (sans traceur) avec C une constante (A/V^2)

Tracer ces courbes courant/tension pour des écoulements EHD en présence de traceurs donne ainsi des indications précieuses sur l'influence des particules. En complément, l'évolution du courant au cours du temps pour une tension donnée permet de vérifier la stabilité du système dans le temps. La

Figure 18 illustre par exemple l'influence de la fumée de cigarette sur le dispositif, éliminant de facto ce traceur. Ce résultat est attribué à une possible coalescence des particules de fumée de cigarette qui entraîne une augmentation de leur mobilité électrique, cette dernière étant proportionnelle au diamètre des particules.

Parmi les 3 traceurs envisagés, notre choix s'est finalement porté sur la fumée d'encens. Les microballons de SiO_2 et les particules de TiO_2 , bien qu'offrant une meilleure réflexion lumineuse vis-à-vis du laser, sont des traceurs très onéreux. Les particules d'encens, très bon marché, sont plus facilement mises en suspension que les particules métalliques et ne nécessitent qu'un travail supplémentaire de post-traitement pour obtenir des résultats similaires en termes de qualité.

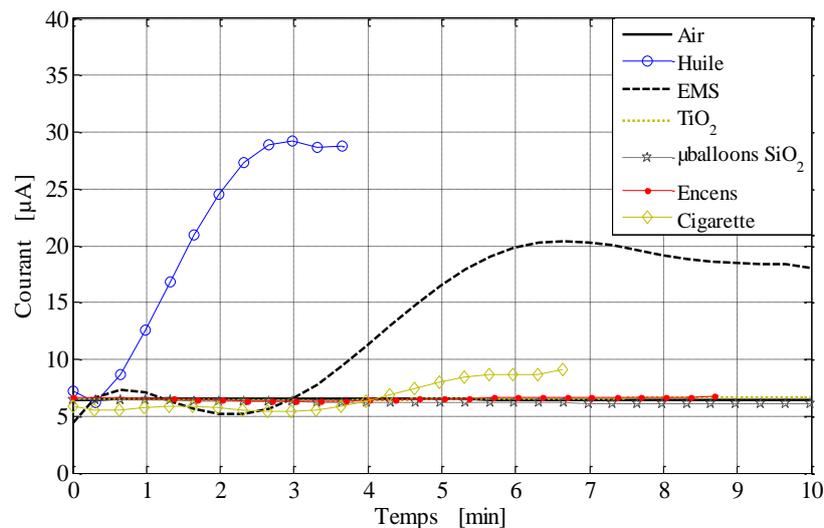


Figure 18. Évolution du courant en fonction du temps sans et avec traceurs pour une tension de 20 kV

Au-delà de la sélection du traceur propre à notre étude, nous avons finalement proposé une méthodologie pour l'évaluation des particules d'ensemencement. Le calcul des nombres adimensionnels permet d'effectuer ainsi une pré-sélection. Les courants induits par le vent ionique dans un air chargé en particules doivent ensuite être comparables en tout point à celui mesuré sans particules. Des considérations techniques et de facilité de mise en œuvre permettent finalement de conclure.

II.4. Dispositif expérimental dédié à l'intensification

Le dispositif expérimental développé pour l'étude sur l'intensification des transferts consiste en un canal de section rectangulaire dans lequel circule un écoulement d'air à vitesse, température et humidité contrôlées (Figure 19). On parlera d'écoulement primaire. Un fil de cuivre, tendu à l'intérieur du canal, constitue l'électrode de décharge alimentée par une haute tension positive. La cathode est une plaque de cuivre carrée venant affleurer la paroi inférieure du canal et sous laquelle un film chauffant permet de générer un flux de chaleur constant. Trois configurations fil-plaque sont étudiées : une configuration 'fil transversal' où le fil est perpendiculaire à l'écoulement primaire, une configuration 'fil longitudinal' où le fil est tendu parallèlement à l'écoulement principal et enfin une configuration '2 fils longitudinaux' constituée de 2 fils parallèles placés dans le sens de l'écoulement primaire. Pour chacune de ces configurations, l'influence de la tension V , l'influence de l'espace inter-électrode d et celle de la vitesse de l'écoulement primaire U sont évaluées.

Le refroidissement de la cathode est étudié grâce à une caméra infrarouge (Figure 19). Avec ce dispositif, on obtient une visualisation de l'intensification des transferts et on peut calculer les coefficients de convection h locaux et globaux afin d'obtenir une représentation chiffrée de celle-ci. Après avoir déterminé les flux évacués par rayonnement et conduction, le coefficient h est obtenu à partir de la température de paroi de la plaque T_p et la température de l'air primaire T_a :

$$h = \frac{\varphi_{conv}}{(T_p - T_a)} \quad (17)$$

Où φ_{conv} (W/m²) est la densité de flux par convection.

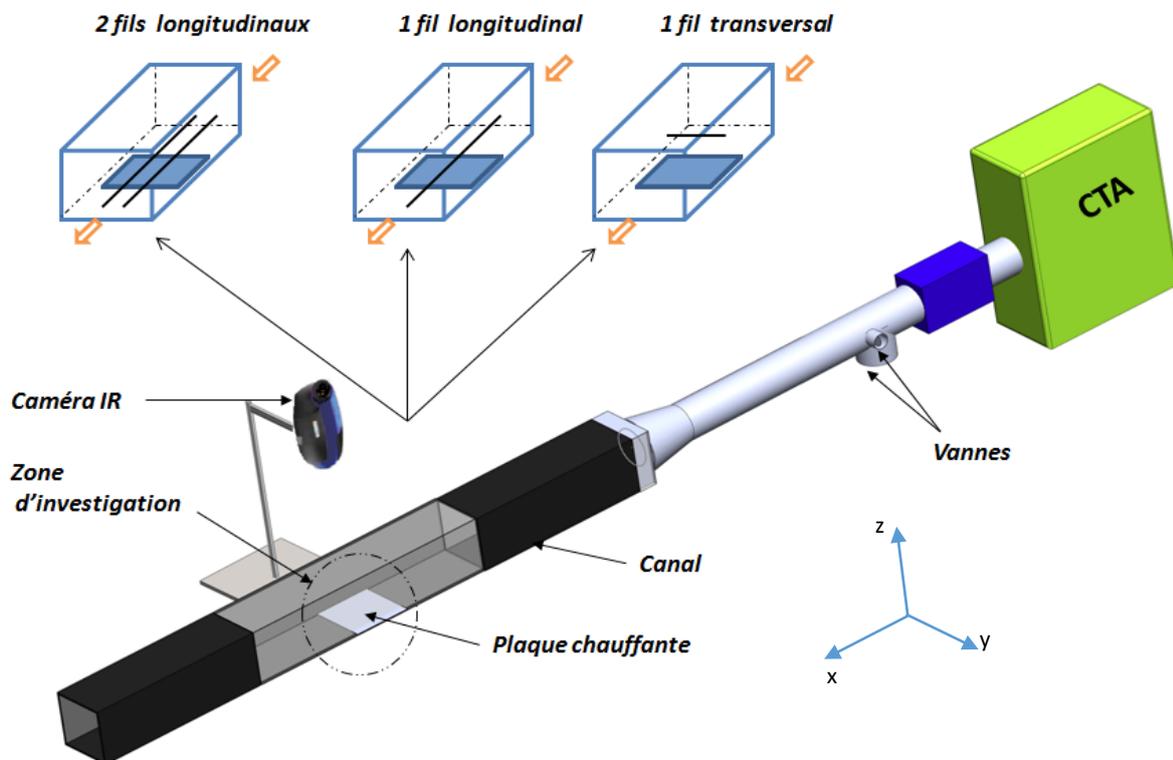


Figure 19. Schéma de principe de l'installation dédiée à la mesure de l'intensification des transferts

La méthodologie employée est dans un premier temps validée dans le cas de la convection naturelle ou encore lors du refroidissement de la plaque seulement lié à l'écoulement incident dans le canal, c'est-à-dire sans écoulement EHD. Les coefficients de convection obtenus sont ainsi favorablement comparés à des données de la littérature.

II.5. Résultats pour les configurations mono fil

Coefficients d'échange convectif

Les Figure 20 et Figure 21 présentent les coefficients d'échange convectif moyens h_m respectivement pour les configurations 'fil transversal' et 'fil longitudinal'. La vitesse de l'écoulement primaire U varie de 0,3 à 1 m/s et la distance inter-électrode d entre 2 et 6 cm. Dans l'objectif d'étudier l'intérêt du procédé d'un point de vue énergétique, les résultats sont présentés en fonction de la puissance

consommée calculée à partir de la tension et du courant mesurés. Il faut noter que les plages de tension utilisées varient selon la distance inter-électrode choisie. Plus cette dernière est faible, plus basses sont les tensions seuil et de claquage. Pour une même tension, le courant induit est plus élevé pour les faibles distances inter-électrode et la constante C de l'équation de la Figure 17 augmente avec la diminution la variable d .

Les coefficients donnés pour une puissance nulle correspondent aux échanges seulement liés à la vitesse de l'air primaire, les valeurs allant de $4,3 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ pour $U = 0,3 \text{ m/s}$ à $7,3 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ pour $U = 1 \text{ m/s}$. Ces configurations sans électroconvection permettent de quantifier l'apport du vent ionique qui, dans le meilleur des cas (fil transversal, $U = 0,3 \text{ m/s}$, $d = 6 \text{ cm}$), peut multiplier par 8 les échanges par convection.

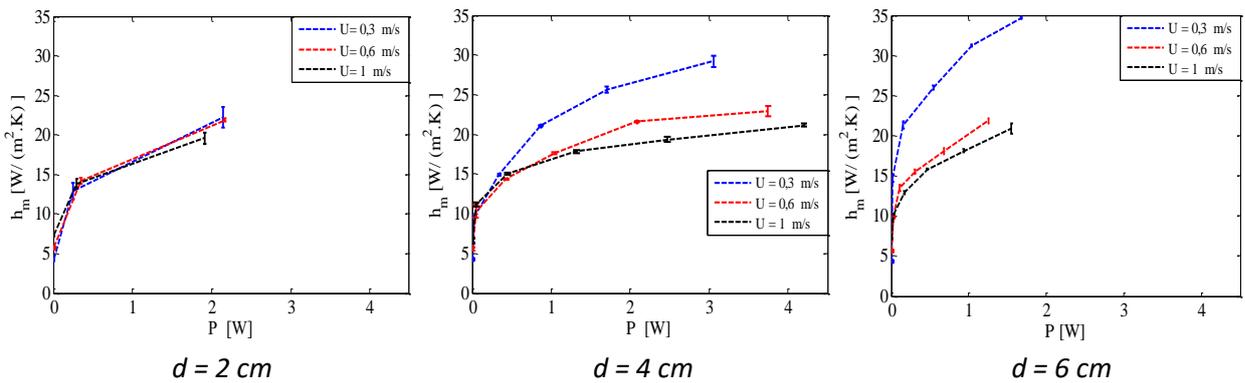


Figure 20. Coefficients de transferts moyens pour la configuration fil transversal

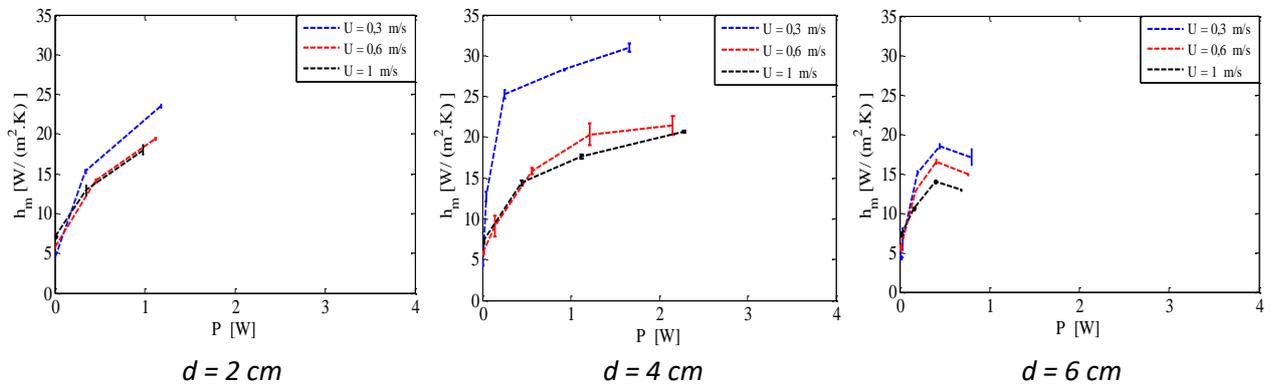


Figure 21. Coefficients de transferts moyens pour la configuration fil longitudinal

Influence de l'écoulement primaire

Quelle que soit la configuration choisie, le coefficient de convection moyen est d'autant plus élevé que la vitesse incidente est faible ($0,3 \text{ m/s}$ dans notre cas). Les résultats obtenus avec électroconvection mais sans écoulement primaire ($U = 0 \text{ m/s}$) présentent des valeurs maximales indiquées dans le Tableau 1. Celles-ci ne sont pas directement insérées dans les Figure 20 et Figure 21 pour comparaison car les conditions opératoires sont différentes, températures et humidité de l'air ne pouvant pas être contrôlées dans ce cas précis. Hormis pour une configuration, les valeurs issues du Tableau 1 sont néanmoins plus faibles que les valeurs maximales obtenues pour une vitesse d'écoulement primaire de $0,3 \text{ m/s}$. On peut donc conclure à l'existence d'une vitesse d'air primaire optimale, pour laquelle le vent ionique induit une augmentation maximale des coefficients de transferts par convection. Dans

notre canal et pour les distances inter-électrodes étudiées, cette vitesse d'air est comprise entre 0 et 0,6 m/s.

Tableau 1. Valeurs maximales du coefficient de convection moyen obtenu sans écoulement incident

	h (W/m ² .K) pour d :		
	2 cm	4 cm	6 cm
fil transversal	29,8	22,6	28,3
fil longitudinal	17,9	23,6	19,7

Existence d'une distance inter-électrode optimale – intérêt des images infrarouge

Les résultats montrent également que selon la configuration, la distance inter-électrodes d optimale sera différente (6 cm pour le fil transversal, 4 cm pour le fil longitudinal).

Les images acquises par la caméra infrarouge offrent une visualisation claire de l'impact du vent ionique sur le refroidissement et permettent d'avancer plusieurs explications et hypothèses. Dans les Figure 22 et Figure 23, l'écoulement primaire vient de la droite, l'électrode est visible au centre de l'image et la valeur de 40°C choisie pour l'échelle haute de température correspond à la température moyenne de la plaque lors d'un refroidissement par convection naturelle. Comme on peut le voir sur la Figure 22, le refroidissement est toujours plus intense à l'aplomb du fil, le vent ionique créant un écoulement que l'on pourrait assimiler à un jet plan en impact sur la surface chaude. L'augmentation de la distance inter-électrode d a deux effets. Elle autorise d'abord l'utilisation de tensions plus élevées et par conséquent des vitesses de vent ionique plus importantes. Elle permet également d'agrandir la surface traitée, le jet ayant plus d'espace pour s'épanouir. L'influence de l'écoulement primaire intervient a priori après $d = 4$ cm car on observe une dissymétrie dans le refroidissement pour $d = 6$ cm. Cette dissymétrie n'est toutefois pas préjudiciable au procédé, l'écoulement secondaire restant suffisamment puissant pour atteindre la plaque chauffante et en assurer son refroidissement.

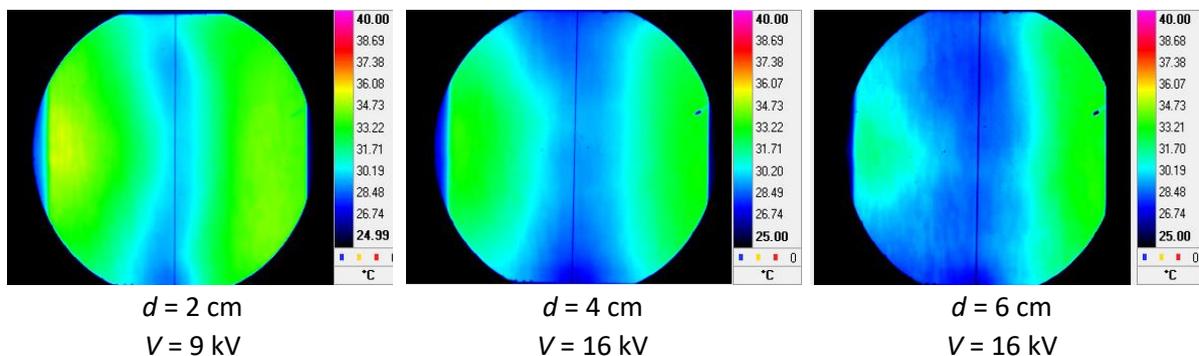


Figure 22. Distribution de température sur la surface refroidie par électroconvection dans une configuration fil transversal pour $U = 0,3$ m/s.

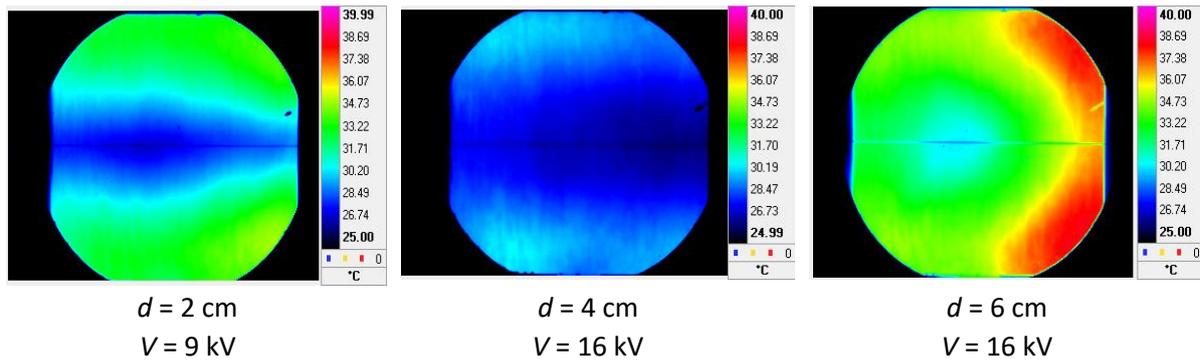


Figure 23. Distribution de température sur la surface refroidie par électroconvection dans une configuration fil longitudinal pour $U = 0,3$ m/s.

Lorsque l'électrode de décharge est placée longitudinalement (Figure 23), l'écoulement secondaire lié au vent ionique ne fait plus office de barrière dynamique. Ainsi à partir d'une certaine valeur de d , l'écoulement de type jet est entraîné par l'écoulement primaire car les vitesses verticales au niveau de proches des parois latérales sont faibles ($d = 6$ cm, Figure 23). Ce qui explique l'optimum trouvé pour $d = 4$ cm distance inter-électrode qui semble offrir la meilleure combinaison entre vent ionique et écoulement primaire.

Les images IR sont riches d'enseignement et peuvent également être utilisées pour choisir parmi les configurations, celles qui offriront le traitement le plus homogène - c'est ce que l'on souhaite dans notre application de séchage. Dans plusieurs configurations en effet, on obtient des coefficients de convection moyens identiques mais avec de fortes disparités de traitement au niveau de la plaque chauffante.

Relation entre écoulements et intensification des transferts

Si les images thermiques montrent indirectement l'influence de l'écoulement d'air sur le refroidissement de la plaque, les mesures de vitesses par PIV permettent d'établir un lien clair entre vitesses, grandes structures turbulentes et intensification des transferts. Ces mesures sont réalisées dans des plans verticaux d'intérêt, parallèles à l'écoulement primaire ou parfois perpendiculaires. A titre d'exemple, la Figure 24 présente, pour une vitesse d'air de l'écoulement primaire optimale, une visualisation du vent ionique pour deux configurations d'électrodes lorsque le fil est disposé transversalement. La composante verticale de la vitesse confirme que l'écoulement secondaire est d'autant plus intense que la distance inter-électrodes est élevée. La barrière dynamique créée par le champ électrique conduit à la formation d'un tourbillon clairement visible en amont de l'écoulement.

L'analyse par PIV des différentes configurations montre que cette recirculation est d'autant plus intense que l'espace inter-électrode est élevé et qu'elle se déplace vers l'aval lorsque la vitesse de l'écoulement primaire augmente. Elle disparaît ensuite pour les fortes vitesses ($U = 1$ m/s), la barrière dynamique créée par le vent ionique n'étant plus suffisante pour s'opposer à l'écoulement principal. La Figure 25 présente l'écoulement pour un espace inter-électrode de 4 cm dans le cas d'une configuration fil longitudinal. La combinaison de l'écoulement EHD et de l'écoulement principal crée encore un écoulement de type jet plan qui vient impacter la surface à refroidir. Repoussé vers l'aval et s'épanouissant latéralement, le jet génère deux tourbillons contrarotatifs dont les centres s'élèvent vers la paroi supérieure du canal. L'étude des autres configurations montre que l'existence de ces tourbillons est primordiale pour l'intensification des transferts. Si par exemple la vitesse de l'écoulement primaire est trop importante, la zone de forte vitesse U_y de la Figure 25 diminue et l'intensité des tourbillons est réduite.

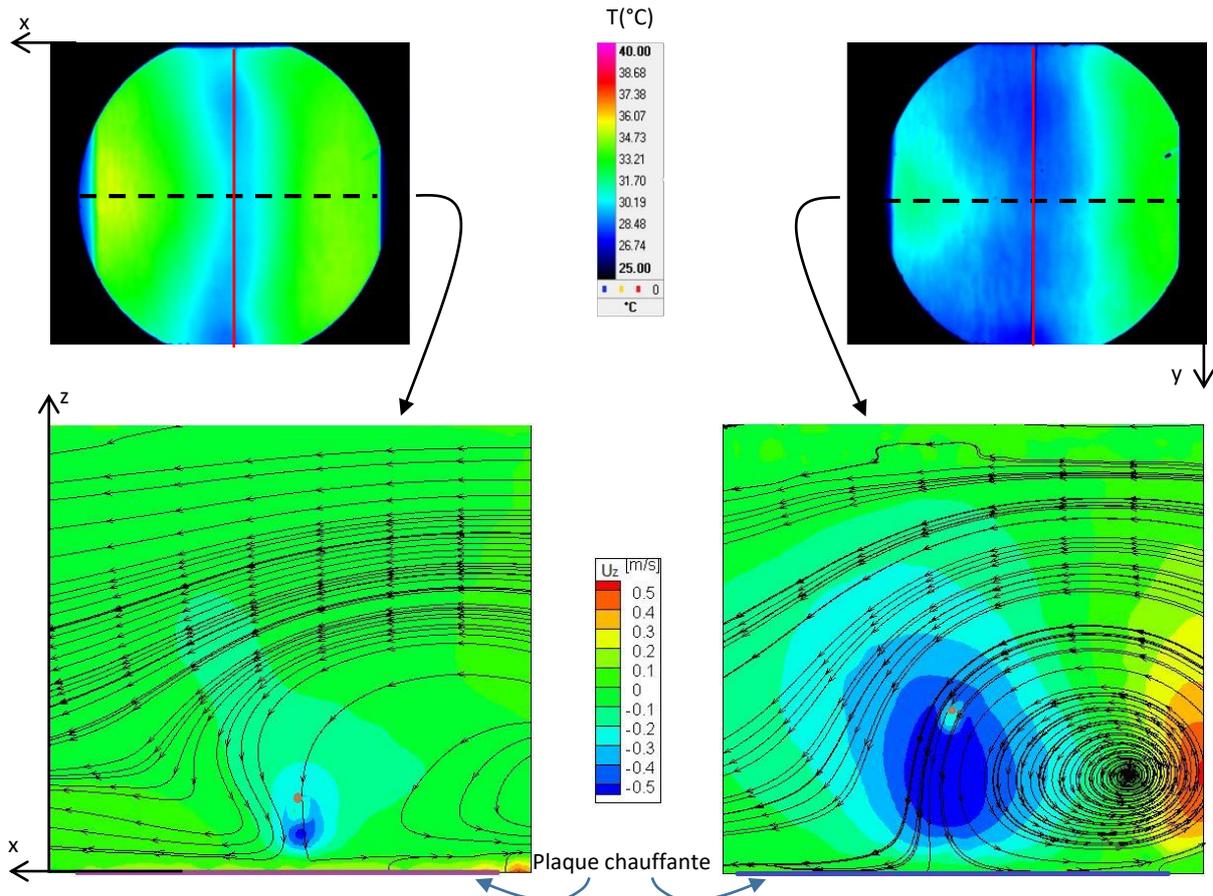


Figure 24. Visualisation par PIV de l'écoulement d'air (composantes de la vitesse verticale U_z et lignes de courant) dans le plan central parallèle à l'écoulement principal ($U = 0,3 \text{ m/s}$), dans la configuration fil transversal et pour deux distances inter-électrodes d (2 et 6 cm).

A l'instar des images obtenues par caméra infrarouge, la PIV ne permet pas uniquement une analyse qualitative du problème mais offre tout un panel d'informations quantitatives liées aux vitesses d'air. La difficulté repose alors sur la gestion de cette quantité d'informations : quel(s) paramètre(s) extraire pour une analyse objective... composantes suivant x , suivant z , vorticité ? Et selon quelle dimension d'espace... 1D, 2D ? Des cartographies de gradient de vitesse dans les plans permettent ainsi de visualiser et de comparer les zones d'intensification des transferts tandis que l'affichage de la composante verticale de la vitesse selon des lignes horizontales rend compte du comportement du jet généré par le vent ionique (Hamdi, 2014). D'autres techniques plus complexes à mettre en œuvre, comme la PIV Stéréoscopique, ont également été testées dans ce dispositif expérimental. Cette dernière technique permet, dans un plan, d'avoir accès aux 3 composantes de la vitesse. Ayant l'avantage d'offrir une visualisation tridimensionnelle des écoulements, elle pourrait être appliquée dans des configurations encore plus complexes que celles que nous avons étudiées. Dans notre cas elle rend compte de l'épanouissement du jet généré par le fil placé longitudinalement comme exposé sur la Figure 26.

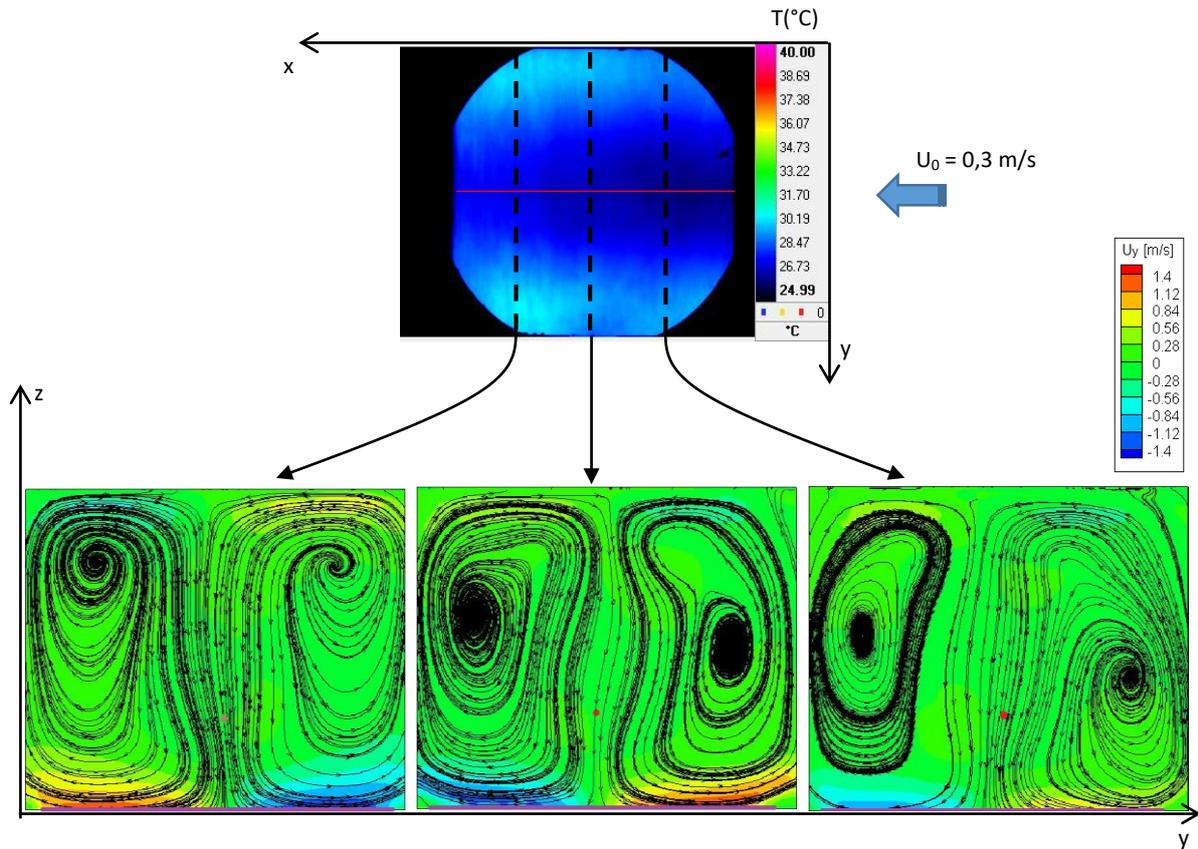


Figure 25. Visualisation par PIV de l'écoulement d'air (composantes U_y et lignes de courant) dans 3 plans perpendiculaires à l'écoulement principal dans une configuration fil longitudinal ($d = 4$ cm, $U = 0,3$ m/s)

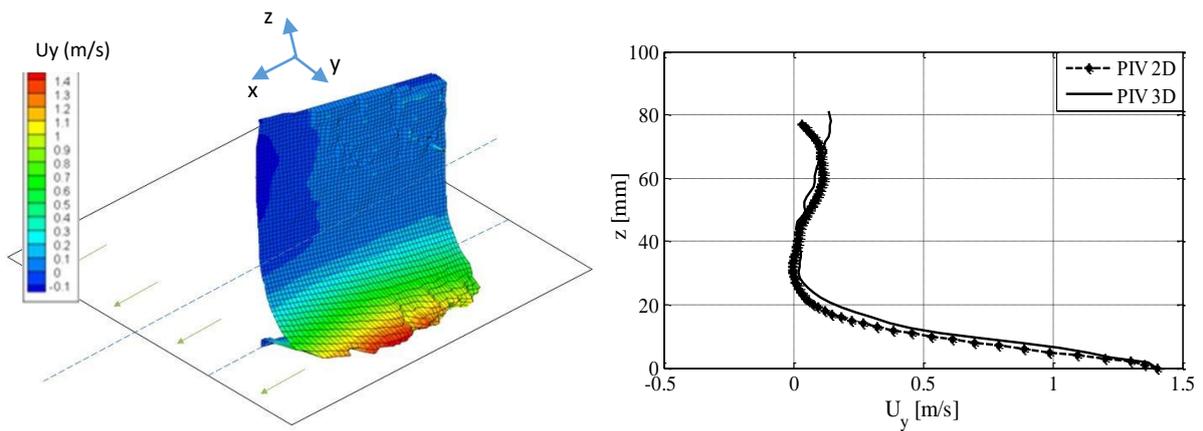


Figure 26. Visualisation par PIV Stéréoscopique de l'écoulement d'air (composante U_y) dans 1 plan parallèle à l'écoulement principal pour une configuration fil longitudinal ($d = 4$ cm, $U = 0,3$ m/s) et comparaison avec les données issues de la PIV 2D.

Conclusions, généralisation et perspectives

Les études expérimentales menées sur ce dispositif montrent qu'il est possible, avec une électrode filaire, de générer des écoulements secondaires à des vitesses maximales de l'ordre de 1,5 m/s, qui, associés à un écoulement primaire, peuvent multiplier par 7 ou 8 les coefficients de transferts par convection. Il est tentant de vouloir généraliser les résultats obtenus par une corrélation exprimant le nombre de Nusselt en fonction de plusieurs paramètres adimensionnels. Une première approche évoquée dans les travaux de M. Hamdi (2014) suggère de faire apparaître le nombre EHD, N_{EHD} , défini comme le rapport de la vitesse du vent ionique U_e sur la vitesse de l'écoulement primaire. Ce nombre correspond également à la racine carrée du ratio forces volumiques électrostatiques sur forces d'inertie par unité de volume :

$$N_{EHD} = \frac{U_e}{U} = \sqrt{\frac{I}{\rho_f b L_{fil} U^2}} \quad (18)$$

I est le courant de décharge, le paramètre b prend pour valeur $2,2 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ et représente la mobilité des ions dans l'air tandis que L_{fil} est la longueur du fil. On retrouve couramment ce nombre dans la littérature dédiée aux problèmes de décharge couronne, notamment pour l'étude de la précipitation électrostatique. Le nombre de Nusselt Nu_m , basé sur le coefficient de convection moyen h_m et avec comme longueur caractéristique la largeur de la plaque chauffante L_{plaque} prend alors la forme :

$$Nu_m = a_1 Pr^{0.33} \left(\frac{d}{L_{plaque}} \right)^{a_2} N_{EHD}^{a_4} \quad (19)$$

Les constantes a_1 , a_2 , a_3 et a_4 , toutes positives, prennent des valeurs différentes suivant la configuration (fil transversal ou fil longitudinal). Cette corrélation permet de trouver le nombre de Nusselt expérimental à $\pm 20\%$. Elle n'est valable qu'en présence d'électroconvection et pour des vitesses d'écoulement primaire comprises entre 0,3 et 1 m/s.

Malgré des résultats encourageants, l'analyse dimensionnelle, basée uniquement sur les notions de vitesse de vent ionique et vitesse d'écoulement primaire, souffre néanmoins de l'absence du nombre de Reynolds caractéristique de l'écoulement dans le canal. Cette généralisation des résultats n'est donc pas, à l'heure actuelle, complètement satisfaisante et des efforts restent à faire, surtout si l'objectif ultime est le développement d'un dispositif industriel capable de traiter des surfaces plus grandes, ce qui suppose une multiplication des électrodes de décharge.

Dans ce cadre-là justement, il peut s'avérer plus important de travailler sur l'homogénéité du traitement plutôt que sur l'intensification seule. Des expérimentations complémentaires ont ainsi été réalisées où 2 fils étaient disposés longitudinalement dans le canal. Un nouveau paramètre rentrait alors en compte dans l'analyse : la distance inter-fils. Parmi les quelques configurations testées, celle caractérisée par les plus grandes valeurs inter-électrodes (6 cm) et inter-fils (7 cm) offraient le traitement le plus homogène. Pour parvenir à ces conclusions, l'analyse détaillée des images thermiques était nécessaires et la visualisation des écoulements par PIV permettait de relier l'homogénéité du traitement à l'épanouissement et à la coalescence des deux jets générés par les électrodes de décharge.

En conclusion, la généralisation des différents résultats obtenus nécessite une analyse dimensionnelle beaucoup plus détaillée mais doit être réfléchi en fonction de l'objectif visé. L'intensification seule est insuffisante, pour une application de séchage par exemple, et au nombre de Nusselt devrait être associé un index d'hétérogénéité. Devant le nombre très important de configurations possibles -

fil(s)/plaque(s), pointe(s)/plaque(s) – inventorier et classer les solutions optimales dédiées à des applications de séchage requièrent des expérimentations supplémentaires.

II.6. Vers la modélisation des procédés utilisant le vent ionique

On l'a vu précédemment, l'intensification des transferts par électro convection repose sur la combinaison de deux écoulements et dépend de nombreux paramètres comme la distance inter-électrode, la tension appliquée, la vitesse de l'écoulement primaire, etc. Devant le nombre de variables d'entrée possibles et la nécessité d'utiliser des méthodes de mesure complexes, l'obtention d'une configuration optimale par le biais d'études expérimentales devient une entreprise longue et difficile. La simulation numérique s'avère un outil prometteur pour la recherche de tels optimums de fonctionnement. Encore faut-il que celle-ci rende compte le plus fidèlement possible de la réalité physique.

Lorsqu'une charge d'espace est générée, le champ électrique \mathbf{E} entre les 2 électrodes peut être décrit par la loi de Gauss :

$$\nabla \mathbf{E} = \frac{\rho_c}{\varepsilon_0} \quad (20)$$

Où \mathbf{E} est un champ vectoriel, ρ_c la densité de charge (C/m^3) et ε_0 la permittivité diélectrique du vide ou de l'air. Le champ \mathbf{E} étant relié au gradient de potentiel électrique par la relation suivante :

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (21)$$

la combinaison des 2 équations conduit à l'équation de Poisson qui permet de calculer le potentiel V :

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_c}{\varepsilon_0} \quad (22)$$

Sous l'effet des forces de Coulomb, les ions se déplacent vers l'électrode de masse et les charges créent un courant électrique dont la densité \mathbf{J} résulte de plusieurs contributions :

$$\mathbf{J} = b\mathbf{E}\rho_c + \mathbf{U}\rho_c - D_n\nabla\rho_c \quad (23)$$

Le premier terme du membre de droite correspond au mouvement des ions sous l'effet du champ électrique, le deuxième terme au transport des charges par l'écoulement d'air et le dernier est un terme de diffusion. Le coefficient de diffusion D_n est constant et égal à $5,3 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Le terme de convection lié au vecteur vitesse \mathbf{U} peut en réalité être négligé comme le terme de diffusion même si ce dernier peut être conservé dans l'équation pour des raisons de stabilité numérique.

D'autre part, dans les conditions stationnaires, la densité de courant doit satisfaire l'équation de conservation de la charge :

$$\nabla \mathbf{J} = 0 \quad (24)$$

Par combinaison des différentes équations on obtient celle qui régit le transport de la charge ρ_c (dans laquelle le terme convectif lié à l'écoulement d'air a été négligé) :

$$\nabla(D_n \nabla \rho_c) + b \nabla \rho_c \nabla V = b \frac{\rho_c^2}{\varepsilon_0} \quad (25)$$

Pour l'écoulement d'air, on utilise les équations de Navier-Stokes associées à une modélisation statistique de la turbulence (méthode RANS). L'approximation de Boussinesq peut être utilisée pour les forces de gravité et l'effet du champ électrique est pris en compte par l'intermédiaire des forces de Coulomb $\rho_c \mathbf{E}$:

$$\rho_f (\mathbf{U} \nabla \mathbf{U}) = -\nabla p + (\mu_f + \mu_t) \nabla^2 \mathbf{U} + (\rho_f - \rho_{f0}) \mathbf{g} + \rho_c \mathbf{E} \quad (26)$$

Où la viscosité turbulente μ_t pourra être déduite à partir d'un modèle de turbulence k- ε .

La modélisation des phénomènes électrohydrodynamiques est donc décrite par le système d'équations précédent. On devra rajouter l'équation de la chaleur à celui-ci si on s'intéresse en plus aux transferts de chaleur. La résolution des équations permettant de déterminer le champ électrique et la densité de charge est loin d'être triviale. D'abord parce que ce sont des équations non linéaires et couplées et ensuite parce que les géométries sont telles qu'un nombre de maille très important est nécessaire au niveau de l'électrode de décharge. Une dernière difficulté et non des moindres concerne les conditions aux limites. Si celles-ci sont simples à mettre en œuvre pour le champ électrique - on assigne le potentiel élevé à l'électrode de décharge tandis que la plaque réceptrice est reliée à la masse ($V_0 = 0$ V) – il n'en est pas de même pour la densité de charge dont la valeur n'est pas connue au niveau du fil. La démarche classique consiste à présupposer une valeur de densité de charge et, par une procédure itérative, à trouver celle qui permet d'obtenir le champ électrique de déclenchement de la décharge couronne. Ce champ électrique à l'électrode de décharge est donné par une loi semi-empirique connue sous le nom de loi de Peek :

$$E_{peek} = 3 \times 10^6 \left(\delta + 0,0308 \sqrt{\frac{\delta}{r_{fil}}} \right) \quad (27)$$

Le paramètre δ représente la masse volumique relative de l'air ($\delta = T_0 p / T p_0$), T_0 et p_0 étant respectivement les température et pression de référence (293 K et 101 325 Pa), et r_{fil} est le rayon de l'électrode de décharge.

Cette démarche a été utilisée avec succès dans la thèse de S.A. Ould Ahmedou (2010) où étaient comparés coefficients de convection obtenus numériquement avec ceux mesurés expérimentalement pour un espace inter-électrode de 3 cm. Les champs de vitesse obtenus par PIV devaient être l'occasion de tester cette approche numérique dans une nouvelle géométrie de canal. Il s'avère que les résultats ne sont pas ceux escomptés et si effectivement, lorsqu'une convergence est obtenue, les coefficients de convection locaux sont estimés à 20% près, il n'en est pas de même des profils de vitesse dont les valeurs sont sous-estimées. Ces résultats posent question, et pas seulement sur la méthodologie employée pour l'élaboration des conditions aux limites, comme la validité de la loi de Peek. La modélisation des écoulements non isothermes reste en effet un problème en soi et l'on sait par exemple que les modèles simples de type k- ε ne sont pas adaptés à la description des écoulements de type jets en impact. Il ne faut pas pour autant rejeter cette démarche de modélisation car elle seule permettra à moindre coût de réaliser une étude paramétrique complète. Les travaux initiés doivent donc être poursuivis suivant deux axes : la définition des conditions aux limites au niveau de l'électrode de décharge et le choix de modèles physiques (modèles de turbulence par exemple) et de méthodes

de résolution numérique (éléments finis ou volumes finis, solveurs...) adaptés aux écoulements anisothermes.

II.7. Applications et analyse de l'efficacité

Séchage

Les travaux sur les dispositifs de génération de vent ionique au laboratoire sont dédiés à l'augmentation des transferts de masse et de chaleur. Certaines études ont concerné des procédés de cuisson comme celle du pain dans le cadre du projet Braise (Havet and Rouaud, 2011). Nous avons ainsi montré que l'on pouvait espérer tripler les transferts de chaleur par convection à température ambiante. La grande sensibilité de l'apparition de la décharge couronne par rapport aux conditions d'humidité dans le four pose néanmoins de sérieux problèmes de maîtrise du procédé (influence prépondérante du "coup de buée"). De plus, la nécessité d'avoir une électrode collectrice n'est pas compatible avec le type de sole actuel ce qui suppose de repenser complètement l'architecture d'un four à pain. La technologie a également été testée, avec cette fois-ci plus de succès, pour l'obtention de pruneaux à partir de prunes d'Ente (Rouaud et al., 2012). Les résultats de perte de masse étaient similaires voire meilleurs que ceux obtenus avec un traitement conventionnel. On pouvait sans doute espérer des gains énergétiques conséquents mais l'étude n'a pas été poursuivie faute de financement.

La plupart des applications cependant concerne le séchage de produits à basse température (Dinani et al., 2013). Le dispositif développé dans le cadre de la thèse de M. Hamdi a ainsi été adapté pour sécher des produits modèles mais aussi des produits réels (Dinani and Havet, 2015; Rouaud et al., 2015). La plaque chauffante a été remplacée par un porte échantillon en matériau plastique dont le fond est recouvert d'une plaque de cuivre reliée à la terre, le tout posé sur une balance. L'ensemble est positionné de telle manière que la surface supérieure de l'échantillon vienne affleurer la paroi inférieure du canal. Trois configurations de séchage EHD ont été étudiées et comparées à un séchage conventionnel par convection forcée n'utilisant que l'écoulement principal :

Cas A : fil transversal, $d = 6 \text{ cm}$, $V = 16 \text{ kV}$, $U = 0,3 \text{ m/s}$

Cas B : 2 fil longitudinaux, $d = 6 \text{ cm}$, $d_{int_fil} = 7 \text{ cm}$, $V = 16 \text{ kV}$, $U = 0,3 \text{ m/s}$

Cas C : fil longitudinal, $d = 4 \text{ cm}$, $V = 16 \text{ kV}$, $U = 0,3 \text{ m/s}$

La Figure 27 montre qu'un séchage utilisant 1 seul fil longitudinal pour une vitesse d'air primaire de 0,3 m/s (Cas C) donne des résultats similaires à un séchage dans un canal caractérisé par une vitesse d'air de 2 m/s. Ces résultats justifient l'hypothèse de départ du lien entre intensification du séchage et coefficient de convection et corroborent les études réalisées précédemment où, pour une tension spécifique de 16 kV, la configuration fil longitudinal offrait la plus grande intensification des transferts.

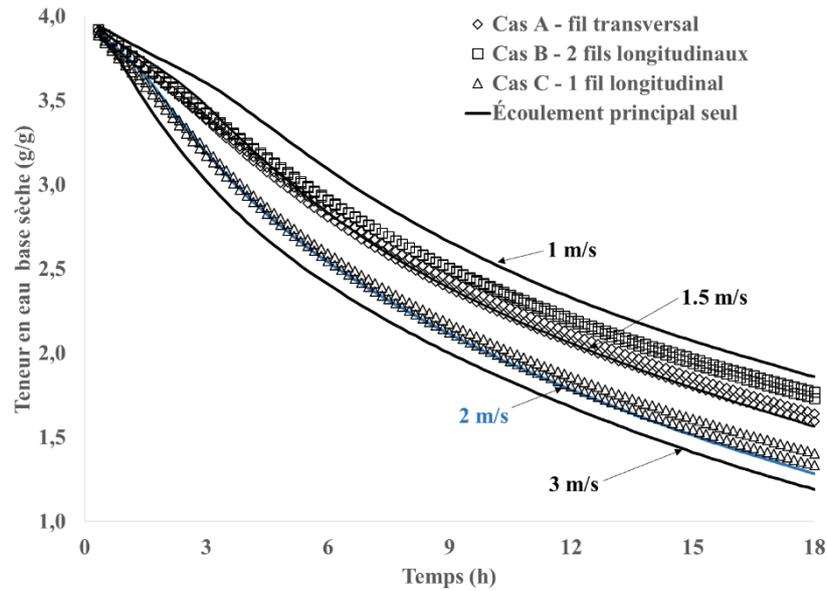


Figure 27. Variation de la teneur en eau d'un gel de méthylcellulose au cours d'un séchage EHD (Cas A à C, $U = 0,3$ m/s) et par convection forcée liée à l'écoulement principal seul ($U = 1$ à 3 m/s).

Analyses énergétique et exergétique

Les avantages apportés par toute technique d'intensification doivent être confirmés ou nuancés par une étude énergétique. La démarche dans le cadre du séchage EHD consiste d'abord à considérer l'énergie consommée par la centrale de traitement d'air. Il s'agit en réalité d'une estimation puisque la puissance correspondante P_{CTA} est calculée en considérant un système capable, dans un premier temps, de déshumidifier l'air à température constante T_0 puis de le réchauffer ensuite à la température T_a souhaitée :

$$P_{CTA} = \dot{m}_{as}(h_{(T_0,HR_0)} - h_{(T_0,HR_1)}) + \dot{m}_{as}(h_{(T_a,HR_a)} - h_{(T_0,HR_1)}) \quad (28)$$

\dot{m}_{as} est le débit d'air sec et les différentes enthalpies de l'air sont déterminées à partir des températures T et des humidités relatives HR en utilisant un diagramme psychrométrique (Mollier) et les formules afférentes. On choisit également, arbitrairement, un état de référence $(T_0, HR_0) = (20^\circ\text{C}, 50\%)$ et les caractéristiques de l'air en entrée de canal de séchage sont régulées de telle manière que $(T_a, HR_a) \approx (30^\circ\text{C}, 17\%)$. Cette démarche minimise la puissance réellement consommée pour le traitement de l'air mais permet de s'affranchir du choix technologique réalisé pour cette opération. Les différentes configurations de séchage peuvent ensuite être comparées en ajoutant à cette puissance celle éventuellement liée à l'utilisation de la haute tension P_{EHD} . Ainsi, utiliser une vitesse d'air primaire de 2 m/s implique dans nos conditions de température et d'humidité une puissance P_{CTA} de 1140 W environ contre 165 W pour une vitesse de 0,3 m/s. La puissance supplémentaire due à la haute tension est de l'ordre du Watt (Figure 21) ce qui rend son utilisation attractive.

On peut ensuite, pour qualifier le séchage par électroconvection, définir un rendement basé sur la puissance nécessaire à l'évaporation de l'eau du produit P_{evap} :

$$\eta_{en} = \frac{P_{evap}}{P_{CTA} + P_{EHD}} \quad (29)$$

Où

$$P_{evap} = \dot{m}_{eau} L_v \quad (30)$$

\dot{m}_{eau} étant le débit d'eau évaporée, L_v , la chaleur latente de vaporisation à la température de séchage. Ce rendement, calculé au cours du temps, permet de différencier séchage électroconvectif et séchage par convection forcée. Avec ces calculs, on montre que le séchage EHD est au moins 4 fois plus efficace lors des premières heures du traitement, l'amélioration étant bien évidemment due au débit moindre d'air primaire nécessaire dans le cas d'un séchage EHD.

En complément de l'analyse énergétique, nous proposons une approche originale basée sur l'évolution temporelle du rendement exergetique. Le modèle présenté par Dincer and Sahin (2004) est modifié pour prendre en compte la variation de masse du produit au cours du séchage ainsi que la puissance électrique P_{EHD} .

$$\eta_{ex} = \frac{\left(1 - \frac{T_0}{T_a}\right) P_{evap}}{\dot{m}_{as} ex_a + P_{EHD}} \quad (31)$$

Dans cette équation, l'exergie chaleur liée à l'évaporation est exprimée en corrigeant la puissance évaporatoire P_{evap} par un facteur de Carnot où l'on suppose que la température du produit au cours du séchage est égal à la température de l'air T_a . Le flux exergetique associé à l'air de séchage est défini à partir de l'exergie spécifique ex_a dont on trouvera une expression détaillée dans l'article de Dincer and Sahin (2004). On montre ainsi (Figure 28) que le rendement exergetique est plus élevé pour un séchage EHD et qu'il décroît après les premières heures de séchage, au fur et à mesure que les phénomènes diffusifs deviennent limitants. L'approche exergetique, contrairement à l'approche énergétique, ne dépend que des états initial (T_0, HR_0) et final (T_a, HR_a) et ne suppose pas une transformation particulière de l'air de séchage. Même si on peut débattre du choix de l'état de référence et du facteur de Carnot, le rendement exergetique offre ainsi un complément idéal à l'analyse des pertes de masse pour qualifier l'efficacité d'un séchage.

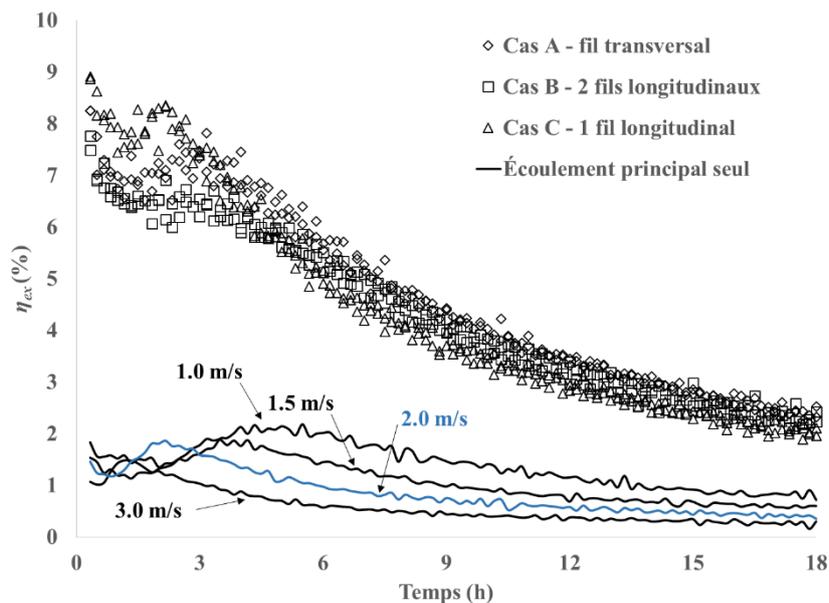


Figure 28. Évolution du rendement exergetique au cours d'un séchage EHD (Cas A à C, $U = 0,3$ m/s) et par convection forcée liée à l'écoulement principal seul ($U = 1$ à 3 m/s).

Conclusions

Les applications de séchage étudiées ont permis de montrer l'avantage apporté par l'électroconvection, que ce soit sur des produits modèles ou des produits alimentaires réels (champignons, prunes...). Ces conclusions sont supportées par des mesures de température et de masse, mesures relativement simples à mettre en œuvre, une fois les précautions prises pour éviter les perturbations électromagnétiques. Les mesures de pertes de masse permettent ainsi de calculer des vitesses de séchage, qui sont classiquement visualisées en fonction du temps ou en fonction de la teneur en eau base sèche. Dans toutes les expériences réalisées, l'influence des écoulements – et par conséquent celle du vent ionique – n'a de réalité que durant les premières heures du traitement. Ce sont ensuite les phénomènes de diffusion interne au produit qui pilotent le séchage. A noter également que si l'avantage du traitement EHD est clairement établi, les cinétiques de séchage diffèrent suivant les produits et l'environnement (écoulement d'air contrôlé en canal ou brassage dans des enceintes climatisées). On observe ainsi des vitesses de séchage qui décroissent puis augmentent jusqu'à un maximum avant de décroître définitivement dans le cas du séchage de gel de méthylcellulose dans le canal. On retrouve une 'empreinte' de ces cinétiques dans les rendements énergétiques et exergétiques qui font intervenir le flux d'eau évaporée (entre 0 et 4 h sur la Figure 28 pour le rendement exergétique). Les expériences réalisées sur des produits réels tels que les champignons sont quant à elles caractérisées par une décroissance de ces vitesses de séchage ou par des vitesses constantes durant les premières heures.

Pour conclure, même si le nombre d'expérimentations demeure toutefois encore trop faible pour pouvoir proposer des interprétations claires et définitives sur les cinétiques de séchage, le lien entre écoulement secondaire et intensification des transferts d'eau a été clairement établi. La définition de rendements énergétique et exergétique et leur évolution au cours du temps permettent de comparer différentes configurations et de quantifier l'avantage apporté par un écoulement secondaire créé par un champ électrique.

II.8. Conclusions et perspectives

L'étude sur le vent ionique appliqué au traitement des produits alimentaires constitue l'une des spécificités du laboratoire. La démarche scientifique adoptée se veut la plus complète possible, en alliant approche plus fondamentale - évaluation des vitesses générées, détermination des coefficients de transferts sur plaque plane... - et application – séchage de produits alimentaires. Elle nous a permis d'utiliser un large éventail de moyens expérimentaux complexes et complémentaires et d'évaluer la pertinence d'outils numériques.

Les perspectives à court et long termes sont nombreuses. Pour aller vers le développement d'un pilote industriel, il faudra mieux discuter des optimums énergétiques en fonction des distances inter-fils et inter-électrodes, en intégrant à l'analyse le rendement du générateur de haute tension qui peut être très faible (Kudra and Martynenko, 2015). Il serait également nécessaire d'évaluer l'influence d'une humidité variable en cours de traitement (régulation à mettre en place) et bien sûr de ne pas oublier d'étudier l'impact du traitement (présence de champs électriques) sur le produit lui-même. L'approche numérique est à poursuivre et des solutions restent à trouver, notamment sur la modélisation des conditions aux limites, pour faire converger plus facilement n'importe quelle configuration géométrique. La réflexion concernant l'adimensionnalisation doit également être approfondie et la recherche de paramètres qualifiant la qualité du séchage (rendements, hétérogénéité) nécessitera sans doute des essais sur des produits de nature différente. Enfin, la quasi instantanéité du phénomène – à l'échelle des transferts – laisse présager un intérêt pour le traitement par pulses. Pour conclure, la

multiplicité des configurations possibles (fils ou aiguilles et leur agencement) et le manque d'études encore approfondies sur ce procédé montre que le sujet est loin d'être épuisé. Le séchage EHD devrait donc nous occuper pendant plusieurs années encore et renforcer les liens tissés avec E. Bardy du Grove City College.

III. Intensification des transferts par Micro-ondes

III.1. Introduction

Découverte par hasard par P. Spencer au milieu du 20^{ème} siècle (Spencer, 1950), l'utilisation des micro-ondes comme source d'énergie pour la cuisson des produits alimentaires fait maintenant partie de notre quotidien. Son déploiement au sein des industries alimentaires reste toutefois confidentiel, soit parce que les dites industries rechignent à communiquer sur leur utilisation (micro-ondes = radiations) soit tout simplement parce que la mise au point d'un tel procédé est complexe, tant les interactions entre les micro-ondes et une matière dont les propriétés évoluent en cours de chauffage sont encore méconnues.

L'intensification des transferts par micro-ondes rejoint d'une certaine manière la catégorie des méthodes actives où une source complémentaire d'énergie, de type électrique, est utilisée. Mais contrairement au procédé EHD, où l'énergie électrique est transformée en énergie cinétique pour perturber la couche limite à l'interface fluide-paroi, ici, c'est l'énergie transportée par l'onde électromagnétique qui est directement dégradée en chaleur au sein du produit alimentaire. Comme il est inutile de chauffer un fluide intermédiaire (air par exemple) pour assurer le traitement thermique du produit, les procédés micro-ondes sont considérés comme offrant un haut rendement énergétique.

Notre laboratoire s'est donc naturellement intéressé aux applications utilisant cette technologie et à l'initiative de L. Boillereaux les premiers travaux ont concerné la décongélation par micro-ondes (Akkari, 2007; Curet, 2005). Au même titre que la congélation, la décongélation est une étape très importante du point de vue industriel car elle peut influencer la qualité finale de l'aliment. L'eau redevenant disponible, de nombreuses modifications peuvent intervenir au sein du produit, comme des dégradations d'ordre biochimique. La décongélation doit donc être une opération rapide pour limiter ces transformations indésirables. Les micro-ondes répondent bien à ce critère de rapidité mais sont susceptibles d'engendrer de forts gradients thermiques au sein du produit alimentaire, allant jusqu'à ce qu'on appelle l'emballement thermique. Les micro-ondes agissant principalement sur les molécules d'eau sous forme liquide, la partie du produit qui va se décongeler en premier absorbera d'un seul coup l'intégralité de l'énergie micro-onde. Cette puissance volumique étant bien supérieure aux flux de chaleur par conduction, les parties décongelées s'échaufferont rapidement tandis que les parties congelées adjacentes resteront à température presque constante. Cet emballement thermique est bien évidemment préjudiciable au produit, notamment parce que la température de surface de ce dernier doit être limitée pour empêcher la croissance des microorganismes. La maîtrise du procédé de décongélation par micro-ondes, avec pour objectif une homogénéisation du traitement, a ainsi fait l'objet d'une grande partie de mes activités de recherche. Une première solution, consistant à appliquer un jet d'air froid turbulent à la surface du produit pendant la décongélation, a tout d'abord été proposée (Curet, 2005). Ce travail s'est ensuite poursuivi par le développement de modèles mathématiques combinant micro-ondes et convection forcée (Curet, 2008) et leur adaptation à une logique de contrôle/commande (ANR Plug & Play, 2008-2011).

À ce verrou technologique portant sur la maîtrise de l'emballement thermique est associé un verrou plus scientifique constitué de la modélisation des phénomènes de transfert et de la compréhension

des interactions micro-ondes matière. Ce travail sur la modélisation est d'autant plus justifié que la décongélation par micro-ondes reste encore peu documentée, la littérature étant beaucoup plus abondante sur les applications telles que la pasteurisation, le séchage ou tout simplement la cuisson de produits alimentaires (Chandrasekaran et al., 2013). Les propriétés diélectriques varient très fortement lors du changement d'état glace/eau, l'application décongélation a permis de tester la validité et la robustesse des modèles mathématiques choisis. Une fois cette étape de validation réalisée, la simulation numérique a permis d'apporter de précieuses informations sur le comportement d'un produit congelé soumis à un champ micro-onde. Plus tard, ces modèles ont été étendus à d'autres applications comme la cuisson en four tunnel micro-ondes (Methlouthi, 2011) ou utilisés pour étudier la régénération de produits panés dans le cadre de contrats industriels.

III.2. La modélisation comme outil d'investigation

Principe d'un chauffage par micro-ondes

Les micro-ondes qui font l'objet de ces études sont des ondes électromagnétiques qui, caractérisées par une fréquence de 2,45 GHz, interagissent avec les matériaux diélectriques. Ces derniers, globalement neutres d'un point de vue électrique, c'est-à-dire non conducteurs, possèdent des molécules dotées d'une répartition dissymétrique de charges - la molécule d'eau, constituant principal des aliments, est justement un bon exemple de dipôle électrique. Celles-ci s'orientent dans le sens du champ électrique et lorsque celui-ci est alternatif, les polarisations successives vont entraîner des rotations très rapides des molécules dipolaires. Les forces de liaison moléculaire, dans le cas de l'eau sous forme liquide par exemple, s'opposent à ce mouvement et engendrent des phénomènes de relaxation qui génère de la chaleur. Pour décrire l'évolution de la température d'un produit, il faut donc rajouter un terme source Q_{abs} à l'équation de la chaleur :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k\nabla T) + Q_{abs} \quad (32)$$

La permittivité électrique ε permet de caractériser le comportement du matériau vis-à-vis du champ électrique. Normalisée par rapport aux caractéristiques du vide, elle fait apparaître deux propriétés distinctes, la constante diélectrique ε_r' et le facteur de pertes diélectriques ε_r'' et s'écrit sous forme complexe :

$$\varepsilon = \varepsilon_0(\varepsilon_r' - j\varepsilon_r'') = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (33)$$

Avec ε_0 la permittivité du vide ou de l'air. Si ε_r' représente la faculté du matériau à se polariser, ε_r'' traduit l'aptitude du diélectrique à s'échauffer et on retrouve ce paramètre dans l'expression de la puissance absorbée Q_{abs} .

$$Q_{abs} = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_r'' |E_{rms}|^2 \quad (34)$$

Où f représente la fréquence de l'onde et E_{rms} la valeur efficace du champ électrique. La génération de chaleur au sein du matériau diélectrique va donc essentiellement dépendre de la forme du champ électrique.

Approche numérique du chauffage micro-ondes

La modélisation s'avère être un outil indispensable pour comprendre les traitements micro-ondes car elle permet d'accéder à des informations très difficiles voire impossibles à mesurer expérimentalement comme le champ électrique local et la puissance volumique dissipée qui en résulte. Il existe plusieurs approches pour modéliser le terme source lié aux micro-ondes et notre travail a consisté dans un premier temps à évaluer la pertinence de ces différentes méthodes, quelle que soit l'application visée.

La première approche repose tout simplement sur la résolution des équations de Maxwell permettant d'accéder au champ électrique en tout point du matériau :

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{\varepsilon} \nabla \times \left(-\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{E} \right), \quad (35)$$

où μ est la perméabilité du milieu, qui, dans le cas des applications qui nous concerne, est constante et identique à celle du vide μ_0 . La méthode des éléments finis peut être utilisée, via le logiciel COMSOL®, et la résolution ne pose pas de problèmes particuliers hormis quelques précautions à prendre en termes de conditions aux limites.

D'autres approches sont cependant nécessaires pour limiter les temps de calculs et pour pouvoir utiliser plus facilement les modèles prédictifs dans une logique de contrôle/commande ne nécessitant pas l'achat de logiciels commerciaux coûteux. L'objectif est d'obtenir le terme source Q_{abs} sans avoir recours à la simulation du champ électrique. Plusieurs approximations peuvent alors être envisagées. L'approche de type 'Loi de Lambert' est basée sur une décroissance exponentielle de la puissance micro-onde au sein du diélectrique. Reposant sur l'expression de la profondeur de pénétration d'une onde, elle a parfois été adaptée pour prendre en compte la variation des propriétés diélectriques du milieu (Ni et al., 1999) :

$$Q_{abs}(z) = \frac{P_0}{d_p(z)} \exp\left(-\int_0^z \frac{dz}{d_p(z)}\right) \quad (36)$$

Avec la profondeur de pénétration d_p donnée par :

$$d_p(z) = \frac{c_0}{2\sqrt{2}\pi f \sqrt{\sqrt{\varepsilon_r'^2 + \varepsilon_r''^2} - \varepsilon_r'}} \quad (37)$$

Et où c_0 représente la vitesse de la lumière.

Valable pour une onde qui se propage suivant une seule dimension (axe z dans l'équation (éq.36)), elle nécessite la connaissance de la densité de puissance micro-onde P_0 à la surface du produit. Nous avons montré que cette approche n'était pas compatible avec des procédés de décongélation. Elle ne permettait pas de rendre compte des phénomènes de résonance qui ont lieu dans les produits alimentaires caractérisés par de très faibles propriétés diélectriques, comme c'est le cas d'un produit congelé. L'approximation de type 'Loi de Lambert' est à réserver aux produits à fortes propriétés diélectriques faiblement dépendantes de la température ou de la teneur en eau et lorsque les dimensions des produits traités sont suffisamment grandes (supérieures à quelques centimètres).

Une autre simplification consiste à introduire un coefficient d'absorption dépendant de la température de manière exponentielle pour pouvoir prendre en compte les éventuels phénomènes d'emballement

thermique. Pour déterminer la puissance absorbée, un bilan d'énergie est effectué sur un volume élémentaire lors de la discrétisation de l'équation de la chaleur et :

$$Q_{abs}(z) = \gamma_0 \exp(\alpha T) \frac{\partial P_0}{\partial z} \quad (38)$$

Cette démarche permet d'obtenir de bons résultats si les produits sont suffisamment épais pour que les phénomènes de résonance soient faibles, car comme pour l'approche de type 'Loi de Lambert', la puissance est supposée décroître dans les couches inférieures du diélectrique. D'autre part, elle nécessite au préalable l'estimation des constantes γ_0 et α , celles-ci pouvant être obtenues par méthode inverse (Akkari et al., 2005).

La dernière approche étudiée repose sur les solutions semi-analytiques développées plus récemment par l'équipe de T. Basak (Bhattacharya and Basak, 2006). Celles-ci proviennent de la résolution analytique des équations de Maxwell dans un diélectrique soumis à une onde plane incidente sur l'une de ses faces. L'expression de la puissance dissipée au sein du matériau va dépendre de la longueur d'onde des radiations λ_m dans le milieu, de la profondeur de pénétration des ondes et se distingue selon la dimension L du produit dans le sens de propagation.

$$Q_{abs}(z) = f(P_0, L, d_p, \lambda_m, z) \quad (39)$$

La fonction f suit une loi exponentielle si la longueur L est largement supérieure à la profondeur de pénétration. Sinon, elle donne lieu, soit à une puissance absorbée uniforme si L est inférieure à une grandeur critique, soit à un régime de résonance dans le cas contraire. Ces solutions semi-analytiques nous ont tout d'abord permis de vérifier l'exactitude des résultats fournis par le logiciel COMSOL® lors de la résolution des équations de Maxwell pour des forts et faibles diélectriques (Figure 29). Pour les faibles diélectriques par exemple, il est ainsi possible de générer de la chaleur au niveau de la surface opposée à l'onde incidente ($L = 21$ mm dans la Figure 29).

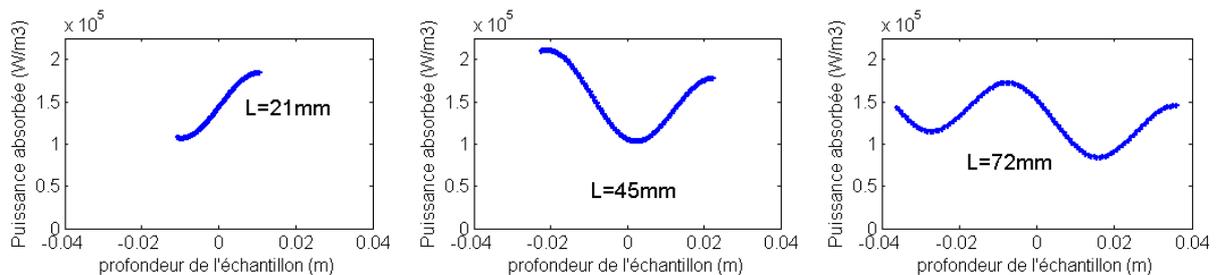


Figure 29. Exemples de profils de densité de puissance absorbée en fonction de la profondeur L de l'échantillon dans le cas d'un faible diélectrique (huile : $\epsilon_r' = 2$, $\epsilon_r'' = 0,15$) pour une micro-onde incidente de 3×10^4 W/m² provenant de la gauche du produit.–solution numérique, + solution semi-analytique (S. Curet, 2008).

Nous avons ensuite étendu le domaine de validité de ces solutions aux traitements micro-ondes impliquant des propriétés diélectriques variant en fonction de la température. Compte tenu de la fréquence de l'onde, la résolution de l'équation de propagation de l'onde électromagnétique se résume en effet à un problème stationnaire. Par exemple pour une onde plane uniforme se propageant dans la direction z , cette équation prend la forme suivante :

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} + (2\pi f)^2 \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_r(T) E_y = 0 \quad (40)$$

Les variations temporelle et spatiale de la puissance absorbée Q_{abs} sont donc obtenues à partir d'une succession d'états stationnaires de l'onde électromagnétique, fonctions des propriétés diélectriques du milieu.

Limites des solutions semi-analytiques et choix des modèles en fonction des géométries

On a pu démontrer les limites de cette approche dans le cas des propagations guidées. Dans les applications micro-ondes, l'onde électromagnétique doit en effet être guidée dans une structure métallique creuse jusqu'au produit que l'on souhaite traiter. Les dimensions des guides sont choisies de telle manière que l'onde puisse prendre des formes simples et maîtrisées. Pour la fréquence de 2450 MHz, la composante E_y du champ électrique est une demi-sinusoïde suivant x (Figure 30). On parle de propagation en mode TE_{10} .

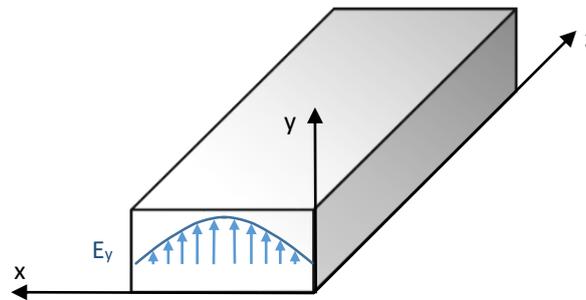


Figure 30. Propagation guidée d'une onde électromagnétique, mode TE_{10}

On passe ainsi d'une configuration monodimensionnelle à une configuration bidimensionnelle où la puissance Q_{abs} varie suivant x et z . Pour les forts diélectriques insérés dans ce guide, les solutions semi-analytiques sont un outil intéressant pour prédire la puissance absorbée au sein du matériau, que ce soit en régime résonnant ou pour des épaisseurs importantes justifiant une approche de type 'Loi de Lambert'. Pour les faibles diélectriques en revanche, les solutions semi-analytiques ne sont pas capables de reproduire les densités de puissance liée aux micro-ondes (Figure 31). En plus de différences d'amplitude, des déphasages sont observés entre les puissances issues des deux approches.

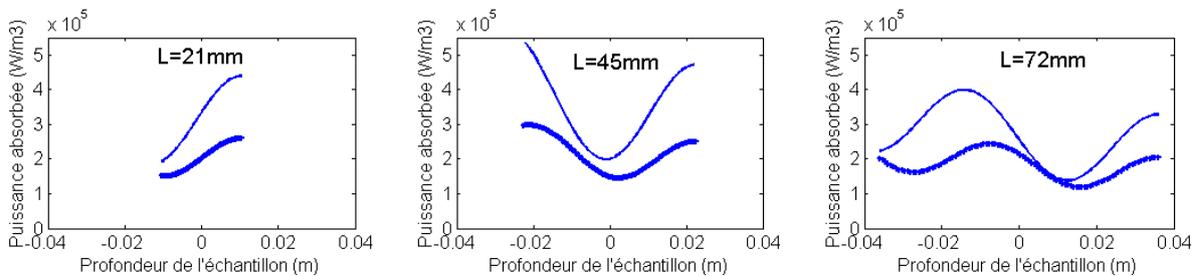


Figure 31. Exemples de profils de densité de puissance absorbée en fonction de la profondeur L de l'échantillon dans le cas d'un faible diélectrique (huile : $\varepsilon_r' = 2$, $\varepsilon_r'' = 0,15$) pour une micro-onde incidente guidée –solution numérique, + solution semi-analytique (S. Curet, 2008).

En propagation guidée, l'équation de propagation du champ électrique devient :

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} + (2\pi f)^2 \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_r(T) E_y = 0, \quad (41)$$

Dans le cas des forts diélectriques, la dérivée seconde de la variable E_y par rapport à x est négligeable devant celle relative à z . Ce n'est pas vérifié pour les faibles diélectriques où ces dérivées secondes sont du même ordre de grandeur. Les variations du champ suivant x ont ainsi une influence importante sur la propagation des ondes.

Cette étude théorique et numérique sur la propagation des ondes nous a permis de définir les domaines de validité d'approches simplifiées. Si les approches de type 'Loi de Lambert' sont à proscrire, les solutions semi-analytiques peuvent être utilisées pour le traitement de produits par une onde monodimensionnelle, même lorsque les propriétés diélectriques varient fortement. Cette démarche est particulièrement adaptée à des applications de type commande prédictive où l'obtention de résultats en temps réel est nécessaire (Boillereaux et al., 2009). Lorsque l'onde électromagnétique ne peut pas être réduite à une expression monodimensionnelle (produits sans surface plane, traitements en guide d'onde...) la résolution numérique des équations de Maxwell reste indispensable.

III.3. Applications

Décongélation et tempérage

Pour étudier le procédé de décongélation et de tempérage - qui consiste à chauffer un produit congelé sans aller jusqu'à la décongélation -, une double approche expérimentale et numérique a été utilisée (Figure 32).

Le dispositif expérimental est constitué d'un générateur SAIREM® (Miribel, France) relié à un guide d'onde de section (86 mm X 43 mm), générant une puissance micro-onde incidente de forme demi-sinusoïdale à une fréquence de 2,45 GHz. La cavité micro-onde, espace géométrique dans lequel est inséré le produit à traiter, est une portion de guide d'onde. Des couches de polystyrène sont ajoutées à l'intérieur et à l'extérieur de la cavité pour éliminer les transferts de chaleur par conduction à travers le guide métallique. Un dispositif expérimental identique, mais d'un fournisseur différent (MES®, Villejuif, France) et délivrant une puissance supérieure (2000 W) a également été utilisé pour ces études de décongélation. Le choix d'un traitement en guide d'onde monomode est justifié par le fait que seule cette configuration permet de contrôler la forme de l'onde incidente. On retrouvera cette contrainte dans la plupart des études propres aux traitements micro-ondes.

La simulation numérique effectuée via le logiciel COMSOL® reposait sur la méthode classique du Cp apparent. Le choix de la tylose comme produit modèle est naturel au sein du laboratoire, sa fabrication étant bien maîtrisée. La détermination de ses propriétés thermophysiques a été réalisée soit par mesure, soit par méthode inverse et des fonctions particulières ont été utilisées dans la zone de transition correspondant au changement de phase. Parfois des propriétés issues de la littérature ont directement été employées.

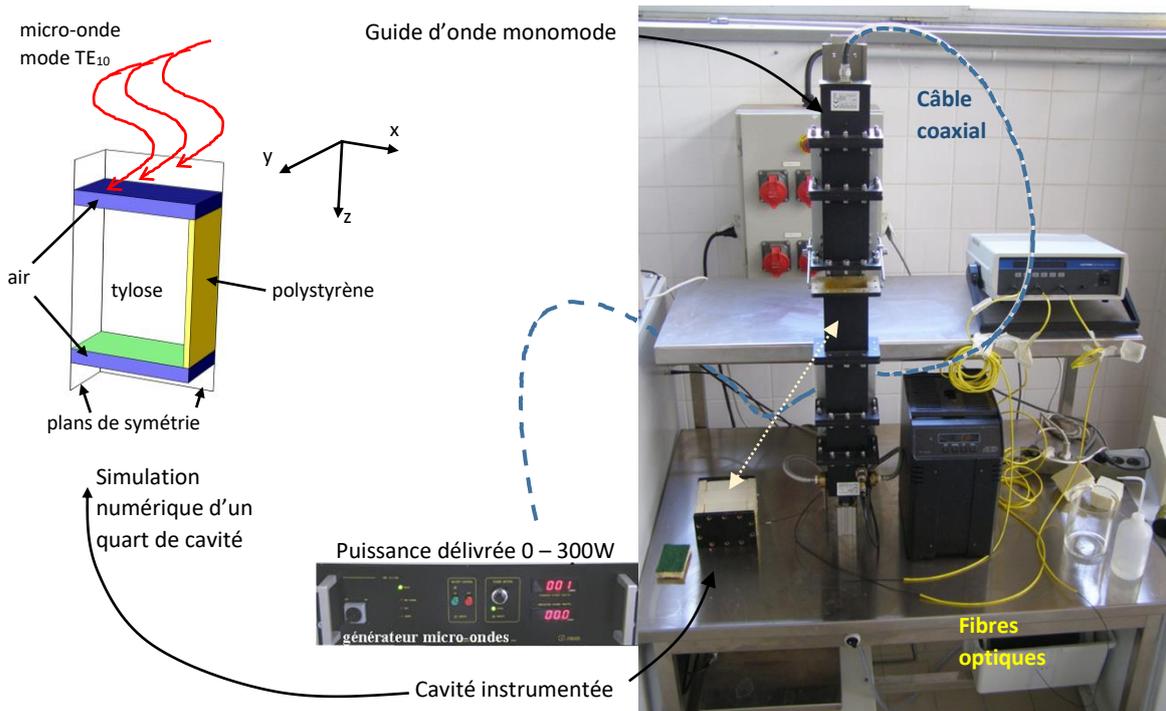


Figure 32. Système expérimental de traitement micro-ondes ($f = 2,45$ GHz, mode TE_{10} , SAIREM) et géométrie simulée

Les simulations, dans un premier temps tridimensionnelles, ont permis de réaliser une étude de sensibilité des résultats à différents paramètres. L'influence des résistances de contact et de la présence du polystyrène a par exemple été analysée. Les résultats numériques ont montré qu'il était possible de s'affranchir de la modélisation des champs électromagnétique et thermique dans la direction transverse du guide d'onde (axe y). Le domaine d'étude a ainsi pu être réduit à une géométrie bidimensionnelle constituée de 2 couches d'air enserrant le diélectrique congelé (Figure 33).

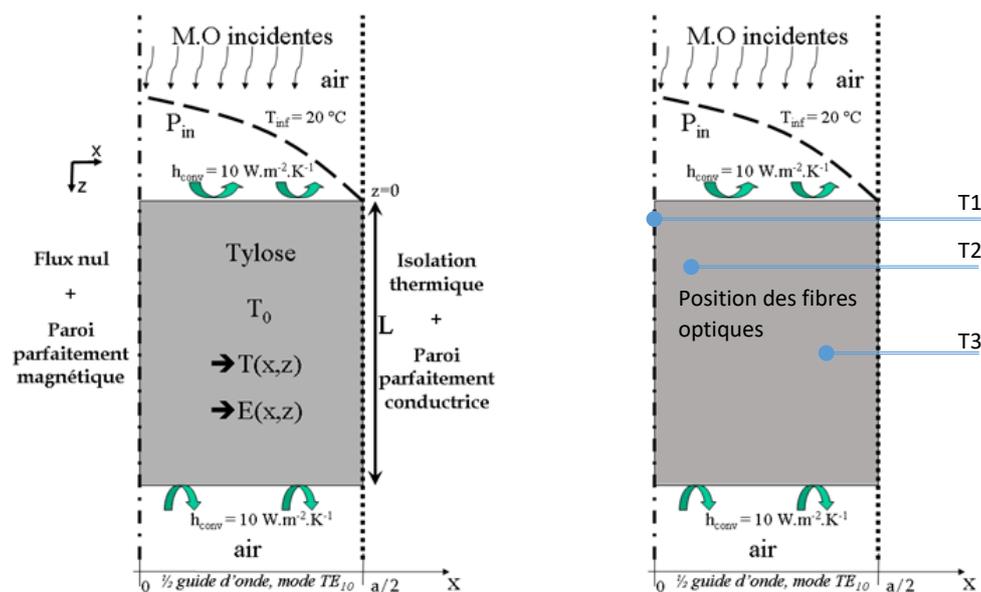


Figure 33. Conditions aux limites pour la simulation de la décongélation 2D d'un bloc de tylose par micro-ondes et positionnement des fibres optiques pour la confrontation expériences-simulations (d'après S. Curet, 2008)

Les simulations 2D nous ont permis de mieux appréhender les phénomènes d’emballement thermique visibles sur la Figure 34, résultant du couplage des phénomènes électromagnétiques et thermiques. La modélisation, grâce à sa description du champ électrique au sein du produit, explique par exemple pourquoi la température T2 augmente plus rapidement que la température T1 en phase congelée (Figure 35). Les phénomènes de résonance créent une alternance de points chauds et points froids suivant la profondeur du produit. Lorsque les propriétés diélectriques augmentent, au cours de la décongélation, la modification du champ électrique est flagrante et d’autres maxima et minima locaux apparaissent. D’un point de vue puissance dissipée, la diminution des valeurs du champ électrique est compensée par l’augmentation importante du facteur de pertes diélectriques ϵ_r'' .

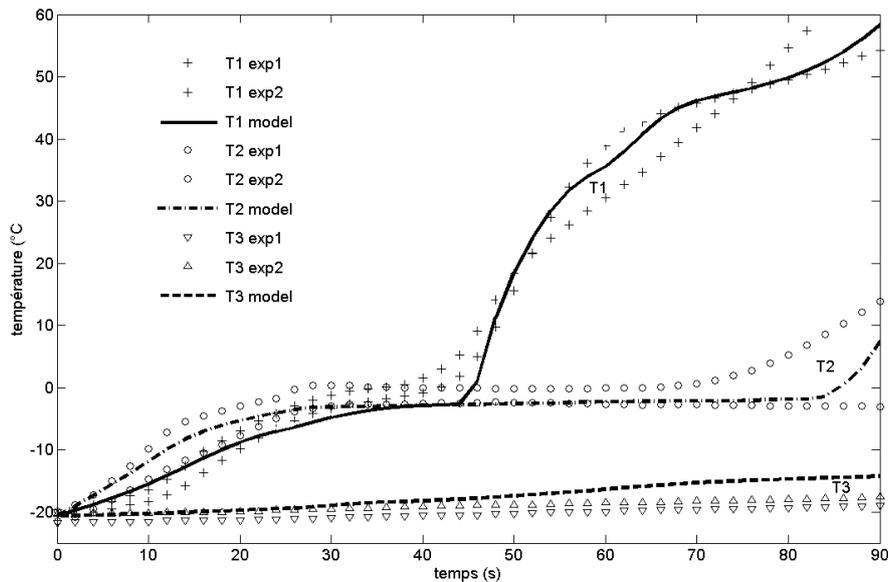


Figure 34. Comparaison entre mesures expérimentales et simulations numériques au cours d’un procédé de décongélation par micro-ondes avec une puissance incidente de 500 W (S. Curet, 2008).

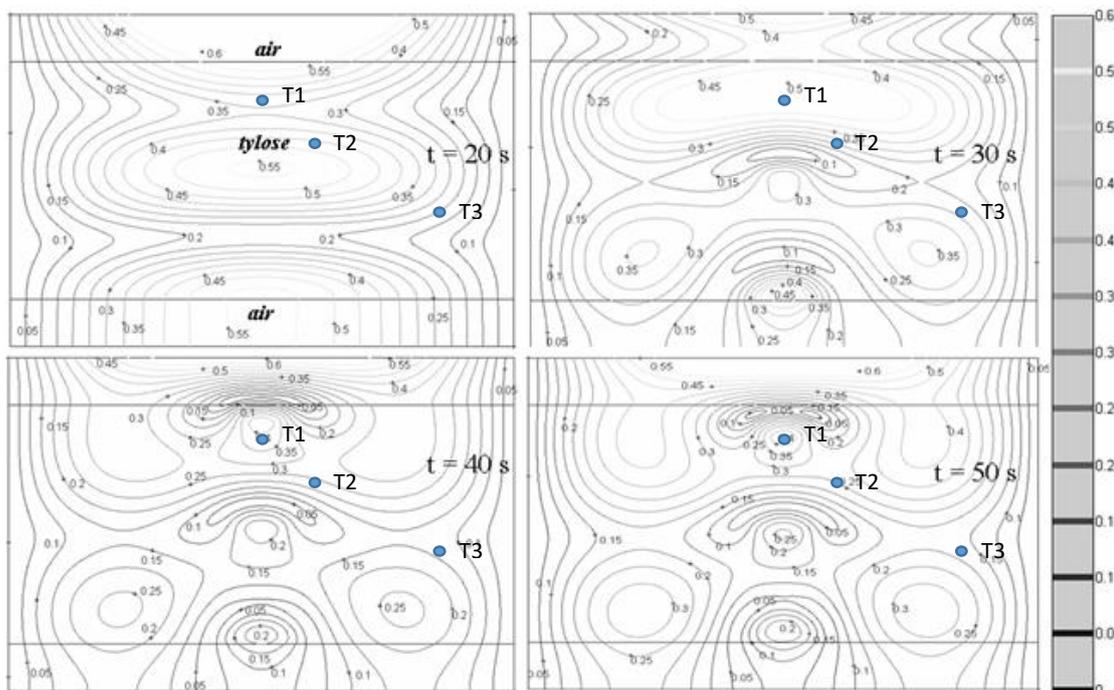


Figure 35. Profil du champ électrique E normalisé par rapport au champ électrique maximal E_0 à l’instant initial au cours de la décongélation d’un bloc de tylose (d’après S. Curet, 2008).

Les transferts de chaleur en milieu multiphasique ont ainsi pu être caractérisés grâce à l'élaboration d'un modèle mathématique complet couplant phénomènes électromagnétiques et transferts thermiques. Les résultats numériques, validés par plusieurs études expérimentales où l'on faisait varier la puissance incidente micro-onde, ont par ailleurs montré la sensibilité du modèle à de faibles variations des propriétés diélectriques lors du changement de phase. En revanche, pour un produit décongelé, l'impact de la variation de ces propriétés diélectriques sur la température restait faible.

Autres applications de la simulation numérique dans des cavités 3D

Fort du potentiel de la simulation numérique pour prédire le comportement des produits alimentaires soumis à un rayonnement micro-ondes, nous avons décidé d'utiliser cet outil pour étudier un procédé industriel de cuisson en tunnel. Il s'agissait d'évaluer la pertinence de la simulation numérique lors d'un traitement dans une cavité multimode, à une échelle spatiale plus importante. Là encore, la simulation numérique s'accompagnait d'une phase expérimentale.

Le dispositif étudié est un tunnel micro-ondes équipé d'un convoyeur et de 6 magnétrons délivrant chacun une puissance maximale de 1,2 kW, 3 de ces générateurs étant réglables (Figure 36). Chaque générateur émet les micro-ondes de fréquence 2,45 GHz dans un guide d'onde rectangulaire fermé à son extrémité. Ces guides sont disposés en quinconce dans la cavité multimode et l'émission des ondes s'effectue via 5 fentes alternées sur chaque guide.

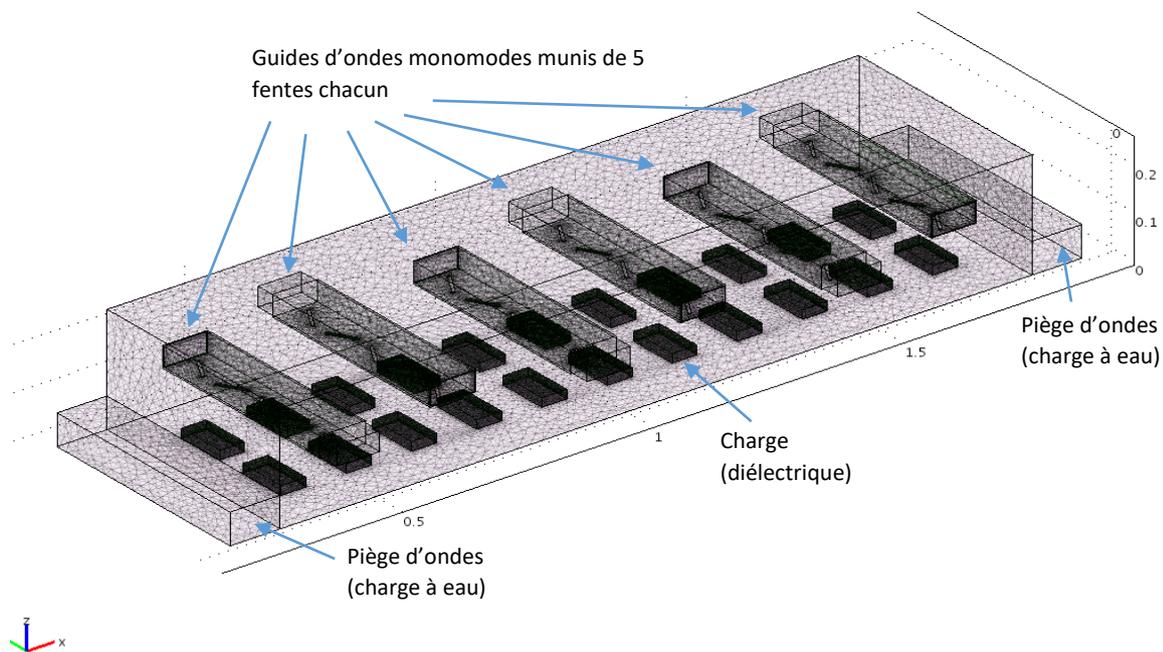


Figure 36. Géométrie et maillage du tunnel micro-ondes MES avec charges (d'après A. Methlouthi, 2011)

Des simulations ont tout d'abord été entreprises sur un guide seul afin d'étudier la forme du champ à la sortie des fentes d'un guide radiant. L'objectif était double : vérifier la forme du champ électromagnétique dans un guide d'onde à fente en mode TE_{10} et étudier la possibilité de remplacer la simulation de l'électromagnétisme dans les guides par des fonctions analytiques qui pourraient être utilisées ensuite comme conditions d'entrée dans la cavité multimode. La forme du champ à l'intérieur

du guide a bien été validée mais les résultats numériques ont également montré, au niveau des fentes émettrices, la sensibilité du champ électromagnétique aux conditions aux limites externes au guide (guide rayonnant placé dans des cavités différentes). Il s'est donc avéré impossible de s'affranchir d'une résolution complète du champ électromagnétique dans les guides d'onde pour notre application.

Ne disposant pas de capacités de calcul suffisantes, nous avons alors collaboré avec l'Institut Fresnel de Marseille pour réaliser les simulations sur une station de travail (240 GB de mémoire vive) capable de prendre en charge les 2,5 millions de mailles de la géométrie. Les résultats ont souligné l'hétérogénéité du champ électromagnétique qui s'établit dans une cavité micro-ondes multimode ainsi que les modifications apportées par les charges (Figure 37). Les transferts de chaleur ont également été simulés et les résultats ont montré de fortes hétérogénéités de traitement induits par la forme du champ électrique.

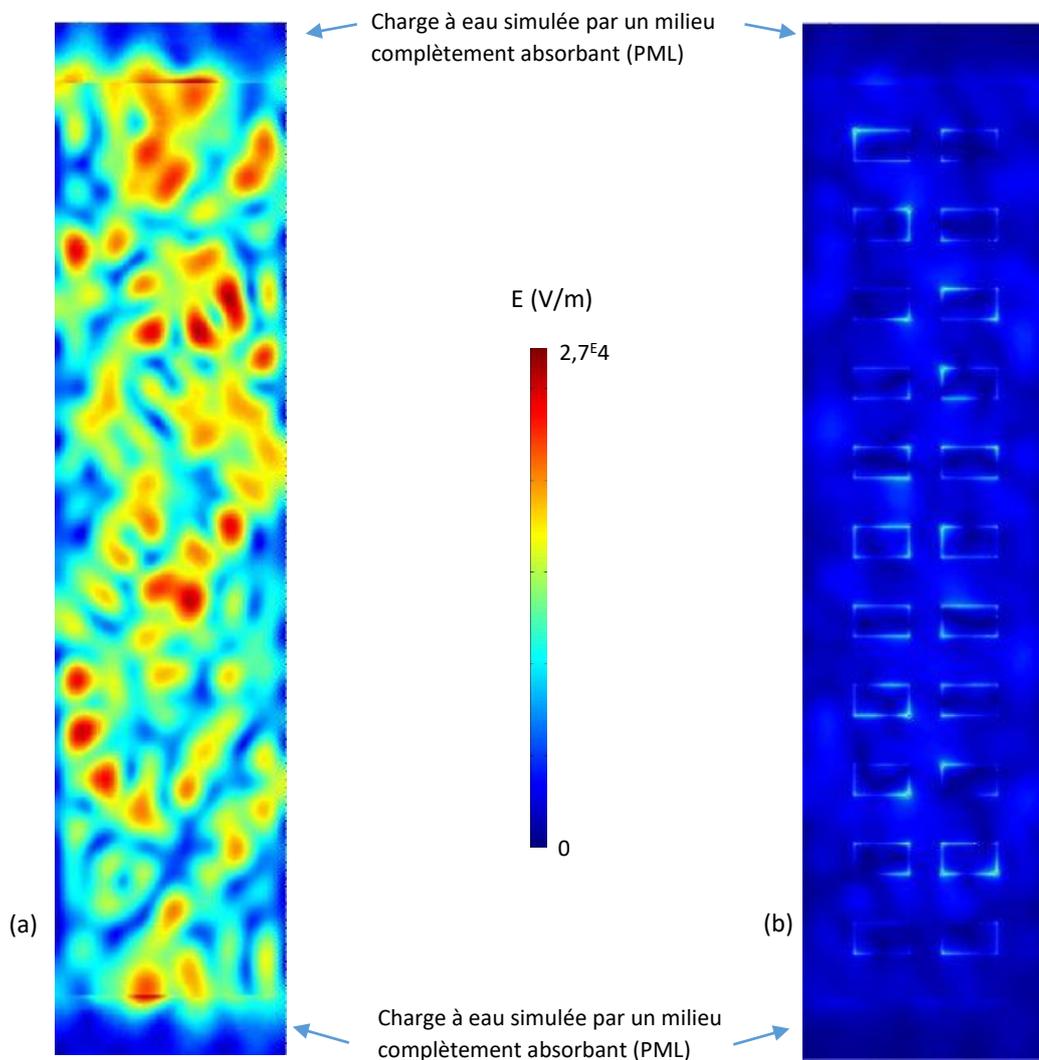


Figure 37. Visualisation du champ électrique à 2 cm du tapis de convoyage sans (a) et avec charges (b)

Plusieurs expériences ont été réalisées, notamment lors de traitement batch, dans le but de comparer les montées en température des produits avec les prédictions numériques. Un gel d'agar a été choisi comme produit modèle et des mesures de pertes de masse ont conclu que les pertes en eau pouvaient être négligées durant le traitement. La simulation prédit bien qualitativement les résultats expérimentaux obtenus à l'aide d'une caméra infrarouge, à savoir un chauffage préférentiel des bords des charges. Cependant, la confrontation précise des résultats numériques et expérimentaux montre qu'un travail important reste à faire pour simuler le traitement de produits en tunnel micro-ondes multimode (Figure 38).

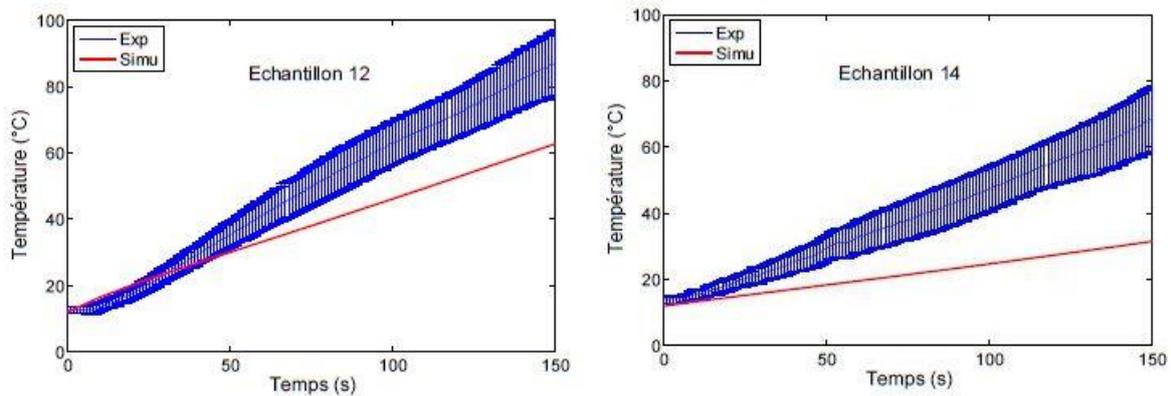


Figure 38. Exemple de comparaison de l'évolution de la température au centre des gels d'agar pour un traitement micro-ondes batch dans un tunnel multimode – températures expérimentales obtenues par fibres optiques

III.4. De la nécessité d'estimer les paramètres diélectriques

Quelle que soit l'application envisagée, la connaissance des propriétés diélectriques est indispensable à la maîtrise, au contrôle du procédé et d'une manière générale à toute étape de simulation numérique. La détermination de la constante diélectrique et du facteur de pertes est généralement opérée grâce à des méthodes expérimentales plus ou moins complexes dont on trouvera une liste dans l'article de (Venkatesh and Raghavan, 2004). Pour toutes les études portant sur les micro-ondes, nous avons donc été amenés à en utiliser certaines, voire à en développer.

Méthodes expérimentales

Les méthodes expérimentales utilisées au laboratoire reposent sur l'utilisation d'un analyseur de réseau vectoriel (Vector Network Analyser) qui permet de mesurer la perturbation du champ électromagnétique due à un diélectrique. Pour les forts diélectriques, nous utilisons une sonde coaxiale qui transmet l'onde de fréquence choisie (2,45 GHz dans notre cas) jusqu'au produit étudié. L'embout de la sonde doit être en contact parfait avec la surface du diélectrique et ses propriétés sont obtenues par mesures de la phase et de l'amplitude du signal réfléchi au bout de la sonde. Cette méthode a donné des résultats appréciables dans le cas de la tylose ou de tout produit facilement malléable (purées, gels, pâtes crues, fromages à pâte molle...) ou liquide. Cette méthode n'est cependant pas adaptée aux produits à faibles pertes diélectriques, à ceux caractérisés par des surfaces trop rugueuses ou encore lorsque l'hétérogénéité du produit est forte près de la surface en contact avec la sonde, ce qui peut être le cas pour les pâtes fermentées par exemple.

Dans le cadre de la thèse de (Methlouthi, 2011), nous avons choisi de développer une méthode de mesure basée sur les cavités résonnantes afin de justement pouvoir s'affranchir des contraintes liées aux sondes coaxiales. Pour cette étude, nous avons collaboré avec l'Institut de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nantes Atlantique (IREENA EA 1770) en la personne de S. Toutain, alors directeur de ce laboratoire. L'originalité du dispositif reposait sur le fait que la cavité est ouverte et à dimensions variables contrairement aux cavités résonnantes classiques. Le dimensionnement du dispositif a été optimisé par simulation numérique (Figure 39). Les dimensions des plaques FR4 ainsi que l'espace inter-plaques, la taille du micro-ruban émetteur, l'épaisseur du support téflon, la dimension du résonateur ont ainsi pu être choisis de telle manière que le signal soit maximal lorsque le dispositif est excité à la fréquence de 2,45 GHz, l'objectif étant d'obtenir à vide un seul pic de forte amplitude pour le paramètre de réflexion (S_{11}). En présence d'un échantillon, le déphasage de ce pic et sa largeur devaient nous permettre d'accéder aux propriétés diélectriques du produit (Figure 40).

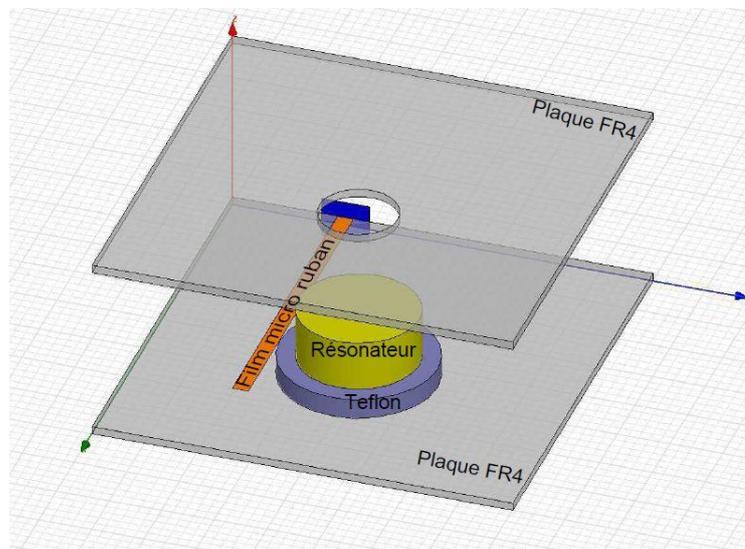


Figure 39. Schématisation de la cellule de mesure obtenue par simulation avec le logiciel HFSS™ (d'après A. Methlouthi, 2011)

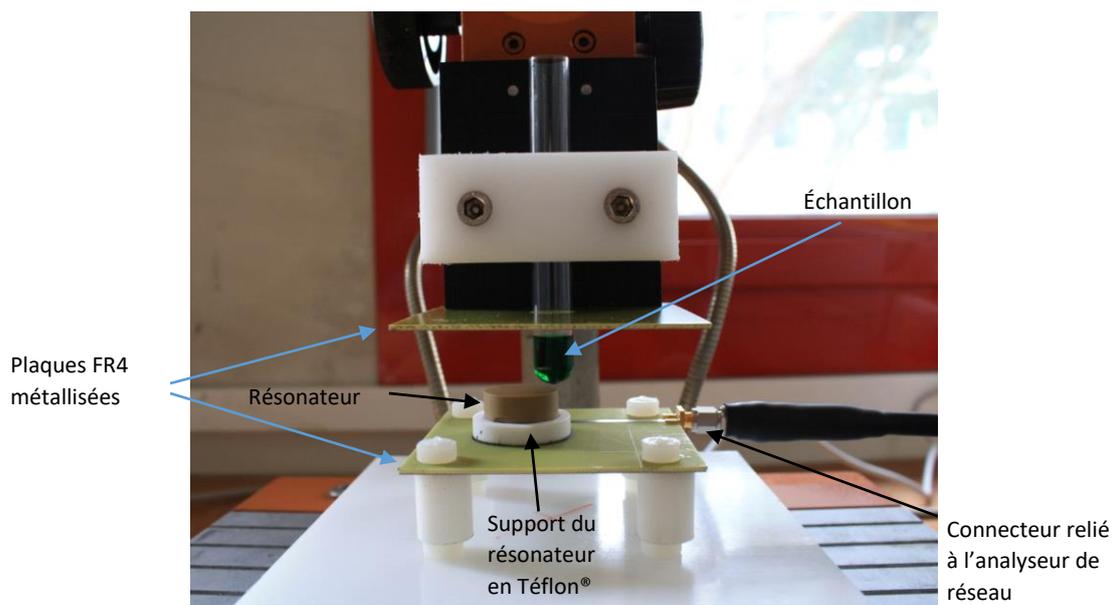


Figure 40. Dispositif de mesures dédié à la détermination des propriétés diélectriques

L'entreprise s'est avérée en réalité bien plus périlleuse qu'attendue et les résultats ont en fait soulevé de nombreuses questions relatives à la théorie des petites perturbations des champs électromagnétiques. En utilisant plusieurs mélanges de produits aux propriétés connues (méthanol-éthanol à différentes concentrations par exemple), nous avons en effet montré que la réponse du système n'était en aucun cas linéaire comme escompté par l'équipe de l'IREENA. Toutefois, celle-ci suit une loi monotone et le dispositif ainsi développé doit permettre de mesurer la constante diélectrique d'un produit si celle-ci est comprise entre 8 et 22. Pour les produits alimentaires, ϵ_r' varie classiquement entre 1 (faibles diélectriques) et 80 (forts diélectriques) et la gamme balayée par la cellule s'avère donc insuffisante pour que l'on puisse utiliser le dispositif comme système simple de mesure. Malgré ce constat, cette étude nous aura permis de prendre conscience des difficultés importantes liées aux mesures des propriétés diélectriques et d'acquérir une certaine expertise en matière de mesures avec sonde coaxiale. Si cette dernière technique est utilisée pour les fortes propriétés ($\epsilon_r' > 30$), nous faisons maintenant appel à des laboratoires extérieurs pour les produits à faibles propriétés. Nous avons ainsi collaboré avec le département Micro et Nanotechnologies pour Composants Optoélectroniques et Micro-ondes ((MINACOM) qui fait partie de l'institut de recherche XLIM (UMR CNRS 7252). Il reste néanmoins un challenge à relever en ce qui concerne la mesure en routine des propriétés diélectriques de produits congelés, pour lesquels la maîtrise de la température est essentielle.

Détermination des propriétés par méthode inverse

Devant la difficulté de mesures des très faibles propriétés diélectriques comme celles des produits congelés, nous avons utilisé une approche novatrice basée sur les techniques inverses. Celle-ci permet d'estimer les propriétés diélectriques à partir de mesures de température au sein du produit au cours du traitement micro-ondes. La méthodologie employée consiste à optimiser les paramètres diélectriques afin de minimiser la somme des écarts quadratiques entre les températures mesurées et simulées. Le nombre de paramètres à optimiser dépend de la forme choisie pour les propriétés diélectriques. Pour la tylose congelée, si nous avons considéré que sur la plage de température étudiée [-20°C, -2°C] ϵ_r' ne variait pas, nous avons supposé que le facteur de perte ϵ_r'' suivait une évolution exponentielle impliquant 2 paramètres. Le vecteur des paramètres optimums, constitué donc de 3 paramètres à estimer, était alors défini par :

$$p_{opt} = \operatorname{argmin} J(p) \quad (42)$$

Où le critère J à minimiser dépend de la matrice R - constituée de la différence en plusieurs points entre température moyenne observée et température simulée à chaque pas de temps - et d'une matrice diagonale W permettant de prendre en compte de manière statistique les problèmes de répétabilité (Curet et al., 2013) :

$$J(p) = R^T \cdot W^2 \cdot R \quad (43)$$

L'estimation de p_{opt} est obtenue via la méthodologie de Levenberg-Marquardt, implémentée dans MATLAB® et l'association de ce dernier logiciel avec COMSOL Multiphysics® permet de mettre en œuvre cette technique d'optimisation.

Les propriétés diélectriques de la tylose congelée ont ainsi pu être obtenues à partir d'expérimentations de tempérage par micro-ondes ($P_{incidente} = 500 \text{ W}$) où 3 sondes de mesures étaient utilisées. Afin de valider l'efficacité de la méthode et la pertinence des résultats, des simulations complémentaires ont été réalisées avec ces propriétés diélectriques obtenues. Il s'agissait de simuler une décongélation partielle de tylose avec des conditions opératoires (puissance incidente et position des sondes) différentes de celles utilisées pour l'estimation des paramètres et de comparer ces simulations avec des résultats expérimentaux.

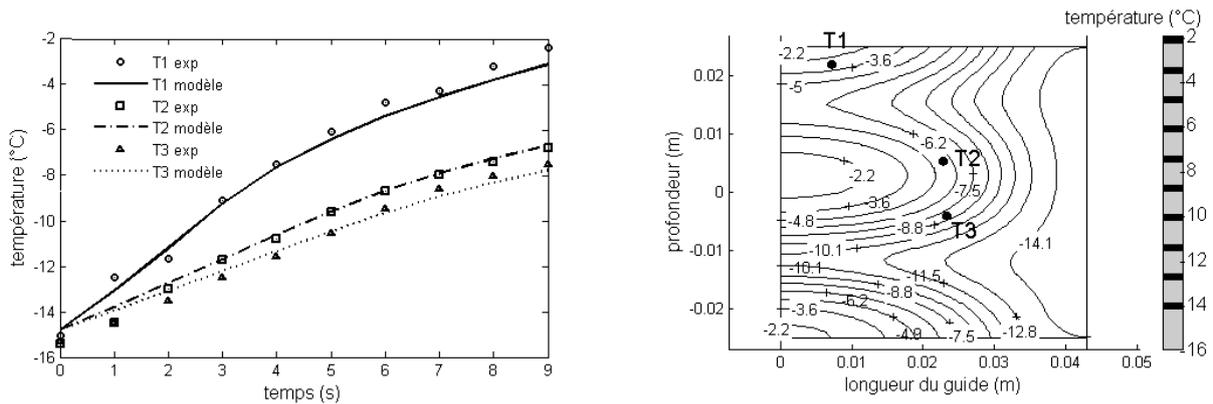


Figure 41. Comparaison entre températures simulées et mesurées lors du réchauffage d'un bloc de tylose congelé sous une puissance micro-onde de 1000 W (température initiale de -15°C) (S. Curet, 2008)

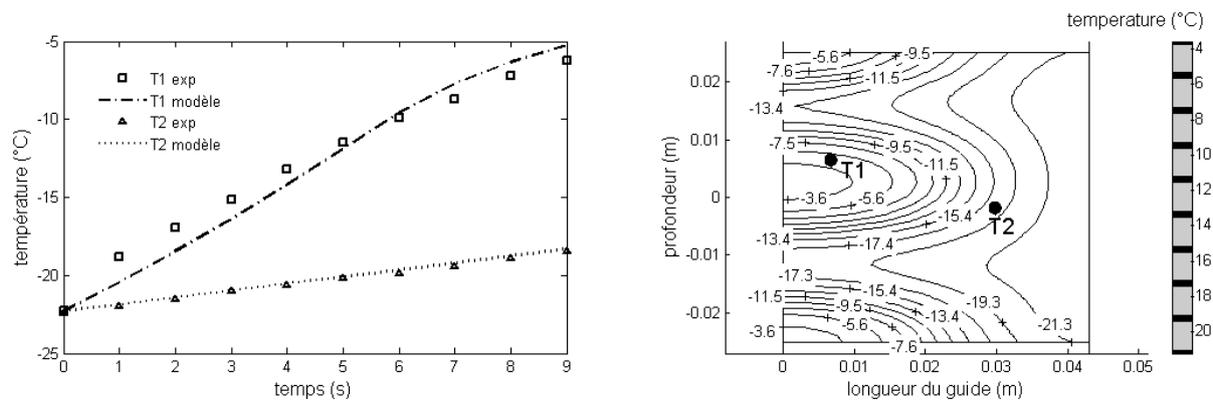


Figure 42. Comparaison entre températures simulées et mesurées lors du réchauffage d'un bloc de tylose congelé sous une puissance micro-onde de 1000 W (température initiale de -22°C) (S. Curet, 2008)

L'adéquation entre résultats numériques et expérimentaux (Figure 41 et Figure 42) a ainsi permis de valider les valeurs des paramètres diélectriques estimés en phase congelée et par extension la méthodologie utilisée pour leur estimation. Cette démarche d'estimation de paramètres a également pu être mise en œuvre sur les produits décongelés pour finalement aboutir à l'obtention des paramètres diélectriques sur l'ensemble de la plage de température considérée (Figure 43), des splines cubiques reliant les phases congelée et décongelée.

Cette méthodologie utilisant les techniques inverses pour l'obtention des paramètres diélectriques est maintenant au point et peut être utilisée comme complément à la mesure ou pour s'y substituer. Elle

suppose cependant un contrôle parfait des conditions opératoires, une connaissance précise des propriétés thermophysiques (ρ , C_p , λ) et le choix d'un modèle de propriétés diélectriques adapté.

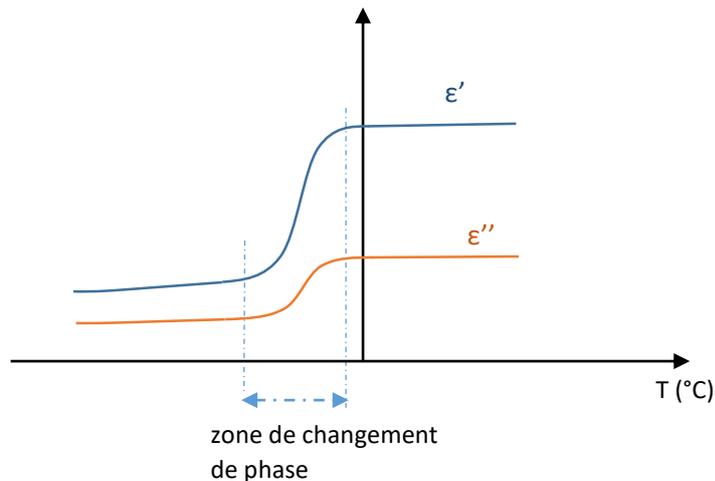


Figure 43. Schématisation de la variation des propriétés diélectriques autour de la zone de changement de phase

III.5. Autres applications

L'expertise acquise, notamment sur la simulation des traitements thermiques, nous a permis de proposer des méthodes de contrôle/commande de procédés impliquant les micro-ondes. Les solutions semi-analytiques étudiées dans la thèse de S. Curet ont ainsi été utilisées pour l'élaboration d'un capteur logiciel permettant de prédire l'évolution des températures internes d'un produit lors d'un tempérage lorsque seule l'évolution de la température de surface était connue (Boillereaux et al., 2011).

Le domaine d'application a également été étendu à la cuisson. Dans le cadre d'une collaboration CIFRE, nous avons étudié le comportement de différents produits alimentaires sous champs micro-ondes. Afin de pouvoir maîtriser ces traitements, une partie de l'étude concernait le développement de modèles capable de prédire les évolutions de température de différents constituants alimentaires. Compte tenu des pertes en eau observées durant les traitements, il était nécessaire d'introduire les transferts de masse dans l'analyse. L'objectif cependant n'était pas l'obtention d'un modèle complexe et complet impliquant un grand nombre de paramètres. Il s'agissait d'étudier la possibilité d'utiliser des modèles simples basés sur la loi de Fick et une diffusivité massique effective. Pour chaque produit testé, la diffusivité effective était estimée par méthode inverse, ainsi que les coefficients de transferts de masse en surface, en utilisant la méthodologie développée durant le programme Bugdeath. Un dispositif expérimental particulier avait été réalisé afin de mesurer la perte de masse au cours du traitement dans un guide d'onde monomode. L'adéquation entre simulation et expérimentation a été vérifiée dans le cas de produits carnés pour lesquels la porosité pouvait être négligée (Figure 44). L'étude a montré qu'il était nécessaire de rajouter à l'équation de la chaleur (éq.32), un terme source prenant en compte l'évaporation à l'intérieur du produit. Celui-ci est calculé à partir de la perte de masse (Figure 45) et son intensité varie en fonction de la profondeur du produit. Lors de ces études de cuisson, nous avons pu également valider l'utilisation des formulations semi-analytiques pour la génération du terme source Q_{obs} lié aux micro-ondes.

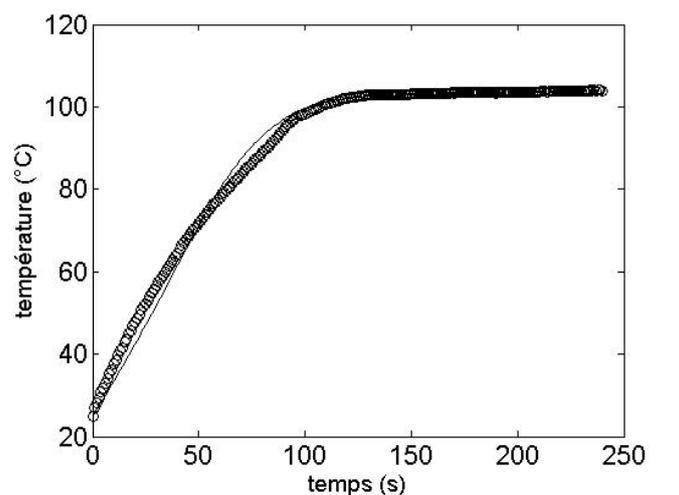


Figure 44. Évolution de la température d'un produit carné au cours d'un procédé de cuisson micro-ondes (traitement en guide d'onde monomode, pièce de 1 cm de large, 5 cm de profondeur, mesure prise à 5 mm de la surface supérieure, puissance micro-onde de 25 W) – trait plein : simulation, marqueurs : expérimentation

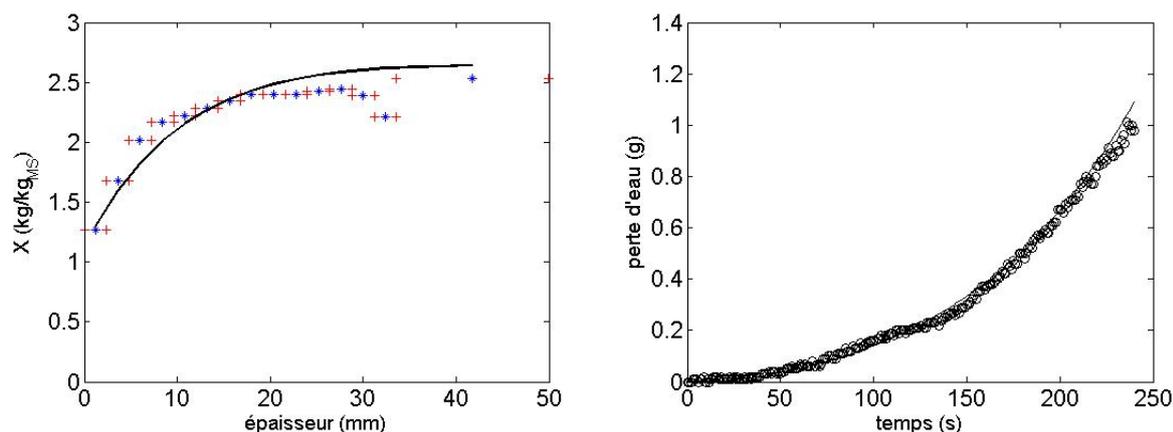


Figure 45. (a) Teneur en eau suivant la profondeur du produit (onde incidente en 0) en fin de traitement et (b) perte de masse totale au cours du traitement micro-onde – trait plein : simulation, marqueurs : expérimentation

III.6. Conclusions et perspectives

Les micro-ondes, à fréquence 2,45 GHz, font l'objet d'études systématiques au laboratoire depuis maintenant une dizaine d'années. J'ai été impliqué dès le début dans cette thématique dédiée à l'intensification des traitements thermiques par ondes électromagnétiques. Un travail important a été réalisé sur la modélisation des transferts de chaleur et celui-ci nous a permis de définir clairement les domaines de validité des approximations utilisées pour la puissance volumique liée aux micro-ondes. Ces modèles ont été utilisés, soit pour mieux comprendre les interactions micro-ondes matière (phénomènes de résonance), soit pour contrôler et commander des procédés de décongélation, ou encore comme outil permettant l'estimation de propriétés des produits (propriétés diélectriques).

Encore une fois, c'est surtout la complémentarité expérimentations – simulations qui a permis l'avancée des connaissances.

Les perspectives en termes de modélisation macroscopique concernent principalement les transferts de masse, l'approche jusqu'ici adoptée, basée sur une diffusivité effective de l'eau, restant limitée. On a ainsi pu confirmer qu'il était nécessaire de bien séparer les phénomènes de transfert d'eau sous forme vapeur et liquide dans les milieux poreux. Toutefois, s'orienter vers des modèles de plus en plus complexes, privilégiant certes la physique à l'empirisme, suppose la détermination de paramètres thermophysiques supplémentaires qui doivent être génériques. Ces paramètres varient en fonction de la température et de la teneur en eau et cette dépendance peut poser de sérieuses difficultés aux limites des traitements, par exemple lorsqu'il n'y a plus d'eau localement dans le produit. Par conséquent, malgré la qualité des modèles développés, il existe souvent un paramètre (voire plusieurs) estimé qui permet de valider la modélisation (diffusivité massique, tortuosité, coefficient de transfert de masse en surface...). Cette thématique sur les transferts de masse fait donc encore l'objet de nombreuses recherches et on pourra privilégier l'approche adoptée par les équipes de l'université de Cornell (Gulati et al., 2015; Zhu et al., 2015) qui travaillent depuis longtemps sur les traitements micro-ondes intensifs (Ni et al., 1999).

Les micro-ondes ont un potentiel d'applications relativement large en agroalimentaire mais, de par leur nature, elles doivent être souvent associées à d'autres technologies. Ainsi, pour colorer en surface des produits lors d'une cuisson on pourra utiliser des sources de rayonnement infrarouge tandis que pour évacuer l'eau lors d'un procédé de séchage, une circulation d'air chaud pourra être nécessaire. Ces différentes combinaisons supposent une maîtrise parfaite des différents procédés et de leur interaction (verrous scientifiques) et posent des problèmes d'ordre technique (verrous technologiques) qui pourront être résolus grâce à l'élaboration de dispositifs expérimentaux. L'acquisition en 2015 et 2016 de deux nouveaux dispositifs micro-ondes à puissance variable, dotés de générateurs plus performants (générateurs à état solide) en termes de maîtrise de la puissance distribuée, laisse présager le développement de futurs équipements expérimentaux susceptibles de combiner plusieurs vecteurs énergétiques.

IV. Perspectives : intensification par combinaison de technologies

IV.1. Intérêt des procédés électrothermiques

Les méthodes d'intensification des transferts présentées ont montré l'intérêt que pouvait revêtir l'utilisation d'énergies électriques au sens large, soit pour améliorer les échanges par convection entre un fluide et un produit alimentaire (électroconvection), soit pour générer une puissance volumique dans le produit (micro-ondes). Performance énergétique, absence d'inertie, facilité d'intégration des procédés dans des boucles de régulation, automatisation possible... sont autant d'avantages qui font de l'électricité un vecteur énergétique intéressant pour une conduite écoresponsable des procédés. Les perspectives d'études déjà esquissées dans les chapitres précédents visent à combler des lacunes scientifiques et technologiques freinant le développement de ces méthodes et leur acceptabilité au niveau industriel.

La génération d'une source de chaleur volumique est a priori une méthode efficace pour accélérer les traitements. Elle permet notamment de s'affranchir des faibles conductivités thermiques qui limitent les transferts au sein des produits alimentaires. Mais comme on a pu le voir avec les applications micro-ondes elle peut engendrer une forte hétérogénéité de traitement, ce qui constitue l'un des problèmes récurrents liés à l'intensification des transferts. La recherche d'un traitement homogène, intensifié et

respectueux de la qualité finale du produit passe nécessairement, j'en suis persuadé, par la combinaison de diverses technologies. D'où la nécessité d'étudier d'autres procédés d'intensification afin de choisir les mieux adaptés et les combinaisons les plus pertinentes. Parmi celles générant des sources volumiques, les applications liées au chauffage ohmique offrent des perspectives intéressantes. Elles sont réputées offrir un chauffage plus homogène que les traitements micro-ondes ou hautes fréquences, sont reconnues comme étant à haut rendement énergétique et ont déjà été associées à d'autres technologies (Choi et al., 2011; Lee et al., 2015).

IV.2. Chauffage ohmique

Principe

Le chauffage ohmique fait partie de ces technologies encore appelées innovantes même si son fondement est connu depuis la fin du XIX^{ème} siècle (Jones, 1897). Le principe de base repose sur le passage d'un courant électrique alternatif d'intensité, de tension et de fréquence connues au sein du produit en contact direct avec des électrodes. D'un point de vue pratique, le caractère alternatif du courant permet une diminution importante des phénomènes d'électrolyse au contact des électrodes mais n'est pas nécessaire à l'obtention de la génération volumique de chaleur. C'est en effet le déplacement des charges qui induit une agitation des molécules et des atomes conduisant à une élévation de la température du milieu. Il s'agit donc de pertes par conduction électrique contrairement aux pertes par polarisation qui ont lieu lors des traitements haute fréquence ou micro-ondes. Si les phénomènes peuvent être décrits selon une même équation (Metaxas, 1996) ils sont physiquement différents, cette différence étant notamment caractérisée par des fréquences de champs électriques d'ordre de grandeur très distincts. Dans un produit alimentaire, la présence d'impuretés ioniques ou de molécules chargées comme peuvent l'être les protéines, fait que l'aliment est fortement conducteur de courant à des fréquences usuelles (50 Hz – 60 Hz). La puissance volumique générée Q_v (W/m^3) liée au passage du courant se traduit sous forme locale par l'équation suivante :

$$Q_v = \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} = \sigma(T)E^2 \quad (44)$$

Où J (A/m^2) représente la densité de courant, $\sigma(T)$ (S/m), généralement fonction de la température, est la conductivité électrique du produit traité et E (V/m) le champ électrique. Le paramètre $\sigma(T)$ est une caractéristique fondamentale à connaître car c'est lui qui va piloter le chauffage du produit. Une conductivité électrique trop faible empêchera le courant de passer alors qu'une conductivité trop élevée (donc une résistance électrique faible) conduira à un champ électrique faible et par conséquent de faibles pertes par conduction.

Ce n'est qu'à partir des années 1980 que la technologie par chauffage ohmique fait son apparition dans les offres d'équipements pour les industries alimentaires. Les principales applications concernaient les traitements aseptiques de produits liquides avec morceaux. Les technologies classiques souffrent en effet du manque de pénétration de la chaleur dans les particules solides de grandes dimensions (plusieurs millimètres) ou encore dans les fluides fortement visqueux (écoulements laminaires). Pour limiter les temps de résidence néfastes à la qualité finale du produit, la technologie ohmique, générant une chaleur plus homogène que ne pourraient le faire les technologies de chauffage par pertes diélectriques, s'avère être une bonne solution. Même si à l'heure actuelle il existe de plus en plus d'installations industrielles, la technologie est loin d'avoir atteint sa pleine maturité. La grande diversité des géométries potentielles - emplacement et forme des électrodes, dimension et forme des cellules de chauffage -, la méconnaissance des propriétés électriques des produits alimentaires complexes - forte dépendance de la conductivité électrique par

rapport à la température, la formulation ou par rapport à des modifications physicochimiques – le manque d’applications dédiées aux produits solides ou encore l’incertitude concernant de possibles effets athermiques, font en effet du chauffage ohmique un vaste sujet de recherche (Ramaswamy et al., 2014).

Objectifs

Pour étudier l’intensification des transferts associée au chauffage ohmique nous nous intéresserons dans un premier temps à un procédé d’élaboration de produits de panification (pains de mie), et ce, pour plusieurs raisons. D’abord pour le potentiel d’innovation. Il s’agit en effet de produire un pain de mie sans croûte ou un pain de mie plus classique où la croûte pourrait être générée par une technologie de cuisson complémentaire de type infrarouge. Ensuite pour l’aspect énergétique, le chauffage ohmique étant considéré comme une technologie offrant un haut rendement énergétique, supérieur à 90%, bien plus élevé que celui caractéristique des fours de cuisson par convection. Et finalement pour l’intérêt scientifique. Phénomènes physiques mis en jeu, influence de la porosité sur la génération de chaleur, comportements aux interfaces produit-électrode, sens des transferts et gradients résultants...sont autant d’inconnues qui justifient l’étude d’un tel procédé innovant.

Méthodologie et premiers résultats

La démarche adoptée repose sur l’association de la simulation numérique et de l’expérimentation. Un modèle simple de transfert de chaleur (éq.45) auquel on adjoint la résolution du champ électrique (éq.46) et du courant (éq.47) est utilisé pour aider au développement d’une première cellule de chauffage ohmique qui sera également employée pour la mesure de la conductivité électrique :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k\nabla T) + Q_v \quad (45)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (46)$$

$$\nabla \mathbf{J} = 0 \quad (47)$$

Avec

$$\mathbf{J} = \sigma(T)\mathbf{E} \quad (48)$$

L’objectif est aussi de vérifier la pertinence des outils numériques à notre disposition et leur aptitude à prédire les phénomènes, dans un premier temps thermiques, qui ont cours dans un tel procédé. Notre choix se porte sur une géométrie d’étude la plus complète possible qui intègre l’ensemble des composants de la cellule (Figure 46), les conditions extérieures étant représentées par des échanges convectifs et par rayonnement, avec des propriétés issues de la littérature (coefficients de convection et émissivité).

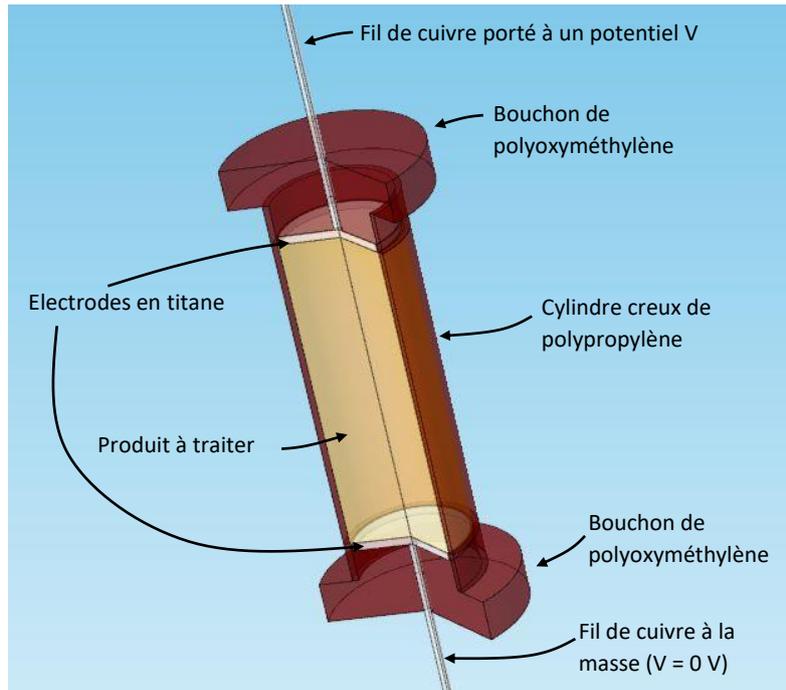


Figure 46. Cellule de chauffage ohmique finale simulée.

La forme cylindrique est choisie pour pouvoir bénéficier de la symétrie axiale simplifiant les simulations mais son diamètre est fixé par des contraintes techniques. Pour des raisons de praticité et de coût, le corps de la cellule est constitué d'une seringue d'un diamètre suffisamment conséquent pour y insérer, outre le produit, des systèmes de mesure de températures (fibres optiques ou thermocouples blindés). La simulation nous permet de tester plusieurs choix d'épaisseurs d'électrodes (qui influencent l'homogénéité du traitement) et de longueur de cellule (qui influent, elles, sur la puissance générée pour une même tension) pour finalement aboutir au dispositif présenté sur la Figure 47.

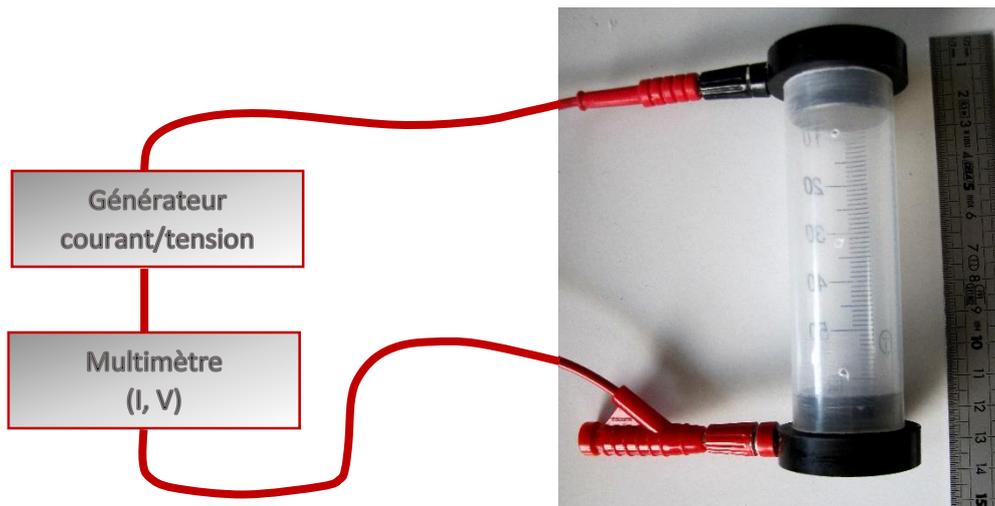


Figure 47. Photographie de la première cellule de chauffage ohmique développée.

La cellule est ensuite utilisée pour réaliser des mesures de conductivités électriques de différentes pâtes, obtenues à partir de l'équation suivante :

$$\sigma(T) = k_{cell} \frac{I}{V} = \frac{L}{A} \times \frac{I}{V} \quad (49)$$

Dans cette équation, I représente le courant et la constante de cellule k_{cell} (m^{-1}), définie par le rapport entre la distance inter-électrode L et la surface A de ces mêmes électrodes, peut être ajustée par une étape d'étalonnage réalisée avec des solutions de conductivités électriques connues. Les premiers résultats obtenus sur la pâte montrent l'évolution linéaire de la conductivité électrique en fonction de la température jusqu'à la gélatinisation de l'amidon, caractérisée par un plateau, puis à nouveau une étape de croissance linéaire après gélatinisation complète. L'influence de la porosité, qui diminue les valeurs de la conductivité, puis celle de la teneur en sel, qui en augmente les valeurs, sont également clairement démontrées et permettent l'élaboration de modèles de conductivités électriques (Gally et al., 2016).

Au même titre que la détermination des propriétés diélectriques dans le cas des traitements micro-ondes, cette étape de caractérisation reste un préalable indispensable aux études d'intensification proprement dites. La connaissance de la conductivité électrique permet de mieux comprendre le comportement du produit vis-à-vis du chauffage ohmique et est nécessaire aux étapes de simulation numérique. Ces dernières aident à l'élaboration de dispositifs expérimentaux en renseignant sur l'influence de certains paramètres. L'avantage ici est que la cellule de mesure développée peut servir également de cellule de chauffage et permet d'étudier notamment les hétérogénéités de traitement éventuelles.

Perspectives à court et long termes

Les allers-retours effectués entre simulations numériques et études expérimentales, dans le cas d'une géométrie simple et de petite échelle, enrichissent nos connaissances sur cette technologie nouvellement étudiée au laboratoire. L'étape suivante consiste à développer un dispositif de cuisson correspondant au produit final visé (Figure 48). Le moule dispose de deux électrodes en acier inoxydable insérées dans des rainures tracées sur les surfaces horizontales et verticales. Afin d'optimiser le procédé d'élaboration du pain de mie, l'idée est venue d'opérer l'étape de fermentation directement dans ce dispositif (des études réalisées dans le cadre du projet TMBP montrent que la consommation liée à cette étape représente en moyenne 10% de la consommation énergétique totale dans une boulangerie (Choimet and Rouaud, 2016)). Une plaque horizontale supérieure, dont la masse sera optimisée, est ajoutée à la cellule pour mesurer, grâce à un laser, le gonflement de la pâte lors de la fermentation. L'ensemble du dispositif est instrumenté en thermocouples blindés et assujéti à un système de contrôle commande qui permettra de piloter la fermentation et la cuisson (suivi de rampes de températures et plateaux).

Les travaux futurs immédiats sont donc avant tout expérimentaux et concerneront la fermentation puis la cuisson de pâtes fermentées dans l'objectif d'obtenir du pain de mie. La cuisson sera vérifiée notamment par le degré de gélatinisation de l'amidon (par DSC) et la qualité de l'alvéolation pourrait être évaluée par analyse d'images. Différentes trajectoires de température et différents paliers seront étudiés. Le couple courant/tension conduisant à ces conditions de traitement sera à chaque fois extrait pour calculer la consommation énergétique du dispositif. L'objectif est bien d'intensifier les transferts afin d'obtenir un pain de mie sans croûte en minimisant les coûts énergétiques.

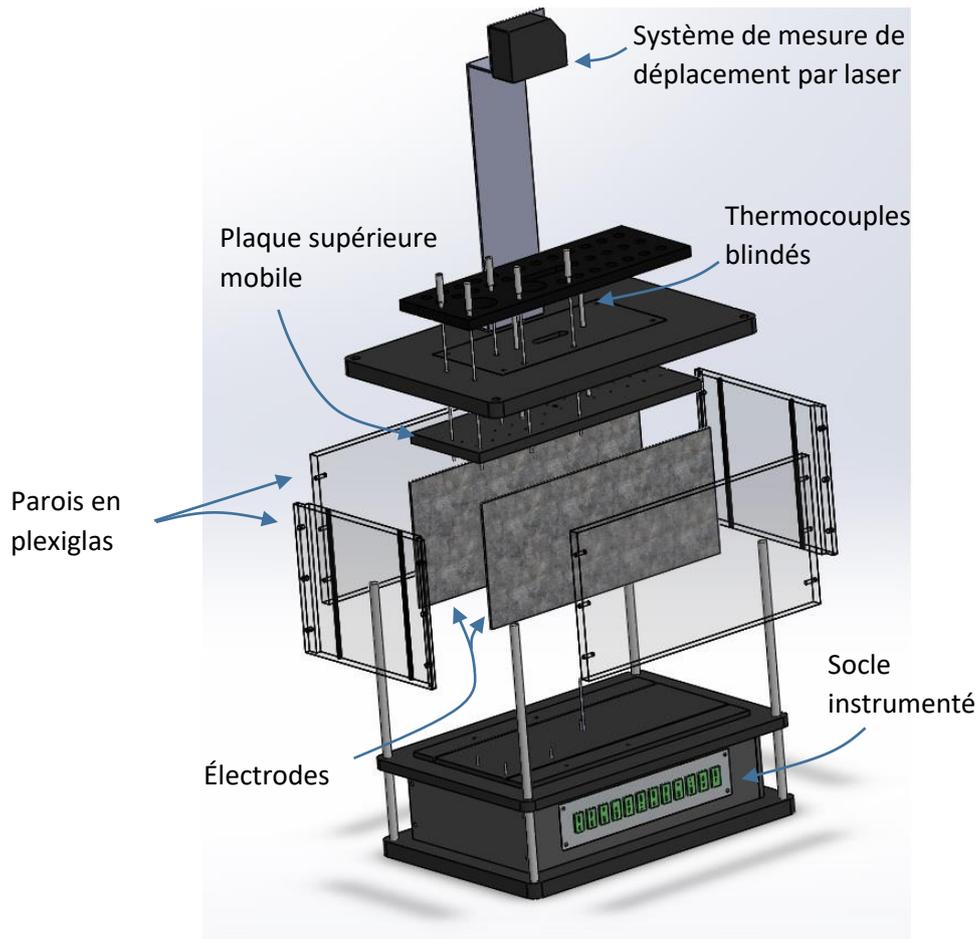


Figure 48. Éclaté du dispositif de cuisson ohmique dédié à l'élaboration du pain de mie sans croûte (A. Ogé).

Cette optimisation énergétique s'effectuera également grâce à la simulation numérique. Il s'agira donc d'élaborer un modèle mathématique de transferts masse/chaleur plus complet que celui développé pour la première cellule qui n'intègre pas les changements de phase. Souhaitant obtenir des réponses rapides (fin 2017 – thèse T. Gally) sur la pertinence énergétique du procédé, le modèle gardera une certaine part d'empirisme. Des paramètres devront être utilisés pour prendre en compte l'évaporation au sein du produit, imiter les conditions aux limites complexes (évapo-condensation aux interfaces pain/parois) pour finalement caler le modèle par rapport aux résultats expérimentaux. Nous espérons que malgré la simplicité du modèle, des stratégies d'utilisation à faible coût énergétique pourront voir le jour pour réduire les problèmes d'hétérogénéité de traitement redoutés.

Dans un futur plus lointain, le modèle devrait être amélioré pour mieux comprendre la physique mise en jeu dans la cuisson ohmique de produits céréaliers et la relier à la qualité du produit final. Au fur et à mesure des connaissances acquises et de l'appropriation de cette technologie par le laboratoire, des combinaisons avec d'autres systèmes de cuisson pourront voir le jour, soit pour améliorer la qualité du traitement, notamment en termes d'homogénéité (Zell et al., 2011), soit pour apporter des propriétés particulières – on peut penser, par exemple dans le cas du pain, à la génération de la croûte qui pourrait être obtenue par des technologies infrarouges. D'une manière générale, l'intensification des transferts résultant de l'association du chauffage ohmique et d'autres procédés devra être pensée en termes de potentiel d'innovation produits et de conception de procédés éco-efficients.

IV.3. Procédés combinés pour une rupture technologique

Congélation assistée par champs électromagnétiques

La combinaison de vecteurs énergétiques doit donc avoir d'autres objectifs que la simple amélioration de l'efficacité énergétique des procédés. Elle peut notamment produire des technologies de rupture dédiées à l'intensification des transferts. Si le chauffage ohmique résulte de l'application d'un champ électrique - de l'ordre du millier de V/m- sur des produits non congelés, des champs électriques statiques de plus haute intensité ($> 10^5$ V/m) ont montré qu'ils étaient susceptibles d'influencer l'étape de nucléation lors de la congélation de produits alimentaires (Le-Bail et al., 2011). Encore plus récemment des expériences ont mis en évidence l'influence d'ondes électromagnétiques de type micro-ondes sur la qualité de la congélation. Sous l'effet d'applications intermittentes de micro-ondes lors d'un procédé de congélation, le degré de surfusion a été réduit et la taille des cristaux de glace diminuée (Xanthakis et al., 2014). Le projet de recherche Freeze-wave¹² a vu le jour à partir de ce travail exploratoire et vise à développer ce type de procédés en rupture totale avec les procédés de congélation classiques. Dans ce cadre, la thèse de M. Sadot (2015-2018) a pour objectif de confirmer les premières observations et d'en comprendre les phénomènes.

Intérêt d'une congélation assistée par micro-ondes et objectifs

L'ajout d'une énergie micro-ondes lors d'une étape de congélation par convection forcée peut paraître aberrant d'un point de vue énergétique. L'obtention de produits congelés de qualité (cristaux de glace de faible dimension) est classiquement reliée à la rapidité de la congélation. Si les micro-ondes ont un effet positif sur la taille des cristaux, elles pourraient donc se substituer à des technologies onéreuses de type cryogénie et permettre des congélations à haute valeur ajoutée. Resterait ensuite à vérifier, à produit final égal, que l'énergie apportée par les micro-ondes ne représente qu'une faible part de l'énergie consommée pour la congélation et que le coût d'un tel procédé est inférieur à celui utilisant de l'azote liquide par exemple.

Premiers résultats et perspectives

Avant tout - et pour maîtriser et contrôler ce procédé innovant - il est indispensable de comprendre comment des ondes électromagnétiques de type micro-ondes peuvent avoir un effet sur le processus de cristallisation. Les études réalisées sur les champs électriques statiques tendent à montrer, simulations moléculaires à l'appui, que la nucléation est due à une réorientation des molécules d'eau sous l'effet du champ (Woo and Mujumdar, 2010). Cette polarisation pourrait donc aussi avoir une influence bénéfique dans le cas de l'utilisation des micro-ondes, cette fois-ci en brisant les liaisons hydrogène des clusters (Hanyu et al., 1992), structures quasi-cristallines présentes en grand nombre dans l'eau liquide. Il pourrait aussi s'agir d'un phénomène purement thermique lié aux oscillations de température résultant de l'administration par intermittence des micro-ondes et qui serait susceptible de favoriser les phénomènes de cristallisation secondaire. Les interrogations étant donc encore nombreuses, l'analyse bibliographique est à poursuivre et des investigations supplémentaires sont nécessaires.

Pour approfondir ces connaissances, une double approche simulation/expérimentation est encore une fois privilégiée dans le travail de thèse de M. Sadot. Continuité du travail réalisé sur la cryogénie (voir § I.3), un modèle de congélation est ainsi développé, mais avec cette fois une approche enthalpique

¹² Freeze-wave 'Innovative and low energy microwave assisted freezing process for high quality foods', ERA-Net européen SUSFOOD (2015-2018) : GEPEA (UMR CNRS 6144, coordinateur), SP (Swedish Institute for Food and Biotechnology), TTZ (Verein zur Förderung des Technologietransfers an der Hochschule Bremerhaven) et SAIREM (équipementier micro-ondes).

(éq.50). L'objectif est de faire dépendre tous les paramètres thermophysiques et diélectriques de la teneur en glace X_g , elle-même reliée à la taille des cristaux $r(T)$.

$$\frac{\partial T}{\partial t} \frac{\partial H}{\partial T} \cdot \rho - \nabla \cdot k \nabla T = Q_{abs} \quad (50)$$

L'enthalpie H intègre le changement d'état (via la dépendance avec X_g) et la puissance volumique Q_{abs} est obtenue après résolution des équations de Maxwell (éq.35). L'évolution du taux de glace X_g est reliée simplement à celle du rayon $r(T)$ de cristaux supposés sphériques et au nombre de cristaux N obtenu en supposant que ceux-ci possèdent tous le même rayon final r_{fin} (Sadot et al., 2016). La forme de la fonction $r(T)$ est pour l'instant adaptée pour que les résultats numériques soient bien corrélés avec les résultats obtenus dans le cadre de précédentes expérimentations réalisées en cryogénie (Rouaud and Le-Bail, 2013; Rouaud et al., 2011).

L'exploitation du modèle est réalisée pour une configuration qui constituera le dispositif expérimental en cours de développement. Il s'agit de congeler un bloc de gel de méthylcellulose de petite dimension ($1 \times 4,2 \times 3 \text{ cm}^3$) placé dans un guide d'onde monomode où différentes impulsions micro-ondes sont appliquées. Les premiers résultats des simulations effectuées avec le logiciel COMSOL Multiphysics 5.2 montrent la complexité des phénomènes mis en jeu. Les propriétés diélectriques sont fortement dépendantes de la température, en particulier lors du changement d'état. Leur évolution au cours de la congélation induit des phénomènes de résonance qui évoluent spatialement avec notamment des maximums de puissance qui se déplacent avec le front de congélation. D'autre part l'intermittence de l'application des micro-ondes engendre bien une oscillation de la température au niveau du plateau de congélation.

Ce projet de modélisation de phénomènes fortement couplés, bien accueilli par la communauté scientifique des thermiciens (prix Biot-Fourier au congrès de la SFT en 2016), bénéficiera dans un futur proche d'une étude expérimentale poussée. Des coupes histologiques de produits congelés devront être réalisées pour évaluer la taille des cristaux de glace en fonction des conditions opératoires. En comparant résultats expérimentaux et numériques, on espère être à même de proposer des formulations plus satisfaisantes pour la fonction $r(T)$ et ainsi déterminer s'il est possible de distinguer des différences dans la valeur des rayons finaux r_{fin} .

Et après...

Les paramètres d'entrée à étudier sont nombreux : température du fluide réfrigérant, coefficient de convection, puissance micro-ondes, longueur des pulses... Aux problèmes expérimentaux classiques – comment créer un système de refroidissement à la fois bon marché et flexible où températures et débits de fluides sont contrôlés et modifiables ? – pourront venir s'ajouter des verrous technologiques plus complexes. Les propriétés diélectriques variables au cours de la congélation et les faibles valeurs de ces propriétés pour des produits congelés risquent en effet de diminuer l'intérêt énergétique du procédé (trop faible rendement des micro-ondes) à moins que des solutions d'adaptation d'impédance ne soient trouvées. Mais avant cela le dispositif expérimental générant des ambiances parfaitement maîtrisées devra être suffisamment robuste et fiable pour permettre les confrontations avec le modèle numérique développé. Ce dernier devra être modifié pour intégrer les phénomènes de surfusion, qui sont d'importance dans l'étude de la cristallisation, ainsi que des modèles de croissance de cristaux. La façon d'intégrer d'éventuels effets athermiques dans le modèle sera également étudiée. Outre une aide à la compréhension de la physique du système, les informations locales fournies par le modèle devront nous permettre de définir des indicateurs corrélés à la qualité de la congélation.

A l'issue des travaux réalisés dans le cadre de ce projet, nous espérons mieux comprendre les phénomènes de cristallisation ayant lieu sous champs micro-ondes et ainsi proposer des recommandations pour la conception d'un équipement pilote.

IV.4. Perspectives générales et démarche scientifique

Sujets d'études envisagés

Les compétences acquises au cours de ces années sur les procédés électrothermiques ou électrodynamiques vont être utilisées pour étudier des combinaisons pertinentes de ces technologies. Comme le soulignent Lee et al. (2016), associer différentes technologies émergentes permet de réduire les désavantages apportés par chaque technologie utilisée individuellement. Cependant certaines techniques sont encore insuffisamment maîtrisées et comprises et nécessitent d'être étudiées séparément. L'étude sur le chauffage ohmique sera ainsi poursuivie avec pour objectif principal une réduction des pertes de chaleur et une homogénéisation du traitement. Pour l'instant dédié à la cuisson du pain de mie, le dispositif expérimental construit devrait être testé sur d'autres produits alimentaires complexes afin d'appréhender plus précisément les interactions produits-procédé et en dégager les généralités et spécificités. Des technologies de type infrarouge pourront ensuite être associées au chauffage ohmique pour apporter des caractéristiques précises au produit (croûte dans le cas du pain de mie). Un chauffage d'appoint des électrodes (soit par convection, soit par infrarouges) au cours de la cuisson pourrait aussi être envisagé afin d'homogénéiser les traitements batch.

Comme préalablement évoqué dans le paragraphe III, l'utilisation des micro-ondes à 2,45 GHz, soit comme système de chauffage, soit comme générateur d'ondes électromagnétiques, va être poursuivie. Conscients de l'importance de la fréquence de l'onde électromagnétique dans les interactions ondes-produits, nous avons pour objectif d'étudier également les micro-ondes à 915 MHz, qui possèdent une profondeur de pénétration plus importante. Si cette technologie est répandue dans l'industrie, elle reste relativement peu étudiée d'un point de vue académique, en partie sans doute à cause du prix plus élevé des dispositifs expérimentaux et parce qu'elle ne peut pas être utilisée dans les fours domestiques où seule la fréquence de 2,45 GHz est autorisée.

L'association des micro-ondes, plus généralement des ondes électromagnétiques ou champs électriques, avec des fluides froids pour assurer des congélations de qualité semble prometteuse. Les travaux réalisés sur l'électroconvection ont également montré le potentiel d'intensification de cette technologie. Utiliser le vent ionique non plus dans le cadre de séchage par air chaud mais dans des procédés frigorifiques fait partie des applications futures fortement envisagées. D'une part les échanges convectifs seraient intensifiés sans dégagement de chaleur contrairement à l'utilisation de ventilateurs (augmentation de l'efficacité énergétique), d'autre part, la qualité de la congélation pourrait être améliorée en fonction des champs électriques mis en jeu.

Objectifs et démarche scientifique proposée

L'association des différentes technologies identifiées vise à développer des procédés à faibles impacts environnementaux. Comme indiqué dans une récente revue (Roos et al., 2016) l'accroissement de la population et les changements climatiques doivent générer, entre 2010 et 2030, une augmentation de la production alimentaire de 50% et une augmentation de la demande énergétique de 45%. Les transferts intensifiés par ces procédés ambitionnent donc dans un premier temps de diminuer les consommations énergétiques. D'une manière générale, dans le cadre de l'élaboration d'un produit spécifique aux propriétés connues, il s'agit de remplacer (ou modifier) le procédé existant par un procédé innovant moins énergivore permettant d'obtenir un produit de qualité égale ou supérieure.

Les sujets d'études envisagés sont fortement connotés recherche appliquée. Pour reprendre une classification de plus en plus utilisée (l'échelle TRL – Technology Readiness Level), les niveaux de maturité technologique visés par mes activités de recherche sont généralement les niveaux TRL4 voire TRL5. Passer aux niveaux supérieurs est possible s'il existe une implication forte de partenaires industriels et ne peut généralement se faire qu'à travers des projets collaboratifs de grande ampleur. L'apport des Sociétés d'Accélération du Transfert de Technologies est aussi à considérer de manière positive pour le développement de procédés innovants.

Au-delà de l'impact sociétal visé, il y a bien entendu des objectifs scientifiques qui sont d'abord une amélioration de la compréhension de la physique des phénomènes. Ceux-ci peuvent être rendus encore plus complexes par la combinaison des technologies étudiées. Interpréter et maîtriser cette physique est indispensable si l'on veut exploiter pleinement le procédé envisagé. L'élaboration de modèles, de corrélations, décrivant l'influence des paramètres d'entrée (puissance, température,...) sur les qualités au sens large du produit fait partie des objectifs affichés. Pour cela, le design d'un dispositif expérimental et son exploitation se doivent d'être les plus génériques possible si l'on veut que les expérimentations aient une portée générale en termes de connaissances scientifiques. Ce souhait légitime du chercheur se heurte à des contraintes techniques et financières qui conduisent à de nécessaires compromis. La simulation numérique, grâce à des modèles validés, peut aider dans ces décisions. J'ai tenté dans la Figure 49 de schématiser ma vision de la démarche scientifique à adopter pour le développement de nouveaux procédés permettant d'intensifier les transferts. On peut voir que celle-ci repose essentiellement sur la complémentarité qui existe entre simulations numériques et expérimentations. Basée sur des modèles plus ou moins complexes, la simulation peut être aidée à l'interprétation de résultats expérimentaux, pourvoyeuse de corrélations, outil pour l'estimation de propriétés difficilement mesurables, etc. En dégradant ensuite ces modèles, en les simplifiant – passage de géométries 3D à 1D, conservation des paramètres importants après analyse de sensibilité – en y ajoutant des équations, physiques ou empiriques, permettant de déterminer les propriétés qualifiant le produit final – teneur en eau, couleur, texture...- en y intégrant les notions d'efficacité énergétique – rendements énergétiques et exergetiques – on peut finalement espérer optimiser le procédé final via des analyses multi-critères.

Les échelles spatiales qui font l'objet de mes travaux de recherche vont des échelles microscopiques pour lesquelles les équations de transferts sont encore valables aux échelles macroscopiques (jusqu'à la dizaine de mètres). Les échelles temporelles sont généralement pilotées par le procédé pour les petites échelles (inférieures à la seconde pour des pulses micro-ondes par exemple) et par le produit pour les plus grandes échelles (supérieures à la dizaine d'heures dans des applications de séchage ou de congélation en chambre froide). Cette relative étendue des échelles implique la mise en place de méthodologies de recherche particulières, tant expérimentales que numériques, soit spécifiques à chaque échelle, soit destinées à en relier plusieurs. Celles-ci ont pour but, par exemple pour l'expérimentation, de prendre en compte l'influence des systèmes de mesures intrusifs ou de gérer au mieux les conditions aux limites thermiques et électromagnétiques. Pour les simulations, il s'agira de définir des modèles macroscopiques intégrant les caractéristiques microscopiques du produit (par exemple : définition d'un paramètre 'porosité' plutôt qu'une description complètement de la matrice alimentaire).

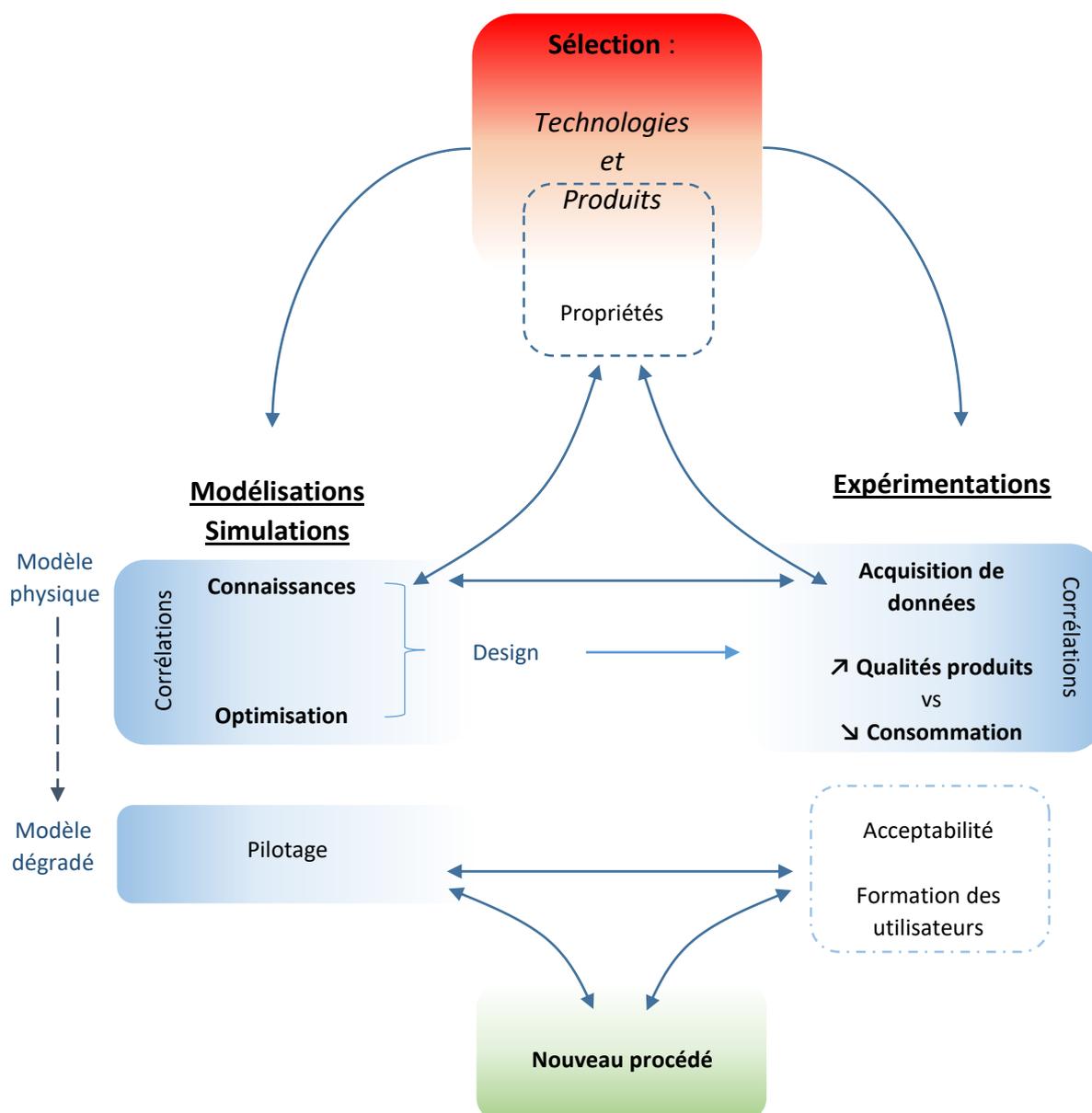


Figure 49. Proposition de démarche scientifique pour l'élaboration de procédés innovants dédiés à l'intensification des transferts

Cette liste est loin d'être exhaustive et le développement de ces méthodologies participent à l'enrichissement du laboratoire car elles peuvent être transférées à d'autres procédés. Pour ce qui est propre à l'électrothermie, les méthodes à mettre en place seront notamment dédiées à l'étude de potentiels effets athermiques. Encore à l'heure actuelle et malgré de nombreux efforts il reste très difficile de prouver ces effets dans les procédés micro-ondes ou ohmiques (Sastry, 2015). Le problème est expérimental et lié à la génération de chaleur volumique. Pour s'affranchir des effets thermiques et comparer deux procédés, il faudrait idéalement que les produits soient caractérisés par un même historique thermique quel que soit le traitement. Cette tâche constitue, pour le laboratoire, l'un des challenges à relever durant les années à venir.

Pour terminer et bien que cela ne fasse pas partie de mes activités de recherche, j'ai tenu à souligner dans la Figure 49 l'importance de l'acceptabilité des nouvelles technologies et de la formation des futurs utilisateurs pour garantir le succès d'une technologie innovante. Dans l'élaboration de projets qui iraient de la sélection au développement industriel, ces notions sont à intégrer relativement tôt dans la réflexion, particulièrement si les procédés utilisent les champs électromagnétiques et/ou les champs électriques.

Opportunités et menaces, forces et faiblesses

Les thématiques abordées s'inscrivent dans une démarche interdisciplinaire propre à répondre aux grands défis sociétaux auxquels le 21^{ème} siècle est confronté et dont l'un peut être résumé par la question suivante : comment nourrir sainement une humanité croissante sans laisser aux générations futures une planète exsangue. Pour lever verrous scientifiques et techniques relatifs à cette question, mon investissement dans la recherche se fera dans le cadre de programmes, qu'ils soient privés, régionaux, nationaux, européens, où les problématiques sont généralement apportées par le tissu industriel. Le danger réside alors dans une possible course à l'application chère à des partenaires qui souhaiteraient privilégier le développement de procédés spécifiques à une recherche plus amont. Il faut donc rester vigilant lors des montages de projets où l'équilibre entre aspiration industrielle et recherche académique doit être préservé. La réflexion doit également être de mise avant d'accepter les sollicitations des industries alimentaires, de plus en plus nombreuses et qui peuvent être chronophages, pour ne pas glisser vers une activité de simple prestataire.

Après avoir opéré une réorientation thématique en douceur à la suite de mon travail de thèse (de l'aérodynamique des salles blanches aux traitements thermiques par micro-ondes), j'ai décidé de ne pas me spécialiser sur un procédé particulier mais d'ouvrir mes activités de recherche à d'autres procédés utilisant l'électricité comme vecteur énergétique. Si l'environnement dans lequel l'enseignant-chercheur évolue participe grandement à la définition de ses sujets de recherche, surtout lorsque ceux-ci sont liés au milieu industriel, la méthodologie scientifique adoptée lui est propre. Celle-ci s'est dessinée durant cette période d'activités de recherche de plus de quinze ans si l'on tient compte du doctorat. J'ai ainsi pu capitaliser les méthodologies, tant expérimentales que numériques, développées au cours des différents projets auxquels j'ai participé. Appliquée aux phénomènes de transfert ayant lieu dans les procédés thermiques et frigorifiques du domaine de l'agroalimentaire, cette démarche m'a permis d'appréhender différentes technologies impliquant les ondes électromagnétiques et m'autorise à en étudier de nouvelles. En sachant dégager avantages et inconvénients de celles-ci, je devrais normalement être capable de les associer de manière pertinente. Bien sûr, comme je suis clairement plus porté sur le procédé que sur le produit, le travail collaboratif reste complètement indispensable pour apporter cette valence 'produit alimentaire' à mes activités de recherche. Des relations pérennes ont ainsi été nouées avec plusieurs membres du groupe MA(PS)² du GEPEA pour m'aider dans la compréhension de différents mécanismes physico-chimiques liés à la transformation des aliments et définir les critères quantitatifs permettant de qualifier le produit final. La mise en synergie de compétences complémentaires ne se fait pas qu'à l'intérieur du GEPEA et les rapprochements opérés avec des organismes extérieurs (le LTN à Nantes, SP food à Göteborg, l'Université de New South Wales, Grove City College, ...) lors de différents projets, terminés ou en cours, sont amenés, je l'espère, à perdurer. Au-delà de cette nécessité scientifique, je considère que la collaboration entre enseignants-chercheurs et chercheurs, basée sur l'écoute mutuelle, l'échange et le partage de méthodologies et de savoirs, constitue un terreau fertile à l'innovation et contribue à la réussite des projets de recherche. N'oublions pas non plus, à ces conditions de succès, l'apport des ingénieurs, techniciens, doctorants et étudiants de master, sans qui je ne conçois pas mes activités de recherche.

Conclusion

La particularité des industries alimentaires réside dans le fait que l'énergie doit y être utilisée non seulement pour produire des aliments sains (destruction ou inhibition microbienne) mais aussi pour développer arômes, saveurs et textures. Ces contraintes impliquent des bornes minimales et maximales à imposer aux puissances absorbées (ou libérées dans le cas des refroidissements) et aux temps de traitements. La recherche d'un optimum énergétique préservant les qualités finales du produit, voire les améliorant, constitue l'objectif applicatif de mes travaux de recherche. Le choix de combiner des technologies innovantes, la démarche numérique/expérimentale, posent de nombreuses questions scientifiques - compréhension des phénomènes, méthodes d'acquisition de données, modélisations... - qui trouveront des réponses dans un environnement collaboratif constitué de différents champs disciplinaires et qui laissent présager pour les années futures une riche activité au sein du laboratoire.

Références bibliographiques

- Abraham, J.P., Sparrow, E.M., 2004. A simple model and validating experiments for predicting the heat transfer to a load situated in an electrically heated oven. *J. Food Eng.* 62, 409–415.
- Ahmedou, S.O., 2010. Étude numérique et expérimentale de l'intensification des transferts convectifs par vent ionique. Ec. Dr. SPIGA. Thèse de l'Université de Nantes, Nantes, p.108.
- Akkari, E., 2007. Modélisation et commande de la décongélation par micro-ondes. Ec. Dr. Mécanique Therm. Génie Civ. Thèse de l'Université de Nantes, ENITIAA, Nantes, p.158.
- Akkari, E., Chevallier, S., Boillereaux, L., 2005. A 2D non-linear "grey-box" model dedicated to microwave thawing: Theoretical and experimental investigation. *Comput. Chem. Eng.* 30, 321–328.
- Alamir, M., Witrant, E., Della Valle, G., Rouaud, O., Josset, C., Boillereaux, L., 2013. Estimation of energy saving thanks to a reduced-model-based approach: Example of bread baking by jet impingement. *Energy* 53, 74–82.
- Atten, P., McCluskey, F.M.J., Lahjomri, A.C., 1987. The Electrohydrodynamic origin of turbulence in electrostatic precipitators. *Ieee Trans. Ind. Appl.* 23, 705–711.
- Baron, R., Havet, M., Sollic, C., Pierrat, D., Touchard, G., 2008. Numerical and experimental study of a continuous electrostatic smoking process. *Ieee Trans. Ind. Appl.* 44, 1052–1058.
- Basak, T., Ayappa, K.G., 1997. Analysis of microwave thawing of slabs with effective heat capacity method. *AICHE J.* 43, 1662–1674.
- Bhattacharya, M., Basak, T., 2006. On the analysis of microwave power and heating characteristics for food processing: Asymptotes and resonances. *Food Res. Int.* 39, 1046–1057.
- Boillereaux, L., Alamir, M., Curet, S., Rouaud, O., Bellemain, P., 2011. Estimation of temperature field during microwave tempering with unknown dielectric properties using CLPP: A generic user-friendly software sensor. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 12, 288–297.
- Boillereaux, L., Curet, S., Rouaud, O., 2009. Model-based optimization tool dedicated to continuous microwave tempering. 8th World Congr. Chem. Eng. WCCE8, Montréal, Canada, 23-27 août 2009.
- Chandrasekaran, S., Ramanathan, S., Basak, T., 2013. Microwave food processing-A review. *Food Res. Int.* 52, 243–261.
- Chaunier, L., Chiron, H., Della Valle, G., Rouaud, O., Rzigue, A., Shehzad, A., 2014. Assessment of French bread texture by a multi-indentation test. *J. Food Eng.* 122, 92–98.
- Choi, W., Nguyen, L.T., Lee, S.H., Jun, S., 2011. A Microwave and Ohmic Combination Heater for Uniform Heating of Liquid-Particle Food Mixtures. *J. Food Sci.* 76, E576–E585.
- Choimet, C., 2014. Analyse de la consommation énergétique dans le secteur boulanger. Mémoire Master2, Université de Montpellier 2, p.29.
- Choimet, C., Rouaud, O., 2016. Projet TMBP : test de mesures et efficacité énergétique en Boulangerie-Pâtisserie, rapport de fin de contrat, p.84.
- Curet, S., 2008. Traitement micro-ondes et transferts de chaleur en milieu multiphasique. Sci. pour l'Ingénieur, Géosciences, Archit. Thèse de l'Université de Nantes, ENITIAA, Nantes, p.196.
- Curet, S., 2005. Maîtrise par jets d'air froid turbulent de l'emballage thermique lors des procédés de décongélation par micro-ondes. Mémoire de Master2, Insa de Toulouse, p.49.
- Curet, S., Rouaud, O., Boillereaux, L., 2013. Estimation of Dielectric Properties of Food Materials During Microwave Tempering and Heating. *Food Bioprocess Technol.* 1–14.

- Datta, A.K., Anantheswaran, R.C., 2001. Handbook of Microwave Technology for Food Applications, CRC Press, ed. New York.
- Dinani, S.T., Havet, M., 2015. Effect of voltage and air flow velocity of combined convective-electrohydrodynamic drying system on the physical properties of mushroom slices. *Ind. Crops Prod.* 70, 417–426.
- Dinani, S.T., Havet, M., Hamdami, N., Guihard, L., Rouaud, O., 2013. Drying kinetic and energy consumption of combined electrohydrodynamic – auxiliary heating of mushroom slices', 14ème Congrès SFGP. Lyon, 8-10 octobre 2013.
- Dincer, I., Sahin, A.Z., 2004. A new model for thermodynamic analysis of a drying process. *Int. J. Heat Mass Transf.* 47, 645–652.
- Elustondo, D., Elustondo, M.P., Urbicain, M.J., 2001. New thermal conductivity probe design based on the analysis of error sources. *J. Food Eng.* 48, 325–333.
- Foster, A.M., Ketteringham, L.P., Swain, M.J., Kondjoyan, A., Havet, M., Rouaud, O., Evans, J.A., 2006. Design and development of apparatus to provide repeatable surface temperature-time treatments on inoculated food samples. *J. Food Eng.* 76, 7–18.
- Gally, T., Rouaud, O., Jury, V., Le-Bail, A., 2016. Bread baking using ohmic heating technology; a comprehensive study based on experiments and modelling. *J. Food Eng.* 190, 176–184.
- Gibeaud, A., Rouaud, O., Le Bail, A., De Pellegrin, R., 2010. Etude comparative des performances de deux tunnels de surgélation à l'azote liquide. *Rev. Générale du Froid du Cond. d'air*, n°1107, 43–49.
- Gulati, T., Zhu, H., Datta, A.K., Huang, K., 2015. Microwave drying of spheres: Coupled electromagnetics-multiphase transport modeling with experimentation. Part II: Model validation and simulation results. *Food Bioprod. Process.* 96, 326–337.
- Hamdami, N., Monteau, J.-Y., Le Bail, A., 2004. Heat and mass transfer in par-baked bread during freezing. *Food Res. Int.* 37, 477–488.
- Hamdi, M., 2014. Études thermiques et dynamiques de l'intensification des transferts par vent ionique - Application au procédé de séchage. Ec. Dr. SPIGA., Thèse ONIRIS, Nantes, p.218.
- Hanyu, Y., Ichikawa, M., Matsumoto, G., 1992. An Improved Cryofixation Method - Cryoquenching Of Small Tissue Blocks During Microwave Irradiation. *J. Microsc.* 165, 255–271.
- Havet, M., Rouaud, O., 2011. On the use of the corona discharge in an oven. CIGR Sect. VI Int. Symp., Nantes, 18-22 avril 2011 .
- Jones, F., 1897. Apparatus for electrically treating liquids. patent US592735.
- Kondjoyan, A., McCann, M.S., Rouaud, O., Havet, M., Foster, A.M., Swain, M., Daudin, J.D., 2006a. Modelling coupled heat-water transfers during a decontamination treatment of the surface of solid food products by a jet of hot air--II. Validations of product surface temperature and water activity under fast transient air temperature conditions. *J. Food Eng.* 76, 63–69.
- Kondjoyan, A., Rouaud, O., McCann, M.S., Havet, M., Foster, A., Swain, M., Daudin, J.D., 2006b. Modelling coupled heat-water transfers during a decontamination treatment of the surface of solid food products by a jet of hot air. I. Sensitivity analysis of the model and first validations of product surface temperature under constant air temperature c. *J. Food Eng.* 76, 53–62.
- Kudra, T., Martynenko, A., 2015. Energy Aspects in Electrohydrodynamic Drying. *Dry. Technol.* 33, 1534–1540.

- Lai, F.C., 2010. A prototype of EHD-enhanced drying system. *J. Electrostat.* 68, 101–104.
- Le Bail, A., Rouaud, O., Carré, A., 2014. Caractérisation du surgélateur de la ligne de chouquettes de l'usine de Valence et détermination de la Tg de la pâte à choux, rapport de fin de contrat, p.21.
- Le-Bail, A., Orlowska, M., Havet, M., 2011. Electrostatic Field : Assisted Food Freezing, in: Springer (Ed.), *Handbook of Frozen Food Processing and Packaging* (2nd Edition). London, UK, pp. 685–692.
- Lee, S.H., Choi, W., Jun, S., 2016. Conventional and Emerging Combination Technologies for Food Processing. *Food Eng. Rev.* 1–21.
- Lee, S.H., Choi, W., Kim, C.T., Jun, S., 2015. Development of a dual cylindrical microwave and ohmic combination heater for minimization of thermal lags in the processing of particulate foods. *Lwt-Food Sci. Technol.* 63, 1220–1228.
- Maroulis, Z.B., Kiranoudis, C.T., Marinos-Kouris, D., 1995. Heat and mass transfer modeling in air drying of foods. *J. Food Eng.* 26, 113–130.
- Martynenko, A., Kudra, T., 2016. Electrically-induced transport phenomena in {EHD} drying – A review. *Trends Food Sci. Technol.* 54, 63–73.
- Metaxas, A.C., 1996. *Foundations of electroheat - a unified approach*, John Wiley. ed. Chichester, England.
- Methlouthi, A., 2011. Modélisation des transferts lors de traitements continus dans les fours multi-énergies. *Sci. pour l'Ingénieur, Géosciences, Archit.* Université de Nantes, Thèse ONIRIS, Nantes, p.141.
- Nedjar, M., 2011. Approche numérique pour la mise au point d'un dispositif de cuisson par jets en impact, rapport Magister, Université M'Hamed Bougara, Boumerdès et École des Mines de Nantes, p.79.
- Ni, H., Datta, A.K., Torrance, K.E., 1999. Moisture transport in intensive microwave heating of biomaterials: a multiphase porous media model. *Int. J. Heat Mass Transf.* 42, 1501–1512.
- Pham, Q.T., Willix, J., 1989. Thermal conductivity of fresh lamb meat, offals and fat in the range -40°C to +30°C - measurements and correlations. *J. Food Sci.* 54, 508–515.
- Ramaswamy, H.S., Marcotte, M., Sastry, S., Abdelrahim, K., 2014. Ohmic heating in food processing, CRC Press, ed. *Electro-Technologies for Food Processing Series*, Boca Raton, USA.
- Roos, Y.H., Fryer, P.J., Knorr, D., Schuchmann, H.P., Schroen, K., Schutyser, M.A.I., Trystram, G., Windhab, E.J., 2016. *Food Engineering at Multiple Scales: Case Studies, Challenges and the Future-A European Perspective.* *Food Eng. Rev.* 8, 91–115.
- Rouaud, O., Hamdi, M., Bardy, E., Tarlet, D., Havet, M., 2015. Drying enhancement due to ionic wind in a wire to plate configuration', *The 12th International Congress on Engineering and Food, (ICEF12).* Québec City, Canada, 14-18 juin 2015.
- Rouaud, O., Le Bail, A., 2015. Optimising combined cryogenic and conventional freezing with respect to mass loss and energy criteria. *XXIVth IIR Int. Congr. Refrig.* Yokohama, Japon, 16-22 août 2015
- Rouaud, O., Le Bail, A., Havet, M., 2012. Rapport de fin d'étude - projet Angèle. Étude de faisabilité de différents procédés d'obtention de pruneaux d'Agen. Rapport de fin de contrat, Nantes, p.53.
- Rouaud, O., Le-Bail, A., 2013. Cryomass part2 project - Final report. Nantes, France, p.38.
- Rouaud, O., Le-Bail, A., Beilvert, C., 2011. Cryomass part1 project - Final report. Nantes, France, p.14.

- Rzigue, A., 2012. Formation de la croûte et de la structure alvéolaire de pains pour différents procédés de cuisson. Mémoire de Masters, Univ. Nantes, p.42.
- Sadot, M., Curet, S., Rouaud, O., Le-Bail, A., Havet, M., 2016. Modélisation d'un procédé de congélation assistée par micro-ondes, Congrès Français de Thermique. Toulouse, 31 mai-3 juin 2016, p.8.
- Sastry, S., 2015. A quarter-century of emerging process technologies: From the demonization of heat to the confluence of thermal and nonthermal, The 12th International Congress on Engineering and Food, (ICEF12). Québec City, Canada, 14-18 juin 2015.
- Singh, A., Orsat, V., Raghavan, V., 2012. A Comprehensive Review on Electrohydrodynamic Drying and High-Voltage Electric Field in the Context of Food and Bioprocessing. *Dry. Technol.* 30, 1812–1820.
- Spencer, P.L., 1950. Method of treating foodstuffs. Patent US 2495429 A.
- Sweat, V.E., 1986. Thermal properties of foods, in: Rao, M.A., S.S.H Rizvi (Eds.), *Engineering Properties in Foods*. New York, pp. 49–87.
- Tada, Y., Takimoto, A., Hayashi, Y., 1997. Heat transfer enhancement in a convective field by applying ionic wind. *J. Enhanc. Heat Transf.* 4, 71–86.
- Venkatesh, M.S., Raghavan, G.S. V, 2004. An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials. *Biosyst. Eng.* 88, 1–18.
- Woo, M.W., Mujumdar, A.S., 2010. Effects of Electric and Magnetic Field on Freezing and Possible Relevance in Freeze Drying. *Dry. Technol.* 28, 433–443.
- Xanthakis, E., Le Bail, A., Ramaswamy, H.S., 2014. Development of an innovative microwave-assisted food freezing process. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 26, 176–181.
- Zell, M., Lyng, J.G., Morgan, D.J., Cronin, D.A., 2011. Minimising heat losses during batch ohmic heating of solid food. *Food Bioprod. Process.* 89, 128–134.
- Zhao, L., Adamiak, K., 2016. EHD flow produced by electric corona discharge in gases: From fundamental studies to applications (a review). *Part. Sci. Technol.* 34, 63–71.
- Zhu, H., Gulati, T., Datta, A.K., Huang, K., 2015. Microwave drying of spheres: Coupled electromagnetics-multiphase transport modeling with experimentation. Part I: Model development and experimental methodology. *Food Bioprod. Process.* 96, 314–325.
- Zogzas, N.P., Maroulis, Z.B., 1996. Effective moisture diffusivity estimation from drying data. A comparison between various methods of analysis. *Dry. Technol.* 14, 1543–1573.
- Zuñiga Ulloa, R., 2005. Étude numérique et expérimentale des transferts couplés masse-chaleur : modélisation, simulation et optimisation d'un traitement thermique dynamique de surface d'un produit alimentaire. Thèse de l'Université de Nantes, p.205.
- Zuñiga Ulloa, R., Rouaud, O., Boillereaux, L., Havet, M., 2007. Conjugate Heat and Moisture Transfer During a Dynamic Thermal Treatment of Food. *Dry. Technol.* 25, 1411–1419.
- Zuñiga Ulloa, R., Rouaud, O., Havet, M., Boillereaux, L., 2006. Observer-based tracking control of superficial temperature. *J. Food Eng.* 76, 70–78.

Annexes

A1 – Implication dans les programmes de recherche

Implication dans des programmes européens

- 2015-2018 : Freeze-Wave 'Innovative and low energy microwave assisted freezing process for high quality foods', 7^{ème} PCRDT, ERA-Net Susfood – *co-encadrement d'une thèse (M. Sadot)*.
- 2011-2014 : PowTech Initial Training Network, 7^{ème} PCRDT – *co-encadrement d'une thèse (E. Karaoglan)*.
- 2004-2007 : CIMEX 'Convection and Interfacial Mass Exchange', Agence Spatiale Européenne – *co-encadrement d'une thèse (M. Li)*.
- 2001-2004 : BUGDEATH 'Predicting microbial death during heat treatments on foods', 5^{ème} PCRDT.

Implication dans des programmes régionaux et nationaux

- 2016-2017 : IAFAPOM 'Improvement of Acceptability of Foods of Animal and Plant Origin by the combination of Microwaves with proteolytic treatment', programme régional CAP-Aliment, Food for Tomorrow, 18 mois, budget de 90 k€ – porteur S. Curet-Ploquin, ONIRIS - *co-encadrement d'un post-doctorant (K.E El Mecherfi)*.
- 2016-2017 : Eco-Nutricake 'Éco-développement industriel de produits de biscuiterie et de pâtisserie nutritionnels destinés à restaurer l'équilibre alimentaire de populations à risque', Projet Industriel d'Avenir (PIAVE), 24 mois, budget de 1410 k€ - *supervision du travail d'un ingénieur (C. Choimet)*.
- 2011-2014 : PERLE2 'Pôle d'Excellence de la Recherche Ligérienne en Énergie', programme régional de 4ans, budget de 1836 k€ – *co-encadrement d'une thèse (M. Hamdi)*.
- 2009-2013 : BRAISE 'Boulangerie RAISONnée et Efficacité énergétique', ANR ALIA, 4 ans, budget de 550 k€ – *coordination d'un workpackage*.
- 2008-2011 : Capteurs Logiciels Plug & Play, ANR Blanc, 3ans, budget de 250 k€.
- 2007-2008 : ENERGIAL, Programme Interdisciplinaire Énergie du CNRS, 1 an, budget de 15 k€.

Contrats de collaboration de recherche avec des organismes privés¹³

En tant que porteur du projet :

- 2015-2016 : TMBP, Tests de Mesures en Boulangerie-Pâtisserie et MDE (GDF-Suez, LEMPA, 10 mois, 10 k€)
- 2013 : PruneauDry 1 et 2 (Bureau Interprofessionnel du Pruneau, 4 mois, 19 k€)
- 2012-2013: Cryomass (SOL Group, Italie, 13 mois, 28 k€)
- 2012 : Angèle (Bureau Interprofessionnel du Pruneau, 7 mois, 27 k€)
- 2010-2011 : Cryomax (SOL Group, Italie, 12 mois, 23 k€).

En tant que participant :

- 2015-2016 : ONIRIS_LAÏTA 4 – (LAÏTA, 6 mois, 7 k€)
- 2011 : Texturation de viande par application d'un procédé micro-ondes (Doux, 1 mois, 5 k€).

¹³ Entre parenthèses sont indiqués les partenaires, la durée et les montants HT perçus pour ces collaborations.

2008-2011 : Régénération d'un produit pané à base de volaille par un procédé micro-ondes (DOUX, 3 ans, 29 k€ + CIFRE).

2007-2008 : Collaboration ENITIAA - CREED n°ENU_CO_061121 (Centre de Recherche pour l'Environnement, l'Énergie et les Déchets, 6 mois, 81 k€).

A2 - Encadrements et co-encadrements dans le cadre des activités de recherche

Co-encadrement de thèses¹⁴

Matthieu Sadot (2015 – 2018) 'Cristallisation assistée par micro-ondes', école doctorale SPIGA (Sciences pour l'Ingénieur, Géosciences, Architecture) financement Europe – projet FREEZEWAVE – (30%, S. Curet-Ploquin 30%, directeur M. Havet 40%).

Timothée Gally (2014 – 2017) 'Développement et modélisation d'un procédé de cuisson innovant et à forte efficacité énergétique : le chauffage ohmique appliqué à la cuisson de matrices céréaliers', école doctorale SPIGA (Sciences pour l'Ingénieur, Géosciences, Architecture) financement Région/projet européen LEO - (30%, V. Jury 30%, directeur A. Le-Bail 40%).

Emre Karaoglan (2011 – 2015) 'Optimization of Fluid Bed Coating Process', école doctorale SPIGA (Sciences pour l'Ingénieur, Géosciences, Architecture) financement Marie Curie, projet PowTech - (20%, S. Curet-Ploquin 40%, directeur D. Poncelet 40%).

Situation actuelle : inconnue - Turquie

Merouane Hamdi (2011 – 2014) 'Efficacité énergétique des procédés de séchage électroconvectif', école doctorale SPIGA (Sciences pour l'Ingénieur, Géosciences, Architecture) financement Région, PERLE2 - (30%, D. Tarlet 30%, directeur M. Havet 40%).

Situation actuelle : post-doctorat Polytech Lille

Noémie Aubry (2008 – 2011) 'Etude et amélioration de la régénération d'une matrice alimentaire complexe par un procédé micro-onde', école doctorale SPIGA (Sciences pour l'Ingénieur, Géosciences, Architecture) financement CIFRE -(33%, S. Chevallier 33%, directeur L. Boillereaux 34%). *Situation actuelle : Ingénieur chez ERAS Ingénierie*

Abderraouf Methlouthi (2007 – 2011) 'Modélisation des transferts thermiques lors de traitements continus dans des fours multi-énergies', école doctorale SPIGA (Sciences pour l'Ingénieur, Géosciences, Architecture) – anciennement MTGC, financement Région des Pays de la Loire - (50%, directeur L. Boillereaux 50%).

Situation actuelle : Ingénieur thermique chez LEMASSON

Ming Li (2005 – 2009) 'Microencapsulation par évaporation de solvant', école doctorale MTGC (Mécanique, Thermique et Génie Civil), financement projet CIMEX (ESA) - (50%, directeur D. Poncelet 50%).

Situation actuelle : Project Manager chez ARKEMA (Shanghai, Chine)

Sébastien Curet (2005 – 2008) 'Traitements micro-ondes et transferts de chaleur en milieu multiphasique', école doctorale MTGC (Mécanique, Thermique et Génie Civil), financement BDI CNRS et Région des Pays de la Loire - (50%, directeur L. Boillereaux 50%).

Situation actuelle : Maître de Conférences à ONIRIS

¹⁴ Le taux d'encadrement et les co-encadrants éventuels sont mentionnés entre parenthèses.

Master

1. Fernando Beghini Bellicanta (**2015**) "Transferts masse/chaleur dans les traitements micro-ondes", Master Brésil, Université Fédérale de Santa Catarina, Florianopolis (30%, S. Curet-Ploquin 30%, L. Boillereaux 40%) - 6 mois.
2. Christophe Choimet (**2014**) "Analyse des consommations énergétiques des boulangeries", Master 2 Energie, Université de Montpellier 2 (100%) - 6 mois.
3. Thuy Minh Giang (**2012**) "Séchage de culots d'hydrolyse par micro-ondes, comparaison avec un séchage convectif", Master 2 Génie des Procédés Environnement Agroalimentaire, Université de Nantes (50%, S. Curet-Ploquin 50%) – collaboration IFREMER – 6 mois.
4. Asma Rzigue (**2012**) "Formation de la croûte et de la structure alvéolaire de pains pour différents procédés de cuisson", Master 2 Génie des Procédés Environnement Agroalimentaire, Université de Nantes (40%, V. Jury 20%, G. Della Valle et H. Chiron (INRA) 40%) – projet BRAISE – 6 mois.
5. Marc Henry (**2012**) "Evaluation de différents procédés pour l'obtention de pruneaux à partir de prunes d'Ente", Master 1 Génie des Procédés Environnement Agroalimentaire, Université de Nantes (100%) – contrat Angèle – 2,5 mois + CDD 2 mois.
6. Lotfi Boudjema (**2012**) "Modélisation de la perte de masse lors d'un procédé de congélation par cryogénie", Master 1 Energétique, Lorient, Université de Bretagne Sud (100%) – contrat Cryomass – 2,5 mois.
7. Anass Omor (**2011**) "Caractérisation d'un four de cuisson de boulangerie : transferts de masse et chaleur, efficacité énergétique" Master 2 Génie des Procédés Environnement Agroalimentaire, Université de Nantes (100%) – projet BRAISE – 6 mois.
8. Eduardo Cespedes (**2011**) "Evaluation de l'intérêt énergétique d'un procédé de séchage électroconvectif", Master 2 Génie des Procédés Environnement Agroalimentaire, Université de Nantes (20%, M. Havet 80%) – 6 mois.
9. Mouloud Nedjar (**2010-2011**) "Approche numérique pour la mise au point d'un dispositif de cuisson par jets en impact", Magister 2, Ecole Doctorale Energie et Développement Durable (EDED), Ecole des Mines de Nantes et Université M'Hamed Bougara de Boumerdes, Algérie (100%) – projet BRAISE – 6 mois.
10. Clément Beilvert (**2011**) "Etude des méthodes de congélation : application cryogénique et simulation du temps de congélation", Master 1 Energétique, Lorient, Université de Bretagne Sud (100%) – contrat Cryomass – 2,5 mois.
11. Thomas Fouqué, (**2010**), "Evaluation de l'intérêt d'un procédé électro-convectif en cuisson" Master 2 Energétique de Lorient ", Université de Bretagne Sud (20%, M. Havet 80%) – 6 mois.
12. Alexis Gibeaud (**2010**) "Mise au point d'une méthodologie pour l'évaluation des coefficients de transfert de chaleur en cryogénie", Master 1 Energétique, Lorient, Université de Bretagne Sud (100%) – contrat Cryomax – 6 mois.
13. Martin Yordanov (**2010**) "Microwave baking of bread", Master 1, University of Food Technologies, Bulgarie (80%, A. Le-Bail 20%) – 6 mois.

14. Andrea Beringer (2009-2010) "Modeling of coupled heat and mass transfer during food drying process", Technische Universität München, Diplomarbeit im Fachbereich Technologie und Biotechnologie der Lebensmittel (30%, S. Curet-Ploquin 30%, L. Boillereaux 40%) – 6 mois.
15. Sébastien Curet (2005) "Maîtrise par jet d'air froid turbulent de l'emballage thermique lors des procédés de décongélation par micro-ondes". Master 2 Génie des Procédés et de l'Environnement de l'INSA de Toulouse (100%) – 6 mois.
16. Farid Alalouba, (2004), "Etude du procédé de décontamination de la surface de produits alimentaires par la vapeur" DEA Thermique, Energétique, Génie des Procédés, option Génie des Procédés de l'Université de Nantes (20%, M. Havet 80%) – 6 mois.
17. Mourad Yataghene (2004), "Caractérisation et efficacité d'une barrière dynamique", DEA Thermique, Energétique, Génie des Procédés, option Génie des Procédés de l'Université de Nantes (100%) – 6 mois.

Co-encadrements et encadrements de personnels contractuels

Domagoj Gabric, docteur, (octobre 2010 – mars 2011), contrat Cryomax (SOL) – (100%) - (novembre 2011 – janvier 2012), projet BRAISE - (100%).

Abdellah Ousegui, docteur, (novembre 2007 – janvier 2008), contrat CREED - (50%, M. Havet 50%)

Christophe Choimet, ingénieur, (mars 2015 – janvier 2016), contrat TMBP (GDF-SUEZ, LEMPA) – (100%)

A3 - Valorisation des activités de recherche

Publications dans des revues de rang A

- A.1 T. Gally, **O. Rouaud**, V. Jury, A. Le-Bail, 'Bread baking using ohmic heating technology; a comprehensive study based on experiments and modelling', **Journal of Food Engineering**, vol. 190, pp. 176-184, 2016.
- A.2 E. Bardy, S. Manai, M. Havet, **O. Rouaud**, 'Drying kinetics comparison of methylcellulose gel vs. mango fruit in forced convective drying with and without electrohydrodynamic enhancement', **ASME Journal of Heat Transfer**, vol. 138, 8, pp.5, 2016.
- A.3 E. Bardy, M. Hamdi, M. Havet, **O. Rouaud**, 'Transient exergetic efficiency and moisture loss analysis of forced convection drying with and without electrohydrodynamic enhancement', **Energy**, vol. 89, pp. 519-527, 2015.
- A.4 K-E. El Mecherfi, **O. Rouaud**, S. Curet, H. Negaoui, J-M. Chobert, O. Kheroua, D. Saidi and T. Haertlé, 'Peptic hydrolysis of bovine beta-lactoglobulin under microwave treatment reduces its allergenicity in an ex vivo murine allergy model'; **International Journal of Food Science and Technology**, vol.50, 2, pp. 356–364, 2015.
- A.5 M., Hamdi, M. Havet, **O. Rouaud**, and D. Tarlet. 'Comparison of different tracers for PIV measurements in EHD airflow'. **Experiments in Fluids C7**, vol.1702, 55, pp.1-12, 2014.
- A.6 S. Curet, **O. Rouaud**, L. Boillereaux, 'Estimation of dielectric properties of food materials during microwave tempering and heating'; **Food and Bioprocess Technology**, vol.7, pp.371-384, 2014.

- A.7 L. Chaunier, H. Chiron, G. Della Valle, **O. Rouaud**, A. Rzigue, and A. Shehzad. 'Assessment of French bread texture by a multi-indentation test', **Journal of Food Engineering**, vol. 122, pp.92-98, 2014.
- A.8 M. Alamir, E. Witrant, G. Della Valle, **O. Rouaud**, L. Boillereaux, 'Estimation of energy saving thanks to a reduced-model-based approach: Example of bread baking by jet impingement', **Energy**, vol. 53, pp. 74-82, 2013.
- A.9 K.E. El Mecherfi, D. Saidi, O. Kheroua, G. Boudraa, M. Touhami, **O. Rouaud**, S. Curet, Y. Choiset, H. Rabesona, J.-M. Chobert, T. Haertlé. 'Combined microwave and enzymatic treatments for β -lactoglobulin and bovine whey proteins and their effect on the IgE immunoreactivity'. **European Food Research and Technology**, vol. 233, pp. 859-867, 2011
- A.10 L. Boillereaux, M. Alamir, S. Curet, **O. Rouaud**, P. Bellemain, 'Estimation of temperature field during microwave tempering with unknown dielectric properties using CLPP: a generic user-friendly software sensor', **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, vol. 12, pp. 288-297, 2011.
- A.11 J. Floury, **O. Rouaud**, M. Le Poullenc, M-H. Famelart, 'Reducing salt level in food: Part 2: Modelling salt diffusion in model cheese systems with regards to their composition', **LWT - Food Science and Technology**, vol. 42, pp. 1621-1628, 2009.
- A.12 S.A. Ould Ahmedou, **O. Rouaud** and M. Havet, 'Assessment of Electrohydrodynamic (EHD) drying process'; **Food and Bioprocess Technology**, vol.2, n°3, pp.240-247, 2009.
- A.13 S. Curet, **O. Rouaud**, L. Boillereaux, 'Effect of sample size on microwave power absorption: 2D numerical results vs. closed-form expressions', **AIChE Journal**, vol. 55, n°6, pp.1569-1583, 2009.
- A.14 M. Li, **O. Rouaud**, D. Poncelet, 'Microencapsulation by solvent evaporation: state of the art for process engineering approaches'; **International Journal of Pharmaceutics**, vol.363, pp. 26-39, 2008.
- A.15 S. Curet, **O. Rouaud** and L. Boillereaux, 'Microwave tempering and heating in a single-mode cavity: Numerical and experimental investigations'; **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, vol.47, pp. 1656-1665, 2008.
- A.16 R. Zuñiga Ulloa, **O. Rouaud**, L. Boillereaux, M. Havet, 'Conjugate heat and moisture transfer during a dynamic thermal treatment of a food', **Drying Technology**, vol.25, n°9, pp.1411-1419, 2007.
- A.17 R. Zuñiga Ulloa, **O. Rouaud**, M. Havet, L. Boillereaux, 'Observer-based tracking control of superficial temperature' **Journal of Food Engineering**, Bugdeath, vol.76, n°1, pp.70-78, 2006.
- A.18 Kondjoyan, **O. Rouaud**, M. McCann, M. Havet, A. Foster, M. Swain, J. D. Daudin, J. Sheridan, 'Modelling coupled heat-water transfers during a decontamination treatment of the surface of solid food products by a jet of hot air. 1) Sensitivity analysis of the model and first validations of product surface temperature under constant air temperature conditions' **Journal of Food Engineering**, Bugdeath, vol.76, n°1, pp.53-62, 2006
- A.19 Kondjoyan, M. McCann, **O. Rouaud**, M. Havet, A. Foster, M. Swain, J. D. Daudin, J. Sheridan, 'Modelling coupled heat-water transfers during a decontamination treatment of the surface of solid food products by a jet of hot air. 2) Validations of product surface temperature and water activity under fast transient air temperature conditions' **Journal of Food Engineering**, Bugdeath, vol.76, n°1, pp.63-69, 2006.
- A.20 Forster, L. Ketteringham, M. Swain, A. Kondjoyan, M. Havet, **O. Rouaud**, J. Evans 'Design and development of apparatus to provide repeatable surface temperature-time treatments on inoculated food samples' **Journal of Food Engineering**, Bugdeath, vol.76, n°1, pp.7-18, 2006.

- A.21 **O. Rouaud**, M. Havet, '*Behaviour of an air curtain subjected to transversal pressure variations*' **ASCE Journal of Environmental Engineering**, vol.132, n°2, pp.263-270, 2006.
- A.22 **O. Rouaud**, M. Havet, '*Numerical investigation on the efficiency of transient contaminant removal from a food processing clean room using ventilation effectiveness concepts*' **Journal of Food Engineering**, vol.68, n°2, pp.163-174, 2005.
- A.23 **O. Rouaud**, M. Havet, C. Sollic, '*Influence of external perturbations on a minienvironment: experimental investigations*' **Building and Environment**, vol.39, n°7, pp.863-872, 2004.
- A.24 M. Havet, **O. Rouaud**, C. Sollic, '*Experimental investigations of an air curtain device subjected to external perturbations*' **International Journal of Heat and Fluid Flow**, vol.24, n°6, pp.928-930, 2003.
- A.25 **O. Rouaud**, M. Havet, '*Computation of the airflow in a pilot scale clean room using $k-\epsilon$ turbulence models*' **International Journal of Refrigeration**, vol.25, n°3, pp.351-361, 2002.

Communications dans des congrès internationaux et nationaux avec publication d'actes¹⁵

- B.1 M. Sadot, S. Curet, **O. Rouaud**, A. Le-Bail, M. Havet, '*Modélisation d'un procédé de congélation assistée par micro-ondes*', **Congrès Français de Thermique 2016**, Toulouse, 31 mai-3 juin 2016.
- B.2 T. Gally, **O. Rouaud**, V. Jury, A. Le-Bail, '*Cuisson d'une pâte céréalière par chauffage ohmique : mise en place d'un modèle numérique et validation expérimentale*', **Congrès Français de Thermique 2016**, Toulouse, 31 mai-3 juin 2016.
- B.3 S. Chevallier, **O. Rouaud**, V. Jury, '*X-ray micro-tomography to study the baking of bread: a dynamic approach to follow crust and crumb formation*', Proceedings of the **2016 annual Bruker microCT User Meeting**, Mondorf-les-Bains, Luxembourg, 9-12 mai 2016.
- B.4 P. Rajkumar, T. Gally, V. Jury, **O. Rouaud**, A. Le-Bail, '*A comparative study on bread baking: ohmic heating vs. conventional heating*', Proceedings of the **15th European Young Cereal Scientist and Technologists Workshop**, Bergame, Italie, 26-29 avril 2016.
- B.5 M. Hamdi, M. Havet, **O. Rouaud**, D. Tarlet, '*Experimental investigation on convective heat transfer enhancement by EHD*', Proceedings of the **16th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery – ISROMAC 2016**, Honolulu, USA, 10-15 avril 2016.
- B.6 T. Gally, **O. Rouaud**, V. Jury, A. Le-Bail, '*Development of ohmic cells dedicated to the baking of crust-less bread*', Proceedings of the **29th EFFoST International Conference**, Athènes, Grèce, 10-12 novembre 2015.
- B.7 S. Curet, F. Bellicanta Begnini, **O. Rouaud**, L. Boillereaux, '*Modelling microwave heating during batch processing of liquid sample in a single mode cavity*', Proceedings of the **2015 COMSOL Conference**, Grenoble, 14-16 octobre 2015.
- B.8 M. Havet, E. Bardy, S. Manai, M. Hamdi, **O. Rouaud**, '*Analysis of the energetic and exergetic efficiency of the electrohydrodynamic drying process*', Proceedings of the **International Food Operations & Processing Simulation Workshop (FoodOPS 2015)**, Bergaggi, Italie, 21-23 septembre 2015.

¹⁵ Les communications orales sont repérées grâce au nom de l'orateur qui est souligné

- B.9 **O. Rouaud**, A. Le-Bail, '*Optimising combined cryogenic and conventional freezing with respect to mass loss and energy criteria*', Proceedings of the **24th IIR International Congress of Refrigeration**, Yokohama, Japon, 16-22 août 2015
- B.10 S. Chevallier, **O. Rouaud**, V. Jury, '*X-ray micro-tomography to study the formation of the crust during baking*', the **12th International Congress on Engineering and Food, (ICEF12)**, Québec-City, Canada, 14-18 juin 2015
- B.11 **O. Rouaud**, M. Hamdi, E. Bardy, D. Tarlet, M. Havet, '*Drying enhancement due to ionic wind in a wire to plate configuration*', the **12th International Congress on Engineering and Food, (ICEF12)**, Québec-City, Canada, 14-18 juin 2015
- B.12 T. Gally, A. Le-Bail, **O. Rouaud**, V. Jury, '*Baking of bread with ohmic heating technology; a review proposing new horizons for crust less bread with low energy demand*' , the **12th International Congress on Engineering and Food, (ICEF12)**, Québec-City, Canada, 14-18 juin 2015
- B.13 T. Gally, A. Le-Bail, **O. Rouaud**, V. Jury, '*Sandwich bread baking by ohmic heating*', Proceedings of the **5th Cereals & Europe Spring Meeting**, Budapest, Hongrie, 27-29 avril 2015
- B.14 E. Bardy, M. Havet, M. Hamdi, **O. Rouaud**, '*Transient exergetic efficiency a forced convection drying process with and without electrohydrodynamic (EHD) enhancement*', Proceedings of the **ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE 2014)**, Montréal, Canada, 14-20 novembre 2014
- B.15 M. Hamdi, M. Havet, **O. Rouaud**, D. Tarlet, E. Bardy, '*Selection of optimal process parameters by infrared thermography for EHD drying in a channel*', **19th International Drying Symposium (IDS2014)**, Lyon, 24-27 août 2014
- B.16 M. Hamdi, M. Havet, **O. Rouaud**, D. Tarlet, '*Experimental investigation on convective heat transfer enhancement by EHD*', Proceedings of the **CONV-14 International Symposium on Convective Heat and Mass Transfer**, Kusadasi, Turquie, 8-13 juin 2014
- B.17 E. Karaoglan, S. Curet, **O. Rouaud**, D. Poncelet, '*Determination of inlet airflow boundary condition in a fluid bed reactor*', Proceedings of the **7th World Congress on Particle Technology (WCPT7)**, Pékin, Chine, 19-22 mai 2014
- B.18 M. Hamdi, D. Tarlet, **O. Rouaud**, M. Havet, '*Etude comparative de traceurs PIV dans les écoulements électrohydrodynamiques (EHD)*', **15^{ème} Congrès Français de Visualisation et de Traitement d'Images en Mécanique des Fluides**, Orléans, 18-22 novembre 2013.
- B.19 M. Hamdi, M. Havet, **O. Rouaud**, D. Tarlet, '*Choix de traceur optimal pour la mesure PIV dans les écoulements EHD*', **14^{ème} Congrès SFGP**, Lyon, 8-10 octobre 2013.
- B.20 S. Taghian Dinani, M. Havet, N. Hamdami, L. Guihard, **O. Rouaud**, '*Drying kinetic and energy consumption of combined electrohydrodynamic – auxiliary heating of mushroom slices*', **14^{ème} Congrès SFGP**, Lyon, 8-10 octobre 2013
- B.21 M. Hamdi, M. Havet, **O. Rouaud**, D. Tarlet, '*Choice of seeding particles for PIV measurement dedicated to EHD drying*', Proceedings of the **9th World Congress of Chemical Engineering, WCCE9**, Séoul, Corée du Sud, 18-23 août 2013.
- B.22 **O. Rouaud**, S. Curet-Ploquin, D. Gabric, A. Rzigue, '*Jet impingement oven for bread baking: development and energy consumption*', Proceedings of the **9th World Congress of Chemical Engineering, WCCE9**, Séoul, Corée du Sud, 18-23 août 2013.

- B.23 S. Chevallier, V. Jury, **O. Rouaud**, *X-ray tomography to characterise the microstructure of cellular materials*, Proceedings of the **9th World Congress of Chemical Engineering, WCCE9**, Séoul, Corée du Sud, 18-23 août 2013.
- B.24 X. Li, M. Alamir and E. Witrant, G. Della Valle, **O. Rouaud**, L. Boillereaux and C. Josset. *Further investigation on energy saving by jet impingement in bread baking process*, Proceedings of the **5th IFAC Symposium on Systems Structure and Control**, Grenoble, 4-6 février 2013
- B.25 S. Chevallier, V. Jury, **O. Rouaud**, *From dough to bread: the setting up of a heterogeneous cellular structure*, **InsideFood Symposium**, Leuven, BELGIQUE, 9-12 avril 2013
- B.26 **O. Rouaud**, Q.T. Pham, *Heat and mass transfer modelling during freezing of foodstuffs*, Proceedings of the **2012 COMSOL Conference**, Milan, Italie, 10-12 octobre 2012.
- B.27 L. Boillereaux, M. Alamir, S. Curet, **O. Rouaud**, P. Bellemain, *Robust Estimation of temperature field during microwave tempering under unknown dielectric properties*, Proceedings of the **18th IFAC World Congress**, Milan, Italie, 28 août -2 septembre 2011.
- B.28 K.E. El Mecherfi, D. Saidi, O. Kheroua, G. Boudraa, M. Touhami, **O. Rouaud**, S. Curet, Y. Choiset, H. Rabesona, J-M. Chobert, T. Haertlé. *Combined microwave and enzymatic treatments of β -lactoglobulin and bovine whey proteins and their effect on the IgE immunoreactivity*. **IMPI's 45th Annual Microwave Power Symposium (IMPI 45)**, New Orleans, Louisiane, USA, 8-10 juin 2011.
- B.29 **O. Rouaud**, S. Curet-Ploquin, S. Chevallier, *Numerical estimation of the effective moisture diffusivity during microwave heating of food*, Proceedings of the **11th International Congress on Engineering and Food, (ICEF11)**, Athènes, Grèce, 22-26 mai 2011.
- B.30 S. Curet-Ploquin, **O. Rouaud**, *Modelling microwave heating of food products: influence of temperature dependant dielectric properties*, Proceedings of the **11th International Congress on Engineering and Food, (ICEF11)**, Athènes, Grèce, 22-26 mai 2011.
- B.31 **O. Rouaud**, M. Havet, *Evaluation of the energy consumption of an electric oven during bread making*, Proceedings of the **2011 CIGR Section VI International Symposium**, Nantes, FRANCE, 18-22 avril 2011.
- B.32 A. Methlouthi, **O. Rouaud**, L. Boillereaux, *High speed industrial heat treatment by conveyorised microwave applicators*, Proceedings of the **2011 CIGR Section VI International Symposium**, Nantes, 18-22 avril 2011.
- B.33 M. Havet, **O. Rouaud**, *On the use of the corona discharge in an oven*, Proceedings of the **2011 CIGR Section VI International Symposium**, Nantes, 18-22 avril 2011.
- B.34 A. Methlouthi, **O. Rouaud**, L. Boillereaux, *Microwave applicators with conveyor belt system*, Proceedings of the **COMSOL Users Conference 2010**, Paris, 17-19 novembre 2010.
- B.35 A. Methlouthi, **O. Rouaud**, L. Boillereaux, *Modeling of Industrial Microwave Conveyor Belt System*, Proceedings of **FOODSIM 2010**, Bragança, Portugal, 24-26 juin 2010.
- B.36 L. Boillereaux, S. Curet, **O. Rouaud**, *Model-based optimization tool dedicated to continuous microwave tempering*, Proceedings of the **8th World Congress of Chemical Engineering, WCCE8**, Montréal, Canada, 23-27 août 2009.
- B.37 S. Curet, **O. Rouaud**, L. Boillereaux, *Microwave process optimization using dielectric composite materials*, Proceedings of the **8th World Congress of Chemical Engineering, WCCE8**, Montréal, Canada, 23-27 août 2009.

- B.38 L. Boillereaux, S. Curet, **O. Rouaud**, '*Closed-form solutions and orthogonal collocation for microwave tempering modelling*', Proceedings of the **8th World Congress of Chemical Engineering, WCCE8**, Montréal, Canada, 23-27 août 2009.
- B.39 M. Li, J. Xue, Z-B. Zhang, **O. Rouaud**, D. Poncelet, '*Microencapsulation by solvent evaporation: novel approach for characterization of microspheres' structure*', Proceedings of the **XVIth International Conference on Bioencapsulation**, Dublin, Irlande, 4-8 septembre 2008.
- B.40 S. Curet, **O. Rouaud**, L. Boillereaux, '*Estimation of dielectric properties and their Influence on microwave heating of food products*', Proceedings of the **Global Congress on Microwave Energy Applications, MAJIC 1st**, Otsu, Japon, 4-8 août 2008.
- B.41 S. Curet, **O. Rouaud**, L. Boillereaux '*Determination of dielectric parameters of frozen materials via reverse technique*', Proceedings of the **5th Modelling and Simulation in Food Engineering, FOODSIM 2008**, Dublin, Irlande 26-28 juin 2008.
- B.42 S. A. Ould Ahmedou, **O. Rouaud**, M. Havet, '*Electrodynamic enhancement of heat and mass transfer in food processes*', CIGR Section VI - **3rd International Symposium 'Food and Agricultural Products processing and Innovations**. Naples, Italie 24-26 septembre 2007.
- B.43 M. Li, D. Poncelet, **O. Rouaud**, '*Microencapsulation by solvent evaporation – Process engineering aspect*', Proceedings of the **XVth International Workshop on Bioencapsulation**, Vienne, Autriche, 6-8 septembre 2007.
- B.44 S. Curet, **O. Rouaud**, L. Boillereaux, '*Numerical approaches for microwave tempering and thawing; influence of sample dimensions*', Proceedings of the **XXIInd IIR International Congress of Refrigeration**, Pékin, Chine, 21-26 août 2007.
- B.45 S. Curet, **O. Rouaud**, L. Boillereaux, '*Heat transfer thawing for microwave applications*', **Proceedings of the COMSOL Users Conference 2006**, Paris, pp. 75-80, 7 novembre 2006.
- B.46 M. Li, D. Poncelet, **O. Rouaud**, '*Microencapsulation by solvent evaporation*', Proceedings of the **XIVth International Workshop on Bioencapsulation**, Lausanne, Suisse, 5-7 octobre 2006.
- B.47 **O. Rouaud**, M. Havet '*Perturbation of a localised air delivery system by draughts*', **Food Factory 2004, 2nd International Conference**, Laval, 6-8 octobre 2004.
- B.48 R. Zuñiga Ulloa, L. Boillereaux, M. Havet and **O. Rouaud** '*Reference trajectory tracking of superficial temperature in food decontamination*', Proceedings of **the 7th International Symposium on Dynamics and Control of Process Systems, (DYCOPS7)**, Cambridge, USA, 5-7 juillet 2004.
- B.49 A. Kondjoyan, N. Belaubre, J.D. Daudin, **O. Rouaud**, M. Havet, A. Foster. and M. Swain '*Temperature and water activity calculations at the surface of unwrapped food products during decontamination by jets of hot air*', Proceedings of **the 9th International Congress on Engineering and Food, (ICEF9)**, Montpellier, 7-11 mars 2004.
- B.50 **O. Rouaud**, M. Havet, C. Sollicie, '*Comportement d'un rideau d'air utilisé dans un système de protection ouvert et soumis à une perturbation extérieure*', **16^{ème} Congrès Français de Mécanique**, Nice, 1-5 septembre 2003.
- B.51 **O. Rouaud**, M. Havet, C. Sollicie, '*Influence of draughts on the behaviour of a dynamic barrier used in an open protection device*', Proceedings of the **ICHMT International Symposium TRCON03**, Cesme, Turquie, 17-22 août 2003.

- B.52 **O. Rouaud**, M. Havet, C. Sollicec, '*Numerical prediction of contaminant distribution in a food processing clean room*', Proceedings of the **9th International Conference in Indoor Air Quality and Climate**, INDOORAIR 2002, Monterey, USA, pp. IV.248-253, 30 juin – 5 juillet 2002.
- B.53 M. Havet, **O. Rouaud**, '*Apports de la mécanique des fluides numérique : application à la maîtrise des écoulements en salles blanches*', **Colloque 'Aéroulique et Industries Alimentaires'**, INA PG, Paris, 17-18 janvier 2001.
- B.54 M. Havet, **O. Rouaud**, '*Numerical investigation of the airflow in a food processing clean room*', Proceedings of the **1st International Conference on Simulation in Food and Bio-Industries**, FOODSIM 2000, Nantes, pp 48-51, 26-27 juin 2000.
- B.55 M. Havet, F. Hennequin, **O. Rouaud**, '*Optimization of the air change rate in a food-processing clean room*', Proceedings of the **15th ICCCS International Symposium and 31st R3-Nordic Symposium on Contamination Control**, Copenhagen, Danemark, pp 187-197, 14-18 mai 2000.
- B.56 **O. Rouaud**, M. Havet, '*Numerical study of plane air curtain jets*', Proceedings of the **8th International Congress on Engineering and Food, (ICEF8)**, Puebla, Mexique, 9-13 avril 2000.
- B.57 E. Laroche, **O. Rouaud**, '*Curvature effects on the development of film-cooling on a convex surface: a numerical contribution*', Proceedings of the **14th Symposium ISOABE (AIAA)**, Florence, Italie, 5-10 septembre 1999.

Revue nationale avec comité de rédaction

- C.1 **O. Rouaud**, A. Le Bail, R. De Pellegrin '*Transferts de chaleur et de masse lors de la congélation de produits non emballés*', **Revue Générale du Froid & du conditionnement d'air**, N° 1137, octobre 2013, pp 42-47.
- C.2 A. Gibeaud, **O. Rouaud**, A. Le Bail, R. De Pellegrin '*Étude comparative des performances de deux tunnels de surgélation à l'azote liquide*', **Revue Générale du Froid & du conditionnement d'air**, N° 1107, octobre 2010, pp 43-49.
- C.3 **O. Rouaud**, M. Havet '*Critères de qualité de la ventilation dans des ateliers industriels*', **Revue Générale du Froid & du conditionnement d'air**, N° 1074, juin 2007, pp 35-40.
- C.4 **O. Rouaud**, M. Havet '*Simulation numérique et qualité de la ventilation d'une salle blanche*', **Revue Générale du Froid**, N° 1055, juillet - août 2005, pp 45-49.
- C.5 **O. Rouaud**, M. Havet '*Simulation numérique du comportement d'un rideau d'air soumis à des perturbations extérieures*', **Salles Propres & Maîtrise de la Contamination**, N° 35, pp 2-6, décembre 2004, PYC éditions, Paris.
- C.6 **O. Rouaud**, M. Havet '*Dispositif de protection rapprochée. Quelle efficacité pour le rideau d'air ?*', **Salles Propres & Maîtrise de la Contamination**, N° 31, pp 24-26, avril 2004, PYC éditions, Paris.
- C.7 M. Havet, **O. Rouaud**, F. Hennequin, C. Morisseau '*Contaminations dans une salle blanche*', **Revue Générale du Froid**, N° 1040, janvier - février 2004, pp 57-61.
- C.8 M. Havet, **O. Rouaud**, F. Hennequin, '*Contaminations particulière et microbiologique dans une salle blanche agroalimentaire*', **Bull. liaison CTSCCV**, vol.11, n° 5, pp 277-283, 2001.
- C.9 M. Havet, **O. Rouaud**, F. Hennequin, '*Cas d'école : la contamination d'un produit traiteur*', **Salles Propres & Maîtrise de la Contamination**, N° 5, pp 34-36, novembre 1999, PYC éditions, Paris.

Rapports de fin de contrat

- E.1 A. Le Bail, **O. Rouaud**, A. Carré, '*Caractérisation du surgélateur de la ligne de chouquettes de l'usine de Valence et détermination de la Tg de la pâte à choux*', **rapport final projet Pasquier**, p.21, novembre 2014.
- E.2 **O. Rouaud**, A. Le Bail '*CRYOMASS part2 project - Final report*', **rapport final projet Cryomass, 2^{ème} partie**, p.38, juillet 2013.
- E.3 **O. Rouaud**, A. Le Bail, M. Havet '*Rapport de fin d'étude – projet Angèle. Etude de faisabilité de différents procédés d'obtention de pruneaux d'Agen*', **rapport final étude Angèle**, p.53, décembre 2012.
- E.4 L. Boillereaux, **O. Rouaud**, S. Chevallier, '*Rapport de fin de contrat*', **rapport final projet Doux**, p.37, décembre 2011.
- E.5 **O Rouaud**, A. Le Bail, C. Beilvert '*CRYOMASS part1 project – Final report*', **rapport final projet Cryomass, 1^{ère} partie**, p.14, septembre 2011.
- E.6 **O Rouaud**, '*Gnocchi_Cp project - final report*', **rapport final projet Gnocchi_Cp**, p.3 + fichier Gnocchi_Cp.xls, juillet 2011.
- E.7 **O. Rouaud**, A. Le Bail, A. Gibeaud, D. Gabrìc '*CRYOMAX Project – Final report*', **rapport final projet Cryomax**, p.45, février 2011.
- E.8 A. Gibeaud, **O. Rouaud**, A. Le Bail '*CRYOMAX Project – Technical report*', **rapport préliminaire projet Cryomax**, p.29, octobre 2010.
- E.9 M. Havet, **O. Rouaud**, '*Convention de collaboration ENITIAA-CREED n° ENU_CO_061121*', **rapport final de janvier 2008**, p.46, 2008.

Activités d'expertise et reconnaissance internationale des compétences.

- Relecteur pour : "Journal of Food Science" (5 fois), "Chemical Engineering and Processing: Process Intensification" (5), "Journal of Food Engineering" (2), "International Journal of Thermal Sciences" (2), "International Journal of Heat and Mass Transfer", "Drying Technology", "Heat Transfer Engineering", "Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics".
- Chairman de la session Process Modelling au **9th World Congress of Chemical Engineering, WCCE9**, Séoul, 2013
- Chairman lors de 2 sessions du congrès **CIGR 2011**
- Évaluateur international d'un projet (Proposal n°1111067) pour le Fondecyt National Research Funding Competition 2011, Chili.
- Membre (Rapporteur) du comité de sélection pour le poste de Maître de Conférences n°0236, 62^{ème} section de l'Université de la Réunion (juin 2009) pour l'École Supérieure d'Ingénieurs – Réunion Océan Indien – Département Innovation & Développement Agroalimentaire Intégré (ESIROI-IDAI)