



HAL
open science

Réduire les matières grasses dans les produits frits

Olivier Vitrac, Maxime Touffet

► **To cite this version:**

Olivier Vitrac, Maxime Touffet. Réduire les matières grasses dans les produits frits. *Innovations Agronomiques*, 2019, 78, pp.81-94. 10.15454/pyr2-tb73 . hal-02915065

HAL Id: hal-02915065

<https://hal.inrae.fr/hal-02915065v1>

Submitted on 13 Aug 2020

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Réduire les matières grasses dans les produits frits

Vitrac O.¹, Touffet M.¹

¹ INRA, UMR 1145 « Ingénierie Procédés Aliments », Equipe « Interactions entre Matériaux et Milieux au Contact » ; AgroParisTech site de Massy, 1 rue des Olympiades, F-91300 Massy

Correspondance : olivier.vitrac@agroparistech.fr

Résumé

La friture est une des plus anciennes opérations de cuisson des aliments. Elle est souvent décriée : aliments trop gras, production de composés oxydés, odorants, toxiques. Parce qu'elle est longtemps restée incomprise, la marge de progrès est considérable. L'article fait le point sur les principaux mécanismes responsables de l'imprégnation en huile, qui ont été mis en évidence lors du projet collaboratif *Fry'In* et au travers de plusieurs projets de recherche partenariale. L'imprégnation en huile est présentée comme un processus thermodynamique contrôlable localement par la température et la fraction volumique en air. La modélisation multiéchelle, combinée à l'imagerie rapide et à des observations microscopiques, a été utilisée pour analyser les détails des écoulements immiscibles vapeur-huile et air-huile à l'échelle cellulaire et à la surface du produit. La séparation des échelles de temps d'égouttage et d'imbibition forcée ou spontanée permet de réduire l'imprégnation par un facteur deux. Les résultats actuels permettent d'envisager non seulement des actions préventives pour limiter l'imprégnation en huile, mais également les moyens physiques pour la retirer.

Mots-clés : Friture, Frites, Chips, Matières grasses, Modélisation, Innovation

Abstract: Reducing the fat content in fried products

Frying is one of the oldest cooking operations of food. It is often criticized: too oily foods, production of oxidized compounds, off-flavors, and toxic substances. Because it remained poorly understood, the margin of progress is considerable. The article reviews the main mechanisms controlling oil uptake, which have been evidenced during the collaborative project *Fry'In* and during several research projects with the industry. Oil uptake is presented as a thermodynamic process, which can be controlled by temperature and the volume fraction in air. Multiscale modeling combined with rapid imaging and microscopic observations was used to analyze the details of the immiscible flows steam-oil and air-oil at the cellular scale and at the surface of the product. The separation of time scales associated with the drainage/dripping process and forced/spontaneous imbibition enables a reduction of oil uptake by half. Based on current results, not only preventive actions can be considered to reduce oil uptake, but also physical strategies to remove it.

Keywords: Frying, French-fries, Chips, Fat, Modeling, Innovation

1. Introduction

1.1 D'une opinion positive à négative de l'opération de friture

Dans l'inconscient collectif, les produits frits (pomme de terre chips ou frites) sont souvent associés à la malbouffe ou à la « junk food ». Ils seraient la conséquence de la généralisation de la restauration hors foyer et du snacking, mais il n'en est rien (Vitrac et Raoult-Wack, 2002). L'opération de friture, qu'elle soit plate (à la poêle) ou profonde (dans un bain d'huile), est l'une des plus anciennes opérations de

cuisson des aliments. Des traces archéologiques ont été trouvées en Égypte, en Chine et en Amérique centrale (Vitrac et al., 2003a). Une poêle à frire richement ciselée datant de l'âge de bronze (~4500 ans) est exposée au Musée National Archéologique d'Athènes dans l'aile de la culture des Cyclades sous le numéro d'inventaire 4974 (Museum, 2019). L'huile d'olive était déjà la matière grasse utilisée. L'ancien testament (Lévitique, Chapitre 2, versets 4-7), écrit au VI^{ème} siècle av. J.-C., décrit également la friture de galettes. La friture cuit, sèche, texture, reformule et stabilise les aliments comme nulle autre opération ; elle a traversé les époques et conquis toutes les civilisations humaines parce qu'elle est facile à mettre en œuvre, efficace, elle augmente la digestibilité et l'appétence des aliments carnés ou végétaux. Dans les sociétés en développement, la consommation des produits frits tend à augmenter avec le niveau de revenu et l'urbanisation (Drewnowski et Popkin, 1997). La transition s'accompagne d'une double substitution des matières grasses animales par des matières grasses végétales saturées puis polyinsaturées (Traill et al., 2014). L'attrait pour les aliments sucrés et gras associé à un mode de vie sédentaire serait responsable de la prévalence des cas d'obésité (Drewnowski et al., 2010).

A notre époque post-consumériste, l'opération de friture profonde tend à être progressivement délaissée à l'échelle domestique ; elle est jugée « trop sale », trop odorante ; la gestion de l'huile usagée est jugée également trop compliquée. Plus préoccupante, la consommation des produits frits serait impliquée dans certains cancers (Stott-Miller et al., 2013 ; Zhivagui et al., 2019). Les molécules incriminées seraient i) l'acrylamide, généré par les réactions de Maillard dans les produits amylicés (Mottram et al., 2002 ; Stadler et al., 2002 ; OMS-FAO, 2005 ; Sanderson, 2012), et ii) les composés aromatiques polycycliques produits dans l'huile et aussi présents dans la phase gazeuse au-dessus du bain (Yao et al., 2015 ; Zhang et al., 2018). D'autres substances issues de la scission des hydroperoxydes insaturés générés dans le bain de friture comme le 4-hydroxy-[E]-2-nonanal sont des composés potentiellement cytotoxiques (Montine et al., 1996 ; Seppanen et Csallany, 2006). D'autres évidences corrélient la consommation des produits frits avec les maladies cardiovasculaires (Gadiraju et al., 2015 ; Sun et al., 2019).

1.2 Les enjeux de la friture de pomme de terre à l'ère digitale

Il n'y a pas de raison de rejeter en bloc l'opération de friture et les produits frits, mais il est important d'identifier les marges de progrès qui permettent de préserver les principales caractéristiques positives de l'opération (compacité, transferts et cuisson rapides) tout en ouvrant la possibilité de produits frits plus sains. Les raisons d'espérer sont paradoxalement nombreuses. La technique culinaire a été mis en œuvre bien avant que sa compréhension ait été établie (Stier, 2004). Il n'est pas possible de dater les premières recettes des pommes de terre frites ou chips. On trouve la trace des pommes de terre frites dans les procès-verbaux précédant la Révolution française (p 81, Le Moyne des Essarts, 1775) ; des variétés de pommes de terre dédiées apparaissent dès le milieu du dix-neuvième siècle (Disord, 1852). Les chips de pomme de terre ne sont pas à proprement parler une nouvelle recette. Les tranches fines sont découpées perpendiculairement au plan de découpe des frites. La déshydratation des chips est plus poussée et le produit final peut se conserver au sec à température ambiante. L'industrie du snacking a transformé une recette anonyme en légende (Fox et Banner, 1983 ; Freedman et Jurafsky, 2011). Au restaurant Moon's Lake House à Saratoga Springs (NY, USA), le chef cuisinier George Crum aurait servi des frites trop fines au futur magnat du rail Cornelius Vanderbilt. La monographie historique de la pomme de terre par Ernest Roze (Roze, 1898) décrit les multiples possibilités offertes par la friture, mais n'accorde aucune de place au procédé lui-même. La friteuse à brûleurs à gaz fait sa première apparition lors de l'Exposition universelle de Paris de 1867 (UK Parliament Houses, 1868). L'invention de la friteuse continue par Freeman McBeth de la société J.D. Ferry permettra une économie d'échelle dès 1929. A la même époque, l'invention du peleur mécanique, des papiers cirés et du cellophane complètent l'écosystème « chips » (Silverman, 2001). Les frères McDonald conçoivent pour leur chaîne de restaurant du même nom la première friteuse qui permet de maintenir la température du bain d'huile au-dessus de 163°C et ainsi d'obtenir des frites très croustillantes. Mais

c'est un ancien fermier, J.R. Simplot, devenu milliardaire, qui proposera de remplacer les 175 producteurs de pomme de terre du groupe McDonald par une seule usine « d'allumettes congelées » (Schlosser, 2001). En 1996, la Cour d'appel des États-Unis pour le circuit fédéral conclut dans l'affaire Lamb-Weston, inc. contre McCain Foods, Ltd et McCain Foods, inc. (Nos 93-1536, 94-1225) que l'on peut breveter *une tranche de pomme de terre gaufrée préfrite et congelée* (Brevet US4937084, 1983). Tout en reconnaissant la concurrence féroce que se livrent les deux leaders américains de la frite congelée et l'existence de brevets antérieurs, la plus haute juridiction américaine avant la Cour suprême statue dans son jugement que l'existence du brevet « McDonald's » sur les frites précongelées (US3397993A, 1968), bien que passé dans le domaine public, n'empêche pas l'innovation dans le domaine des produits frits y compris en combinant des opérations déjà connues : « *The Federal Circuit has attempted to set a uniform standard whereby the teaching, suggestion, or motivation to combine prior art information must itself come from the knowledge in the prior art. The concept of a new product is not the "motivation" that negates patentability. That inventors hope to profit from their invention is irrelevant to the determination of obviousness. The motivation to which precedent is directed is that which would make obvious the technologic advance, not the motivation to achieve a competitive advantage.* »

Le message est clair, l'opération de friture est bien ouverte à l'innovation technologique. L'enjeu est considérable pour les pommes de terre frites. Elles absorbent 29% de la production américaine de pommes de terre et sont devenues en quelques années le premier aliment consommé aux États-Unis (Schlosser, 2001). Le temps où le président Thomas Jefferson faisait découvrir aux hôtes de la Maison-Blanche des « *potatoes fried in the French manner* » est révolu. A l'échelle mondiale, le marché de la pomme de terre préfrite congelée atteindra 74 milliards de dollars en 2025, soit, à titre de comparaison, bien plus que les marchés des produits de boulangerie et des pizzas congelés (Sable et al., 2019).

1.3 Contenu de l'article

La réduction des matières grasses est la principale propriété recherchée par l'industrie de la pomme de terre, les producteurs d'huile et les équipementiers. Cet article fait le point sur les derniers résultats acquis au travers du projet collaboratif Fry'n « *des produits frits plus sains* » et des contrats de recherche partenariale lors de la dernière décennie. Comparativement aux efforts de recherche précédents, le parti pris a été très différent. L'innovation était placée au centre du dispositif. Il s'agissait d'analyser les fondements physiques et physico-chimiques de l'opération unitaire pour en revisiter toutes les modalités de mise en œuvre, de l'échelle industrielle à l'échelle domestique. A l'origine de ce pari, il y a un constat expérimental contre-intuitif : ce n'est pas l'immersion du produit dans l'huile qui cause l'imprégnation en huile, mais plutôt le retrait du produit du bain et la quasi-incapacité d'égoutter le produit. En lisant ces mots, vous comprenez qu'il y a une différence fondamentale entre la friture profonde (par immersion) et la friture plate (à la poêle) : la première ne met le produit en contact l'huile qu'une (cas des frites fraîches et des chips) ou deux fois (cas des produits préfrits congelés), alors que la deuxième répète le contact à chaque retournement du produit. Nous avons recherché à modéliser et simuler ces phénomènes à toutes les échelles : de l'échelle de la microseconde/ dixième de micromètre jusqu'à l'échelle de la minute et quelques centimètres. Les principaux éléments de compréhension font l'objet de cet article. Les liens entre oxydation, design et conditions de friture ont été abordés dans des travaux complémentaires (Patsioura et al., 2017 ; Touffet et al., 2018), mais ils ne sont pas intégrés à cet article.

2. La carte d'identité de l'opération de friture profonde

Le concept d'opération unitaire est central en génie des procédés. Il définit une étape dans la chaîne de transformation des produits manufacturiers. Ce schéma est adapté pour penser une usine de friture

comprenant des étapes de lavage, découpe, blanchissement, *friture*, ensachage, conditionnement en cartons et palettisation ; mais il s'adapte peu à l'opération de « *friture* ». D'après le Littré, le verbe frire est dérivé du latin frigère, *frire*, qui se rattache au grec φρύγω, sécher et φρύγετρον, rôtissoire, eux-mêmes issus des radicaux sanscrits bhrij, cuire, et bhrāj, brûler, briller. L'historique du mot *frire* démontre donc que l'opération se définit comme l'ensemble des processus physiques qui permettent de rendre les aliments « *friands* » (même racine que *frire*) ou appétissants au goût du consommateur.

La friture réalise en une seule opération compacte et intense plusieurs transformations : la gélatinisation de l'amidon, la dénaturation des protéines, le séchage (la perte en eau), la création d'une microstructure alvéolaire ou expansée rigide et fragile, le remplacement de l'eau et des matières grasses propres par l'huile du bain, une modification de l'état de surface (couleur, aspect, brillant).

2.1 La friture profonde comprend toujours deux étapes : une sans air et une avec air

2.1.1 Principes thermodynamiques du séchage/condensation « par ébullition »

La friture profonde consiste à immerger un produit alimentaire riche en eau dans un liquide à haut point d'ébullition, de nos jours de l'huile végétale. Afin de réduire la production d'acrylamide, le règlement 2017/2158/CE (EU, 2017) impose que la température de l'huile du bain, T_{∞} , ne dépasse pas 175°C. Cette description est insuffisante pour comprendre les couplages forts entre transferts de chaleur et de matière pendant l'immersion et le retrait du produit. Il faut absolument s'aider des concepts de la thermodynamique, comme le démontrent les observations expérimentales suivantes. La friture élimine l'eau dès que la température de surface dépasse 100°C, l'ébullition s'arrête quand le produit est à la même température que le bain, par exemple 160°C. La teneur en eau résiduelle dans un produit frit se mesure à une température bien inférieure, typiquement 103°C, dans une étuve. Il n'y a aucun paradoxe à utiliser une température plus basse pour continuer le séchage. La friture est un procédé de séchage dit « par ébullition » alors que le séchage convectif à l'étuve procède par entraînement de l'humidité. Il y a un changement d'état dans les deux cas (il faut de la chaleur), mais la température est le potentiel moteur uniquement pour premier alors que la différence d'humidité relative (ou activité de l'eau) contrôle la vitesse de séchage pour le second.

La friture profonde comprend deux étapes distinctes, décrites sur la Figure 1. La première étape d'immersion est réalisée en l'absence d'air de sorte que l'activité de l'eau locale, a_w^T , dans la croûte hygroscopique est complètement déterminée par la température locale, T , comprise entre la température de saturation T_{sat} à la pression de travail P_{∞} et T_{∞} :

$$a_w^T = \frac{P_{\infty}}{P_{v,sat}^T} \quad (1)$$

Le flux de chaleur transféré par l'huile par convection permet d'échauffer rapidement la croûte d'une température T_1 à une température $T_2 \geq T_1 \geq T_{sat}$. L'activité de l'eau est concomitamment abaissée de $a_w^{T_1}$ à $a_w^{T_2} \leq a_w^{T_1} \leq 1$. Cette chute d'activité s'accompagne d'une perte en eau, exprimée par rapport à la matière solide, de X^{T_1} à $X^{T_2} \leq X^{T_1} \leq X_{cr}$, où X_{cr} est la teneur en eau critique séparant le domaine hygroscopique du domaine capillaire/saturant.

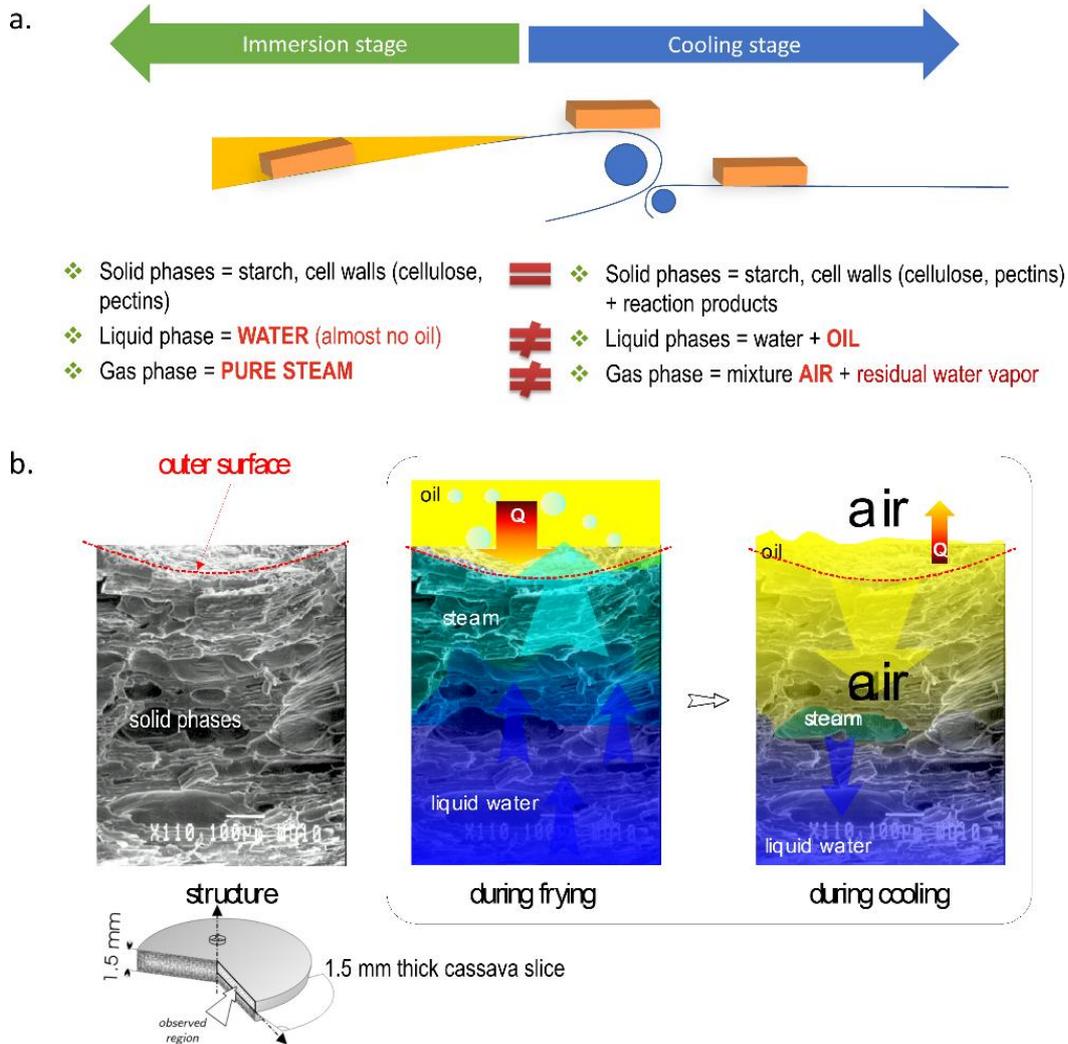


Figure 1 : Décomposition de l'opération de friture en deux étapes successives : (a) décompte du nombre de phases, (b) orientation des flux (Q =chaleur). D'après Achir et al., 2010a ; Patsioura et al., 2016).

Le processus inverse se produit lors de la remise du produit frit à température ambiante. Tant que l'ébullition se poursuit dans le produit, l'activité de l'eau dépend comme précédemment de la température et de la fraction molaire en air, x_{air} :

$$a_w^T = (1 - x_{air}) \frac{P_\infty}{P_{v,sat}^T} \quad (2)$$

En l'absence d'air, la remise en température s'accompagne d'une reprise en eau provoquée par la sorption réversible de la vapeur. Il s'en suit une forte dépression à l'échelle cellulaire. En présence d'air, la remise en température s'accompagne au contraire d'un séchage complémentaire. La subtile différence entre ces deux conditions détermine comment le champ de pression totale va fluctuer au cours du temps et au niveau de la structure cellulaire en cours de rigidification (Achir et al., 2010a). L'huile adhère et pénètre dans le produit quand $P_\infty + P_C > P$, où P_C et P sont respectivement la pression capillaire de l'huile et la pression totale dans le tissu.

Il est important de remarquer que la friture peut être réalisée sous vide partiel, cela permet d'abaisser la température de friture tout en conservant un débit évaporatoire similaire, approximativement proportionnel à $\sqrt{T_\infty - T_{sat}(P_\infty)}$. Les procédés sous-vides sont essentiellement discontinus et bien adaptés aux produits très thermosensibles comme les fruits et certains légumes.

2.1.2 Isobares typiques et relation avec les autres caractéristiques du produit

Toutes les transformations subies par le produit frit au cours de la phase d'immersion et de la remise en température (niveau de déshydratation, rigidité de la croûte, intensité de la dépression) obéissent à un processus thermodynamique entièrement contrôlé par deux grandeurs intensives : 1) la température et la pression de travail au cours de l'immersion ; et 2) la température et la fraction molaire en phase incondensable (air) lors du refroidissement. L'ensemble est résumé sur les diagrammes de la Figure 2. A titre d'illustration, si la surface d'une frite est portée à 120°C (« *reference state* »), l'activité de l'eau sera de 0.5 après le retrait du bain, avec une température de transition vitreuse, T_g , comprise entre 60 et 110°C suivant la teneur et le type d'amidon. Dans cet exemple, la rigidification de la croûte se produit au cours du refroidissement et le produit reste souple lors de l'étape d'immersion.

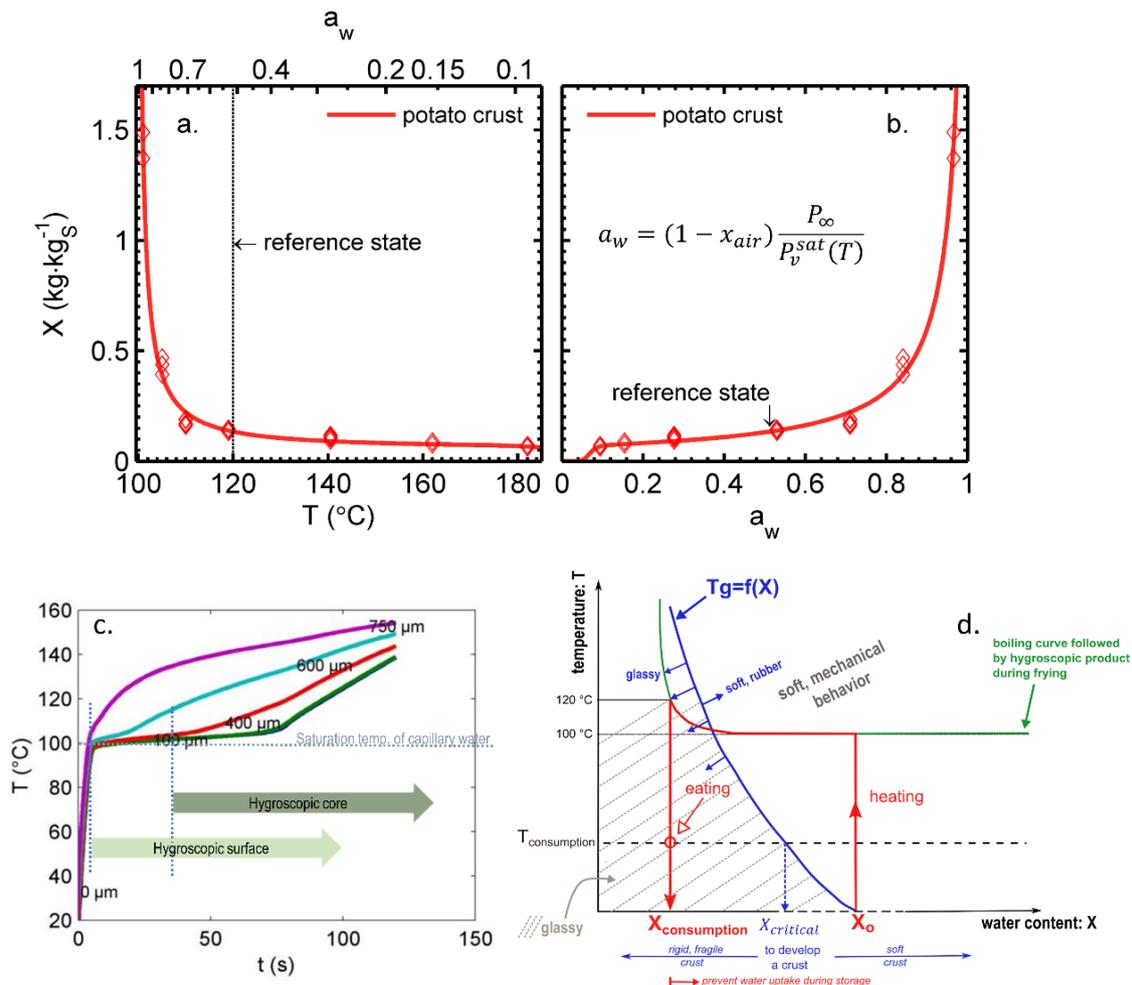


Figure 2 : Principe thermodynamique de l'opération de friture profonde (phase d'immersion et de remise en température) : (a-b) isobare à pression atmosphérique de la sorption/désorption de l'eau dans la croûte d'une frite (X : teneur en eau en base solide, T : température, a_w : activité de l'eau), (c) cinétique de température en cours de friture pour des chips de 1.5 mm d'épaisseur (les distances sont indiquées par rapport au plan de symétrie), (d) principe de rigidification de la croûte au cours du refroidissement. D'après (Achir et al., 2010a ; Vitrac et al., 2000 ; 2012).

Dans une logique de réduction de la prise d'huile, la dépression au cours du refroidissement est complètement supprimée en modifiant le chemin thermodynamique utilisé pour la remise en température du produit. Les stratégies les plus utilisées sont le maintien en température ou l'ajout d'une étape de chauffe en présence d'air avant refroidissement. Il est important de remarquer que la vapeur d'eau surchauffée en équilibre thermodynamique avec un milieu hygroscopique présente des propriétés

très différentes de celles de la vapeur pure. Elle se vaporise/désorbe et se condense/réabsorbe à des températures supérieures à la température d'ébullition de l'eau pure. La chaleur de vaporisation comprend, en effet, à la fois l'énergie de cohésion des molécules d'eau et une interaction spécifique avec la phase solide. Il existe une isobare de désorption spécifique pour chaque constituant cellulaire (amidon, cellulose, pectine). La construction de ces courbes d'équilibre est indispensable pour la formulation d'enrobages, d'enduits ou encore pour remplacer l'étape de friture par une étape de cuisson au four traditionnel ou micro-ondes. Ces courbes ne sont pas aujourd'hui dans le domaine public, mais elles sont utilisées pour l'optimisation des produits industriels.

2.2 Pourquoi l'huile ne rentre pas dans le produit lors de l'étape d'immersion

2.2.1 Le schéma général pour les produits non surgelés

L'ébullition démarre en surface puis en profondeur dès les premiers instants de l'immersion (Vitrac et al., 2002b). Les densités de flux de chaleur peuvent atteindre $150 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ et les coefficients de transfert de chaleur jusqu'à $2200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (Vitrac et al., 2003b ; Vitrac et Trystram, 2005). La Figure 3 démontre que l'évacuation de la vapeur au travers la croûte hygroscopique s'effectue contre une perte de charge. Cette dernière est responsable d'une surpression interne de plusieurs kPa qui s'oppose à la pression capillaire de l'ordre de quelques centaines de Pa. Au cours du refroidissement, la dépression peut atteindre jusqu'à -40 kPa . Contrairement à l'intuition, le refroidissement du produit isolé de l'air extérieur, par exemple par le film d'huile qui le recouvre, permet d'entretenir l'ébullition interne jusqu'à ce que le cœur du produit atteigne 88°C .

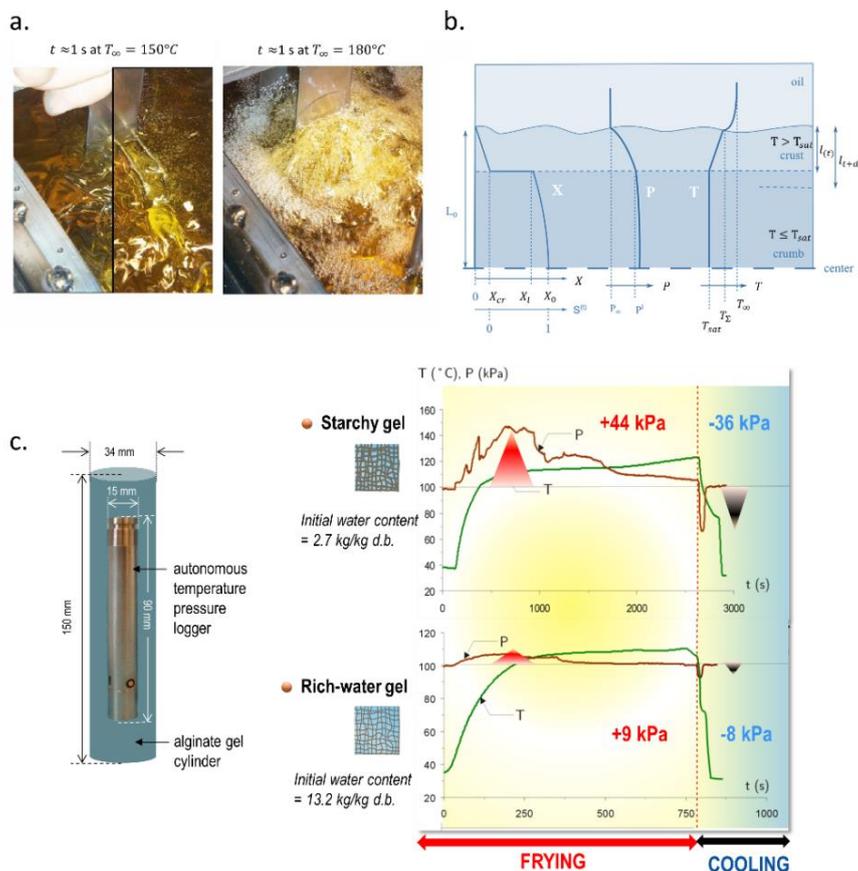


Figure 3 : Développement du champ de pression au sein du produit : (a) intensité de l'ébullition dès l'immersion ; (b) profils de teneur en eau (X), saturation (S), pression (P) et de température (T) schématisés en cours de friture ; (c) mesures *in situ* des surpressions internes dans des gels d'alginate thermostables contenant de l'amidon ou pas. (D'après Vitrac et al., 2000 ; Achir et al., 2008).

2.2.2 Les produits préfaits surgelés : l'exception qui confirme la règle précédente

Les produits préfaits surgelés présentent de nombreuses spécificités, dont la persistance de la glace au sein du produit pendant la première minute de friture et la présence d'un fort endommagement cellulaire avec des fissures longitudinales et transverses. Les conditions de friture étant très éloignées du point triple de l'eau, les phases glace, eau liquide et vapeur ne peuvent coexister. Ainsi, la vapeur générée en cours de friture peut être éliminée en s'échappant soit au travers de la croûte (situation la plus fréquente), soit en se condensant au contact du cœur congelé. Ce dernier mécanisme a été mis en évidence en utilisant de l'huile colorée bleue pendant la première minute d'immersion. Il est illustré sur la Figure 4.

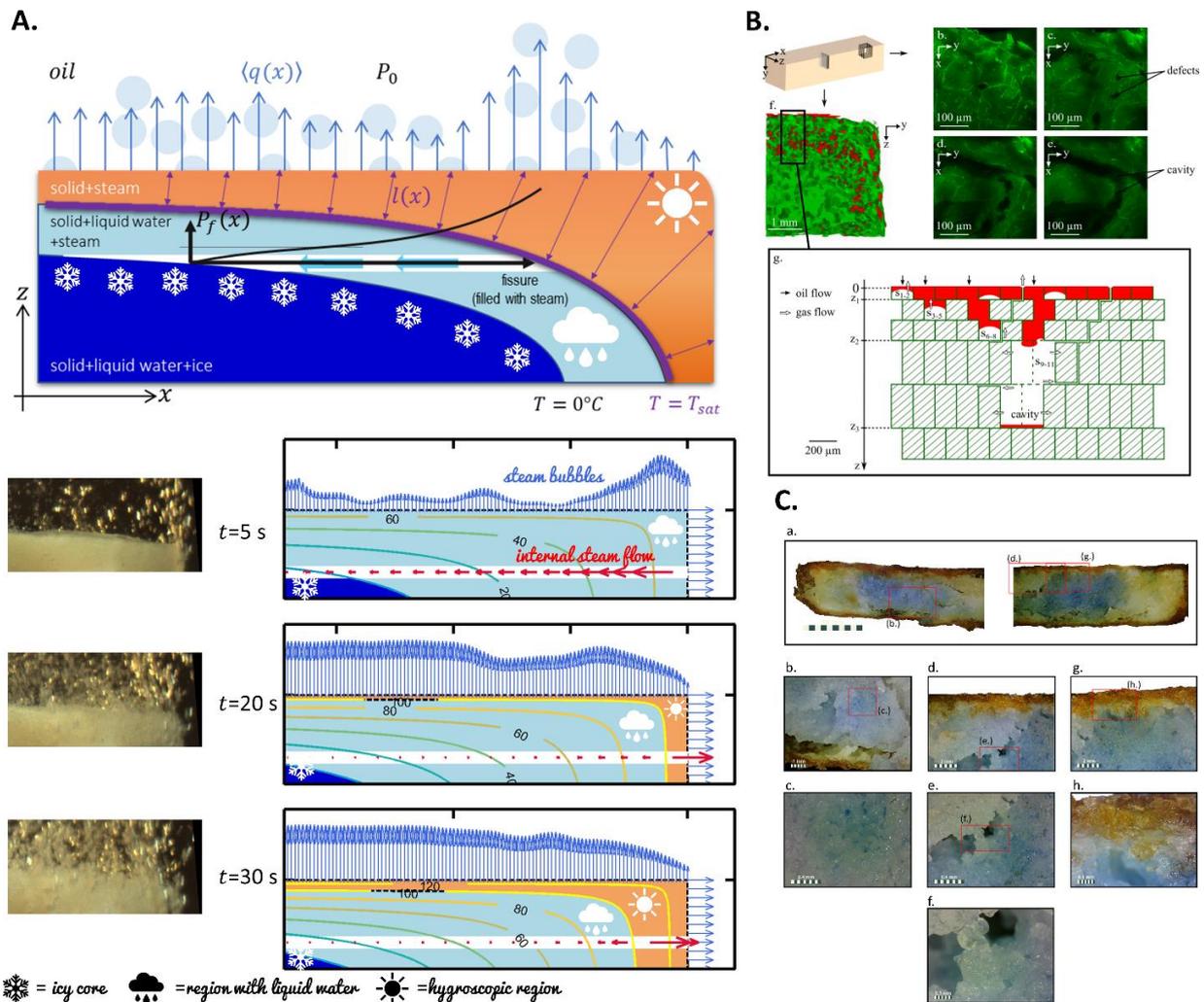


Figure 4 : Circulation de la vapeur et prise d'huile dans un produit préfait congelé lors de la première minute d'immersion : (A) reconstruction du champ de pression le long d'une fissure longitudinale au sein d'une frite en présence d'un cœur congelé ; (B) mise en évidence en micro-tomographie aux rayons de la localisation transverse de la prise d'huile et des défauts de surface en microscopie confocale ; (C) distribution de l'huile ayant imprégné le produit préfait congelé pendant la première minute de friture (huile marquée en bleu) et après retrait du produit (huile marquée en rouge orangé). D'après (Vauvre et al., 2014 ; Touffet et al., 2019 ; Achir et al., 2010b).

L'écoulement de la vapeur de la croûte vers le cœur entraîne une dépression locale en cours de friture et est responsable en retour d'une prise d'huile le long la fissure ou le long d'un défaut de la croûte. Ce mécanisme est responsable d'une prise d'huile représentant au maximum 10% de l'huile totale imprégnée (Vauvre et al., 2014 ; Touffet, 2018 ; Touffet et al., 2019). Il a pour caractéristique de

permettre une imbibition forcée dans la masse du produit, y compris dans les espaces intercellulaires riches en eau (voir Figure 4C). Ce mécanisme suit un cycle de Carnot, il est universel, mais très hétérogène. Le profil d'imprégnation dépend du nombre de défauts, des orientations dans la matrice et de la géométrie de la frite. Il prend naissance à partir des extrémités (coins et arrêtes) parce qu'elles sont plus déshydratées que les faces principales. Les simulations de la Figure 4a démontrent que ce sont les formes oblongues et concentriques des fronts de décongélation et de vaporisation qui sont responsables de la mise en contact possible de la vapeur avec la glace. L'écoulement de la vapeur interne a été reconstruit à partir des fluctuations du débit de bulles de vapeur autour du produit (Touffet et al., 2019). Trois réservoirs d'huile apparaissent généralement dans les frites industrielles : au centre et au premier tiers de la longueur, en accord avec la théorie.

3. Pourquoi l'huile des produits frits s'égoutte si difficilement et s'imprègne si rapidement

Une frite placée verticalement au-dessus du bain de friture perdra en moyenne quatre à cinq gouttes. Le reste de l'huile soit sera absorbée ou soit adhèrera simplement à la surface du produit. Si on filme avec une caméra rapide la sortie de la frite du bain ou si on cherche à modéliser l'écoulement de l'huile, une physique riche et subtile se révèle, résumée sur la Figure 5. Quand la frite est immergée, le film d'huile a la dimension du bain et l'huile ne rentre pas. Quand la frite est retirée du bain, le film d'huile s'amincit très rapidement. Ce phénomène initialement étudié par Reynolds est bien connu dans le domaine des peintures. Dans le cas d'une frite, l'huile est drainée du fait de la combinaison du déplacement relatif de la frite par rapport à la surface du bain et de la gravité. Tant que l'extrémité inférieure de la frite est immergée, le film d'huile est supporté et son épaisseur augmente avec la racine carrée de la vitesse de retrait (il ne faut pas retirer la frite trop vite). Il est de l'ordre de 200 μm pour une vitesse de retrait de 8 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Une fois la frite complètement retirée, l'huile ne s'écoule que sous l'action de la gravité. L'épaisseur du film prend alors une allure parabolique et décroît comme l'inverse de la racine carrée du temps. L'épaisseur est maximale au bas de la frite, où se forme la première goutte. La goutte est au centre de la section avec un rayon de même dimension que le cercle inscrit. Elle se décroche quand la tension de surface est insuffisante pour compenser le poids de la goutte. La masse de décrochage est affectée par de multiples effets hydrodynamiques comme la vitesse de formation des gouttes ou encore la présence d'un film de vapeur instable entre la goutte et le produit.

La capacité à égoutter d'une frite isolée (cas le plus favorable) dépend d'au moins deux facteurs critiques, qui sont en fait liés : la vitesse de refroidissement et la vitesse d'absorption de l'huile. L'huile est très thermodilatable et la viscosité augmente fortement quand la température diminue. Sur une surface poreuse, la contraction thermique crée une force de succion considérable capable de dominer devant les forces capillaires dans les cellules évidées et cavités (Laouir et al., 2003). Dans les défauts et ruptures plus petits qu'une cellule, les forces capillaires dominent largement devant les efforts visqueux. Suivant que l'imbibition soit forcée (condensation de la vapeur) ou seulement spontanée (sans condensation), l'huile traverse l'espace d'une cellule entre un 10^{-6} et 10^{-2} s (Patsouria et al., 2015 ; Vauvre et al., 2015), c'est-à-dire bien avant que la frite ait eu le temps de quitter complètement le bain. Si on ne fait pas attention, la croûte est imbibée en huile jusqu'à saturation avant même que la première goutte ne se soit formée. L'égouttage n'empêche généralement pas l'imprégnation en huile, il permet seulement d'éliminer l'huile en excès à la surface. L'ensemble des phénomènes a été simulé dans un modèle multiéchelle décrivant les phénomènes de l'échelle du micromètre jusqu'à l'échelle de dizaines de milliers de cellules de parenchyme de pomme de terre (Vauvre et al., 2015). Il a permis de mettre en évidence le rôle fondamental de l'air (phase incondensable) non seulement sur la prévention de la condensation, mais aussi sur le ralentissement de la pénétration de l'huile. Sur une surface rugueuse, l'épaisseur du film d'huile fluctue et l'air peut s'infiltrer sous le film d'huile (Patsouria et al., 2016 ; Vauvre et al., 2014 ; Achir et al., 2010b ; Patsouria et al., 2015). A l'intérieur du produit, l'huile s'écoule par capillarité dans les coins anguleux des cellules (angles rentrants) et le long des fines

craquelles (Touffet et al., 2019). L'air rééquilibre la pression interne au sein des cellules en restant loin des parois préférentiellement mouillées par l'huile. Quand l'huile est en avance sur l'air, les films d'huile qui recouvrent les parois finissent par fusionner dans les restrictions (mécanisme de « snap-off ») et emprisonnent des bulles d'air. Ces bulles réduisent les sections de passage et donc également les débits d'imprégnation. Parce que l'huile doit déplacer l'air, les cinétiques d'imprégnation sont fortement rallongées et passent de quelques secondes à plusieurs dizaines de minutes (Patsouria et al., 2015).

La longueur de la frite, le profil d'endommagement sont également des facteurs à prendre en compte dans la cinétique d'imprégnation en huile. Les simulations de profils d'endommagement en « V » (frites fraîches dont les cellules de surface ont perdu leur amidon) ou en « chapeau » (frites industrielles précongelées et dont les cellules de surface sont remplies d'amidon gélatinisé) démontrent que le type de connectivité affecte considérablement la prise d'huile (voir Figure 5e).

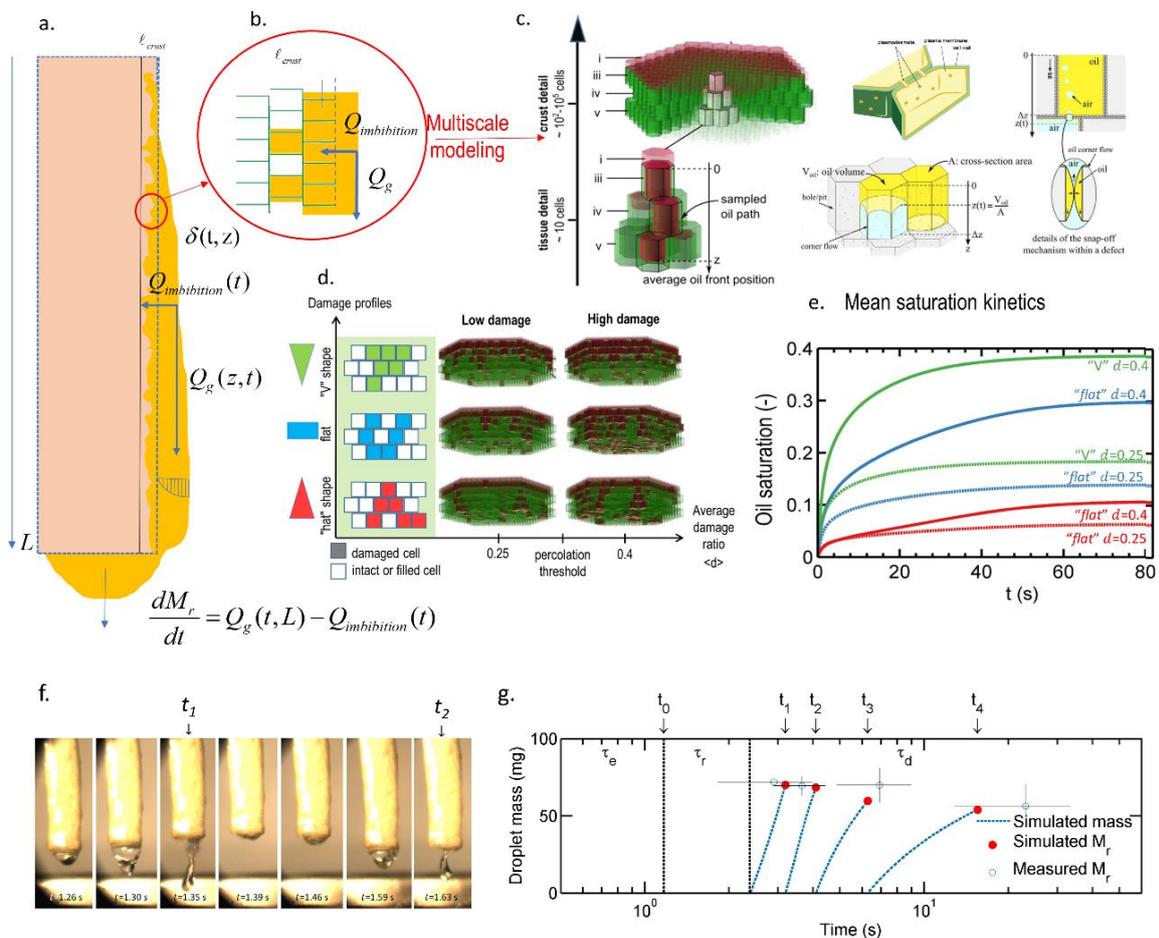


Figure 5 : Description de l'écoulement autour et au sein de la friture dans les premières secondes qui suivent le retrait du produit : (a-e) Modélisation multiéchelle de la prise d'huile prenant en compte la connectivité des cellules et les écoulements biphasiques huile-air (c) et le profil d'endommagement dans le produit ; (f) imagerie de l'égouttage d'une frite à 160 images/s et (g) sa modélisation multiéchelle prenant en compte la vitesse de refroidissement, l'imprégnation en huile et l'écoulement superficiel du film. D'après (Touffet, 2018 ; Parsouria et al., 2015 ; Vauvre et al., 2015).

4. Jusqu'où peut-on réduire l'imprégnation en huile ?

Les descriptions précédentes de l'imprégnation en huile des frites ne considèrent pas les traitements par lots et donc le fait que l'huile s'écoule le long d'un lit de frites dans un panier et non pas sur une frite isolée placée verticalement. Le mérite des modèles et des simulations présentés est ailleurs. Ils

permettent de répondre indépendamment de la mise en œuvre technologique à une question fondamentale : quelle est la réduction de prise d'huile que l'on peut espérer si on découple complètement les cinétiques d'imprégnation en huile et d'égouttage ? Dans les frites industrielles, il existe au moins une voie de pénétration par 25 mm^2 qui conduit à un arbre de percolation de l'huile et un profil d'égouttage semblable à celui présenté sur la Figure 6.

Pour une frite industrielle standard, les quelques gouttes perdues sur une frite isolée permettent de réduire la masse d'huile par plus de 50%. L'égouttage ne dure au plus que 6 à 8 s. En entretenant la surpression initiale, la réduction peut atteindre 50% supplémentaire au bout d'une minute. Elle pourrait théoriquement atteindre 66% au bout de 20 minutes. L'huile ayant pénétré en cours de friture dans un produit initialement préfrit précongelé ne peut être égouttée, il faut décongeler le produit avant la friture finale pour l'empêcher de rentrer. Quand plusieurs étapes de friture profonde sont appliquées (deux ou plus), une partie de l'huile ayant pénétrée par adhésion au cours de l'étape précédente sera remplacée au cours du de l'étape suivante. La moitié de l'huile initialement présente dans les pommes de terre pré-frites congelées industriellement est perdue lors de la friture de finition.

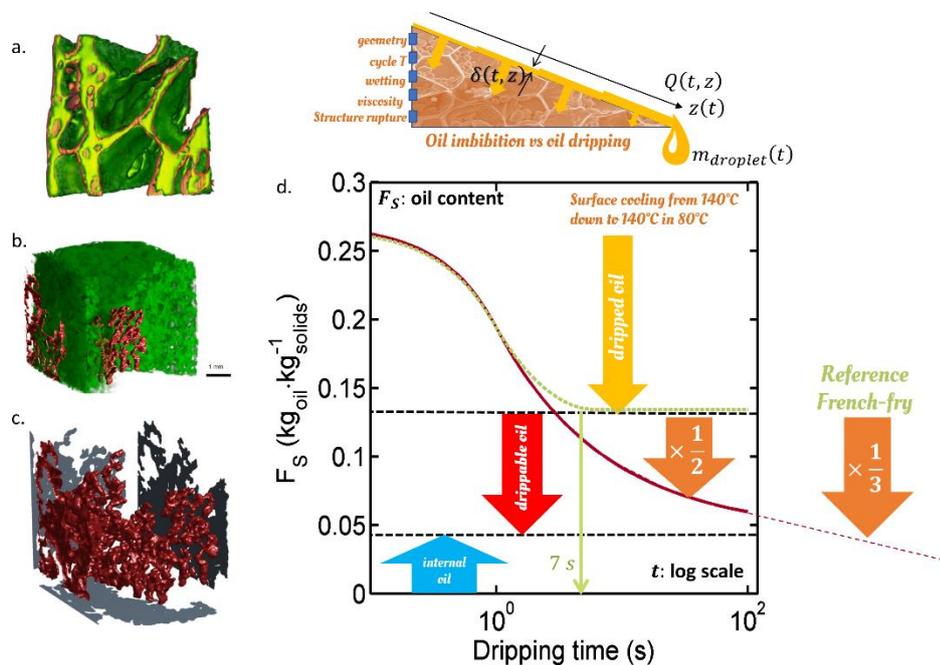


Figure 6 : Reconstruction du scénario de prise d'huile au cours du refroidissement et des alternatives avec égouttage optimisé : (a) tissus de parenchyme de pomme de terre et ses défauts reconstruits en microtomographie aux rayons X ; (b-c) arbre de percolation de l'huile à partir d'un seul point d'entrée dans une frite industrielle ; d. profil d'égouttage (variation de la teneur en huile en base solide). D'après (Patsouria et al., 2016 ; Vauvre et al., 2014 ; Touffet, 2018).

4. Conclusions et perspectives

Les premières descriptions de l'opération de friture profonde à partir de concepts macroscopiques, perte en eau contre un flux de chaleur et remplacement de l'eau liquide par l'huile, se sont montrées au mieux imprécises et au pire incorrectes. L'imprégnation en huile est un phénomène rapide contrôlé par les détails microscopiques de la surface et de la structure cellulaire. Le double contrôle enthalpique (température, fraction d'air) et entropique (ordre de substitution des phases vapeur, air, huile, connectivité des défauts) complexifie dramatiquement la construction d'un modèle général. Nous avons utilisé la modélisation multi-échelle et des expériences dédiées à l'échelle microscopique pour dégager les voies technologiques de la réduction de la prise d'huile. La décongélation avant friture, la réduction du nombre de points d'entrée de l'huile, le pilotage de la remise en température sont autant de

directions d'innovation pour réduire la prise en huile. Elles sont très efficaces, elles sont pour certaines déjà sur le marché ou à venir. Nous ne donnons pas de recettes de cuisine, mais nous sommes sûrs que vous ne regarderez plus vos frites de la même manière, il y a encore tant à découvrir. L'huile imprégnée peut être physiquement retirée, c'est la prochaine direction de nos travaux.

Références bibliographiques

- Achir N., Vitrac O., Trystram G., 2008. Simulation and ability to control the surface thermal history and reactions during deep fat frying. *Chemical Engineering and Processing* 47:1953-67.
- Achir N., Trystram G., Vitrac O., 2010a. Heat and mass transfer during frying. In: Sumnu S.G., Sahin S., (Editors). *Advances in Deep-Fat Frying of Foods*: CRC Press; p. 5-32.
- Achir N., Vitrac O., Trystram G., 2010b. Direct observation of the surface structure of French fries by UV-VIS confocal laser scanning microscopy. *Food Research International* 43:307-14.
- Commission européenne regulation (EU), 2017. Establishing mitigation measures and benchmark levels for the reduction of the presence of acrylamide in food. *Official Journal of the European Union* 2017/2158 L 304:24-44.
- Disord T., 1852. L'exposition d'horticulture. *Charivari* du 1852-03-29.p.1-2.
- Drewnowski A., Popkin B.M., 1997. The nutrition transition: new trends in the global diet. *Nutrition reviews* 55:31-43.
- Drewnowski A., Almiron-Roig E., 2010. Human Perceptions and Preferences for Fat-Rich Foods Fat Detection: Taste, Texture, and Post Ingestive Effects. Boca Raton FL: Taylor & Francis Group, LLC.
- Freedman J., Jurafsky D., 2011. Authenticity in America: Class Distinctions in Potato Chip Advertising. *Gastronomica* 11:46-54.
- Fox W.S., Banner M.G., 1983. Social and Economic Contexts of Folklore Variants: The Case of Potato Chip Legends. *Western Folklore* 42:114-26.
- Gadiraju V.T., Patel Y., Gaziano M.J., Djoussé L., 2015. Fried Food Consumption and Cardiovascular Health: A Review of Current Evidence. *Nutrients* 7.
- Laouir A., Luo L., Tondeur D., Cachot T., Le Goff P., 2003. Thermal machines based on surface energy of wetting: Thermodynamic analysis. *AIChE Journal* 49:764-81.
- Le Moyne Des Essarts N.-T., 1775. Causes célèbres curieuses et intéressantes, de toutes les cours soubaines du royaume; avec les jugemens qui les ont décidées - Tome cinquième. Paris: Simon, P.G
- Montine T.J., Amarnath V., Martin M.E., Strittmatter W.J., Graham D.G., 1996. E-4-hydroxy-2-nonenal is cytotoxic and cross-links cytoskeletal proteins in P19 neuroglial cultures. *Am J Pathol.* 148:89-93.
- Mottram D.S., Wedzicha B.L., Dodson A.T., 2002. Acrylamide is formed in the Maillard reaction. *Nature* 419:448-9.
- Museum N.A., 2019. Frying-pan vessel (4974). [cited 2019 Oct, 1, 2019].
- OMS, FAO., 2005. Acrylamide in food is a potential hazard. International Food Safety Authorities Network (INFOSAN). Information Note No. 2/2005 - Acrylamide:1-5.
- Patsioura A., Vauvre J.-M., Kesteloot R., Jamme F., Hume P., Vitrac O., 2015. Microscopic imaging of biphasic oil-air flow in French-fries using synchrotron radiation. *AIChE Journal* 61:1427-46.
- Patsioura A., Vauvre J.-M., Kesteloot R., Smith P., Trystram G., Vitrac O., 2016. Mechanisms of oil uptake in french fries. In *Advances in Potato Chemistry and Technology*. San Diego (USA) : ELSEVIER SCIENCE (2ème), 503-526
- Patsioura A., Ziiaifar A.M., Smith P., Menzel A., Vitrac O., 2017. Effects of oxygenation and process conditions on thermo-oxidation of oil during deep-frying. *Food and Bioproducts Processing* 101:84-99.
- Roze E., 1898. Histoire de la pomme de terre traitée au point de vue historique, biologique, pathologique, culturel et utilitaire. Paris (France): Rotschild, J..

- Sable K., Deshmukh R., 2019. Frozen Potato Market by Product (French Fries, Hash Brown, Shapes, Mashed, Sweet Potatoes/Yam, Battered/Cooked, Twice Baked, Topped/Stuff, and Others) and End User (Residential and Commercial): Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2018 - 2025. Market Research Report FO_172153. Portland (OR, USA): Allied Market Research 204p.
- Sanderson K., 2012. Bid to curb fried-food chemical goes cold. *Nature* 491:22-3.
- Schlosser E., 2001. *Fast Food Nation*, Revised ed. edition (March 13, 2012). Boston (MA, USA): Mariner Books, Houghton Mifflin Harcourt.
- Seppanen C.M., Csallany A.S., 2006. The effect of intermittent and continuous heating of soybean oil at frying temperature on the formation of 4-hydroxy-2-trans-nonenal and other α -, β -unsaturated hydroxyaldehydes. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 83:121-7.
- Silverman S.H., 2001. *Pennsylvania Snacks - A guide to Food Factory Tours*. Mechanicsburg (PA, USA): Stackpole Boosj.
- Stadler R.H., Blank I., Varga N., Robert F., Hau J., Guy P.A., Robert M.-C., Riediker S., 2002. Acrylamide from Maillard reaction products. *Nature* 419:449-50.
- Stier R.F., 2004. Frying as a science – An introduction. *European Journal of Lipid Science and Technology*. 2004;106:715-21.
- Stott-Miller M., Neuhouser M.L., Stanford J.L., 2013. Consumption of deep-fried foods and risk of prostate cancer. *The Prostate* 73:960-9.
- Sun Y., Liu B., Snetselaar L.G., Robinson J.G., Wallace R.B., Peterson L.L., Bao W., 2019. Association of fried food consumption with all cause, cardiovascular, and cancer mortality: prospective cohort study. *BMJ* 364:k5420.
- Traill W.B., Mazzocchi M., Shankar B., Hallam D., 2014. Importance of government policies and other influences in transforming global diets. *Nutrition reviews* 72:591-604.
- Touffet M., 2018. Transferts et réactivité de l'huile au cours du procédé de friture. Massy: AgroParisTech, Paris-Saclay
- Touffet M., Patsioura A., Ziaifar A.M., Eveleigh L., Vitrac O., 2018. Online reconstruction of oil oxidation kinetics and reaction schemes during deep-frying by deconvolution of ATR-FTIR spectra. *Journal of Food Engineering* 224:1-16.
- Touffet M., Trystram G., Vitrac O., 2019. Revisiting the mechanisms of oil uptake during deep-frying. *Food and Bioproducts Processing* (submitted)
- UK Parliament Houses, 1868. Reports on the Paris Universal Exhibition, 1867 London (UK): George E. Eyre and William Spottiswoode Eds.
- Vitrac O., Trystram G., Raoult-Wack A.L., 2000. Deep-fat frying of food: heat and mass transfer, transformations and reactions inside the frying material. *European Journal of Lipid Science and Technology* 102:529-38.
- Vauvre J.-M., Kesteloot R., Patsioura A., Vitrac O., 2014. Microscopic oil uptake mechanisms in fried products. *European Journal of Lipid Science and Technology* 116:741-55.
- Vauvre J.-M., Patsioura A., Kesteloot R., Vitrac O., 2015. Multiscale modeling of oil uptake in fried products. *AIChE Journal* 61:2329–53.
- Vitrac O., Raoult-Wack A.-L., 2002. Produits de grignotage et produits frits. . In: Albagnac G., Varoquaux P., Montigaud J.C., (Editors). *Technologies de transformation des fruits*. Paris, France: Lavoisier; p. 383-419.
- Vitrac O., Dufour D., Trystram G., Raoult-Wack A.L., 2002a. Characterization of heat and mass transfer during deep-fat frying and its effect on cassava chip quality. *Journal of Food Engineering*. 53:161-76.
- Vitrac O., Raoult-Wack A.-L., Trystram G., 2002b. Influence of Liquid Water Transport on Heat and Mass Transfer during Deep- Fat Frying. In: Welti-Chane J., Velez-Ruiz J.F., (Editors). *Transport Phenomena in Food Processing*: CRC Press p. 445-61.
- Vitrac O., Trystram G., Raoult-Wack A., 2003a. Procédés et produits frits. In: Graille J., (Editor). *Lipides et corps gras alimentaires*. Paris, France: Lavoisier p. 231-73.

Vitrac O., Trystram G., Raoult-Wack A.-L., 2003b Continuous measurement of convective heat flux during deep-frying: validation and application to inverse modeling. *Journal of Food Engineering* 60:111-24.

Vitrac O., Trystram G., 2005. A method for time and spatially resolved measurement of convective heat transfer coefficient (h) in complex flows. *Chemical Engineering Science* 60:1219-36.

Yao Z., Li J., Wu B., Hao X., Yin Y., Jiang X., 2015. Characteristics of PAHs from deep-frying and frying cooking fumes. *Environmental Science and Pollution Research* 22:16110-20.

Zhang Q., Wan C., Wang C., Chen H., Liu Y., Li S., Lin D., Wu D., Qin W., 2018. Evaluation of the non-aldehyde volatile compounds formed during deep-fat frying process. *Food Chemistry* 243:151-61.

Zhivagui M., Ng A.W.T., Ardin M. , Churchwell M.I., Pandey M., Renard C., Villar S., Cahais V., Robitaille A., Bouaoun L., Heguy A., Guyton K.Z., Stampfer M.R., McKay J., Hollstein M., Olivier M., Rozen S.G., Beland F.A., Korenjak M., Zavadil J., 2019. Experimental and pan-cancer genome analyses reveal widespread contribution of acrylamide exposure to carcinogenesis in humans. *Genome Research* 29(4):521-531

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « *Innovations Agronomiques* », la date de sa publication, et son URL)