

Titre de la thèse*

Conception de modèles numériques et d'un outil d'aide au pilotage de procédés de transformation de fruits : Technologies d'Analyse de Procédés (PAT) pour des fruits transformés aux qualités optimisés

Résumé (10 - 15 lignes)

Ce projet de thèse vise à identifier et mesurer, en temps réel, les marqueurs de la qualité organoleptique, en particulier de la texture, des matrices de fruits au cours d'un procédé de transformation pour produire des purées. Dans une recherche de naturalité des produits transformés, les industriels sont en demande d'outils pour piloter leurs procédés en fonction des caractéristiques de la matière première et ainsi éviter l'ajout d'ingrédients correcteurs de goût ou de texture. Le fruit retenu est la pomme car elle présente une variabilité importante en termes de processabilité, de structures et de compositions biochimiques. Une conjugaison appropriée de la variabilité génétique (variétés) importante dans les systèmes de production biologique et de différentes conditions de cuisson (température, temps, pression et vitesse de broyage) permettra d'obtenir des purées contrastées en particulier pour leur texture. Le robot coupeur-cuseur qui sera utilisé est équipé de dispositifs de mesure en continu (capteurs Visible et Proche infrarouge, piégeage des volatils) et d'un système de prélèvement d'échantillons qui seront, en parallèle, caractérisés par les méthodes de laboratoire (courbe d'écoulement, teneur en matière sèche, teneur en solides solubles, pH, acidité titrable). Une sélection de purées de pommes sera également caractérisée par analyse sensorielle. L'ensemble des données générées sera analysé avec des outils de traitement innovants, avec et sans *a priori* (modèles physiques (transfert-réaction) et/ou statistiques avec apprentissage), de façon à extraire les informations pertinentes permettant à partir des différentes variables observées de déterminer la qualité de la purée à un instant donné, voire d'anticiper les conditions dans lesquelles la qualité ciblée sera atteinte.

Encadrement

Responsable(s) de la thèse

Alexandre LECA (CRCN INRAE UMR408 SQPOV)
Raphaël PLASSON (MCF AU UMR408 SQPOV)

HDR ?
(O/N)

Non

Directeur(s) de la thèse (si différent du(des) responsable(s))

Sylvie BUREAU (IR2 INRAE UMR 408 SQPOV)
Isabelle SOUCHON (DR2 INRAE UMR408 SQPOV)

HDR ?
(O/N)

Oui

Université d'inscription de l'étudiant en thèse

Avignon Université

École doctorale

ED 536 "Agrosciences & Sciences"

Description du projet

Enjeux scientifiques et socio-économiques auxquels répond le projet

Les aliments à base de fruits et légumes sont actuellement majoritairement issus de pratiques conventionnelles et non durables, aussi bien au niveau de la production des matières premières que de leur transformation. Or les consommateurs exigent des **aliments plus durables et plus «naturels»** (impliquant moins d'ingrédients correcteurs de goût et de texture), mais néanmoins adaptés à leurs modes de vie et leurs goûts. Au sein de la filière agroalimentaire, il existe des marges de progrès significatives.

De plus, dans le contexte actuel, marqué par le changement climatique (périodes de sécheresse plus fréquentes) et l'évolution des pratiques de production vers une montée en puissance de l'agroécologie et de l'agriculture biologique, la variabilité des matières premières tend à augmenter. Ainsi, devant ces nouvelles sources de variabilité, les méthodes et savoir-faire traditionnels peinent à reproduire et maintenir la qualité des produits transformés. Par conséquent, les industriels sont en demande d'outils pour **optimiser l'utilisation de ces matières premières par plus d'agilité des procédés et par le développement de méthodes et d'outils permettant d'adapter les procédés à la variabilité des matières premières.**

Pour cela, il est nécessaire de caractériser les qualités organoleptiques tout au long de la chaîne de transformation des fruits afin de répondre aux exigences des consommateurs, particulièrement leur texture qui est un facteur déterminant d'acceptation et de réachat des préparations à base de fruits et légumes broyés. Une telle caractérisation au cours du procédé permettra d'identifier **les étapes clés des procédés de transformation** pour développer des outils d'aide à la décision et à terme piloter les procédés. L'investigation couplée des propriétés des matières premières et des paramètres de transformation est nécessaire pour optimiser l'utilisation de la variabilité des matières premières et définir des conditions optimales des procédés.

La mise en œuvre de **nouvelles approches analytiques**, notamment **les mesures rapides**, est indispensable pour suivre en continu le potentiel des matrices au cours de leur transformation. Ces approches vont aussi permettre de mieux décrire les mécanismes physico-chimiques impliqués dans les procédés et de mieux comprendre l'évolution des matrices sous les contraintes appliquées (température, temps, pression, vitesse de broyage).

Les préparations à base de fruits broyés (purées, coulis, concentrés) représentent un marché important, notamment de par leur utilisation comme produits alimentaires intermédiaires (PAI) dans les plats cuisinés ou les desserts. Elles doivent alors, outre l'apport de la saveur, permettre d'atteindre des textures cibles pour minimiser le recours aux ingrédients de synthèse ou exogènes. Elles sont un objet d'étude scientifique adapté à nos objectifs tout en représentant un intérêt économique majeur.

Etat de l'art scientifique - Originalité du projet

Au cours d'un procédé de fabrication des purées, le broyage et le chauffage entraînent une réduction de la taille des particules et une altération de la microstructure, notamment par l'action d'enzymes endogènes des fruits, comme les enzymes pectinolytiques [1] digérant le ciment intercellulaire et contribuant à liquéfier les purées [2]. L'action des enzymes peut être contrôlée par les procédés et en particulier la température conduisant à des purées de viscosités différentes [1, 3]. D'autres enzymes affectent les propriétés organoleptiques des purées, notamment le brunissement causé par la polyphénoloxydase [4] ou l'oxydation par les lipoxygénases. Certaines de ces enzymes impacteraient la texture [5] et d'autres, la production des volatils [6]. Ces deux phénomènes seraient liés puisque la libération des volatils est variable selon l'état des pectines, la taille et la nature des particules [7, 8]. Les volatils témoigneraient de réactions impactant l'évolution des matrices au cours des procédés et constitueraient donc potentiellement une source de marqueurs. Il en est de même pour les empreintes spectrales infrarouge des purées. En effet elles permettent de prédire la composition biochimique des purées de fruits [9-10] et parmi les variables prédites, la matière sèche est liée à la texture. La spectroscopie infrarouge a aussi permis de discriminer des purées de tomates issues de deux procédés [11] ou de prédire les caractéristiques des purées de pommes à partir des spectres des pommes intactes [12].

Dans le domaine des arômes, la mesure en dynamique de l'espace de tête permet de faire un diagnostic fiable et quantitatif. Cette technique a été utilisée avec succès pour suivre la fermentation du raisin [13] ou l'intensité aromatique des yaourts [14]. Des approches du type « omic » ont permis de suivre un procédé [15], pourtant elles restent trop lentes pour être implémentées sur des lignes de transformation de F&L. Des capteurs plus simples et calibrés pour des molécules cibles (nez électronique) sont utilisés dans des procédés pharmaceutiques ou agro-alimentaires [16, 17]. Ils sont cependant peu développés pour suivre les cuissons de F&L. L'outil infrarouge connaît un succès dans l'analyse en temps réel d'un procédé. Il permet de suivre, à travers un hublot adapté, l'évolution de l'acidité titrable, du saccharose, des polyphénols et de la couleur lors de la torréfaction du café [18-20]. Mais, l'utilisation combinée de plusieurs capteurs permet de meilleures prédictions que des capteurs isolés [21-23].

La modélisation, notamment grâce à la chimiométrie, permet d'identifier des paramètres cruciaux à l'établissement d'une qualité cible, particulièrement la texture [12]. L'hybridation de modèles statistiques reposant sur des méthodes d'apprentissage automatique, et de modèles déterministes décrivant précisément des mécanismes physico-chimiques, permet d'optimiser un procédé de transformation voire d'assister la conception d'un produit alimentaire [24].

Le savoir-faire industriel permet de régler les paramètres des machines pour atteindre une texture donnée dans le cas de variétés référencées. Mais l'arrivée de nouvelles variétés rend cet exercice difficile. Disposer d'outils permettant le réglage des machines (temps/température) à l'aide de critères objectifs devient un besoin impérieux des industriels de la transformation des F&L.

Question de recherche proposée au candidat

Est-ce envisageable d'utiliser une approche PAT (Process Analytical Technology) pour prédire les qualités organoleptiques d'une purée de pommes à partir de données acquises au cours des procédés sur la production des volatils (ATD-GCMS) et les spectres (Visible, proche infrarouge NIRS et moyen infrarouge MIRS) ?

- Existe-t-il des marqueurs pour suivre les mécanismes mis en jeu au cours de l'évolution des matrices F&L et identifier des temps clés des procédés ?
- Est-il possible de prédire la qualité finale des purées de F&L à partir de marqueurs précoces dans un objectif de mettre en place des outils d'aide à la décision ?

Hypothèses de travail

Pour qu'une approche PAT soit possible, l'hypothèse principale est qu'il existe une ou plusieurs combinaisons de variables, mesurables durant les différentes phases d'un procédé de transformation des fruits et dont l'analyse dynamique permet de prédire la texture (et éventuellement d'autres qualités organoleptiques) finale d'un produit.

Cette hypothèse sous entend :

- Qu'il existe dans la composition des fruits **des facteurs limitants** qui déterminent les réactions de transformation. Ces facteurs peuvent être **des teneurs en précurseurs** (précurseurs d'arômes ou pectines hydrolisables), en **réactifs/catalyseurs** (enzymes) ou en **déterminants d'un état physique** de la matière (taille de particules, acides organiques déterminant le pH).
- Qu'il existe des conditions des procédés (temps/température/pression/vitesse de broyage) qui modulent la réactivité physicochimique et conduisent donc à une texture cible des produits transformés.

L'originalité de ce projet de doctorat réside en plus dans les hypothèses suivantes :

- 1- il est possible de prédire la texture de la matrice grâce à la mesure de variables non intuitivement identifiées comme facteurs critiques ou paramètres limites.
- 2- il est possible d'estimer de manière fiable ces variables, via l'exploitation de spectres visible et/ou infrarouge acquis en ligne.
- 3- étant donné que de nombreuses réactions de transformation des fruits et légumes déclenchent la libération de composés volatils clés, la mesure en ligne systématique de l'émission des volatils lors des procédés permettra d'identifier des marqueurs d'une texture cible.
- 4- il est possible, malgré la variation des temps de rétention, d'analyser un chromatogramme complet sans *a priori*, à la manière des approches d'analyses spectrales usuelles [25].

Matériel nécessaire et méthodes envisagées

Le travail de thèse s'appuie sur un robot cuiseur instrumenté dont la mise au point a été réalisée dans le cadre d'un projet de ressourcement Qualimet (Transquapil). Ce robot permet :

- d'appliquer des recettes normées et reproductibles sur des batches d'environ 3 kg de fruits/légumes, en contrôlant précisément et de manière dynamique les conditions de température/pression/vitesse de broyage. Il est ainsi possible d'appliquer des plans d'expériences maîtrisés sur une variabilité de matrices et de procédés.
- de mesurer en ligne, des spectres dans le visible et le proche infrarouge, et l'émission de composés volatils, tout en permettant un prélèvement des échantillons en cours de procédé, en vue de les analyser par des méthodes classiques de laboratoire (courbe d'écoulement, teneur en matière sèche, teneur en solides solubles, pH, acidité titrable).

Le robot est opérationnel, mais le dispositif pourra être amélioré sur le plan technique pour consolider la fiabilité des mesures. La mesure des volatils, notamment, pourra être optimisée pour mieux quantifier les transferts de matières des composés organiques volatils émis.

Les méthodes envisagées consistent tout d'abord à s'appuyer sur la forte variabilité d'une matrice modèle (pommes issues de l'agriculture biologique) sous la forme de différentes variétés et différents procédés de transformation. Les différentes combinaisons « matière première-procédé » seront explorées par la mesure en ligne (spectres visible/infrarouge, piégeage dynamique des arômes et/ou détection par le capteur Aryballe NeOse), et des mesures contrôles sur les échantillons prélevés en cours de procédé.

Une caractérisation sensorielle sera réalisée (en prestation de service) sur une sélection des produits finis, afin d'évaluer la représentativité des données mesurées en termes de qualités organoleptiques perçues par un panel entraîné.

L'ensemble de ces données sera ensuite analysé via des méthodes avec *a priori* (suivi de molécules et longueurs d'ondes d'intérêt) et sans *a priori* (analyse des spectres et chromatogrammes complets), afin d'identifier et si possible quantifier les variables pertinentes pour décrire les mécanismes d'évolution de la qualité du produit transformé.

Ces mécanismes seront modélisés par des approches déterministes et/ou statistiques. Des algorithmes de type "machine learning" seront appliqués pour optimiser un modèle global de procédé voire de l'ensemble de la chaîne, en intégrant les descripteurs sensoriels.

Programme de recherches

Nous proposons de travailler sur la pomme issue de l'agriculture biologique comme matrice principale, présentant une grande diversité en termes de variétés, et une variabilité accrue par rapport à l'agriculture conventionnelle. Les résultats obtenus sur la pomme pourront être validés sur une autre matrice (poire) pour évaluer le niveau de généralité des modèles et prédictions.

Le travail de thèse est planifié en trois phases :

Phase 1 : Acquisition des données multiples sur des purées produites à partir de différentes variétés et suivant différents procédés de transformation (temps, température, pression et vitesse de broyage)

Phase 2 : Mise en œuvre de deux approches d'apprentissage : avec et sans *a priori*. Développement de modèles statistiques, mécanistiques et/ou hybrides.

Phase 3 : Modélisation pour prédire les caractéristiques et propriétés organoleptiques finales des purées en utilisant les données acquises au cours des procédés, en vue de proposer un outil d'aide à la décision pour piloter le procédé voire l'itinéraire de conception de produits à partir de la matière première.

Calendrier

| | Année 1 | | | | Année 2 | | | | Année 3 | | | |
|---|---------|--|--|--|---------|--|--|--|---------|--|--|--|
| Bibliographie | | | | | | | | | | | | |
| Procédés et mesures en ligne | | | | | | | | | | | | |
| Analyses sensorielles | | | | | | | | | | | | |
| Traitement des données | | | | | | | | | | | | |
| Valorisations (articles, présentations, manuscrit de thèse) | | | | | | | | | | | | |
| Modélisation | | | | | | | | | | | | |

Publications envisageables

Tous les résultats obtenus pourront être valorisés et seront proposés pour publication dans des revues de rang A (Food Chemistry, Food Control, Journal of Food Engineering) et des présentations dans des conférences internationales (F&V Processing, ICNIRS, EFFOST/IUFOST,...).

Compétences cognitives et techniques acquises par le doctorant

Génie des procédés ; Analyse organoleptique et sensorielle des produits de F&L ; Mesures en ligne (spectroscopie, piégeage dynamique et détection des arômes dans l'espace de tête) ; Chimiométrie ; Modélisation statistique et mécanistique (transferts et échanges de matière).

Références bibliographiques

1. Barrett D.M., E. Garcia and J.E. Wayne. 1998. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 38(3), 173-258.
2. Varela P., A. Salvador, and S. Fiszman, 2007. Journal of Food Engineering, 78(2), 622-629.
3. Athiphunamphai N., et al. 2014. Journal of Food Engineering, 136, 19-27.
4. Nicolas J. and J. Potus. 1994. Sciences Des Aliments, 14(5), 627-642.
5. Leone, A., et al., 2006. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 54(18), 6835-6844.
6. Birtic, S., et al., 2009. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 57(2), 591-598.
7. Guichard, E., et al., 1991. Journal of Food Science, 56(6), 1621-1627.
8. Druaux, C. and A. Voilley, 1997. Trends in Food Science & Technology, 8(11), 364-368.
9. Bureau S., Cozzolino D., Clark C.J. 2019. Postharvest Biology and Technology 148, 1-14.
10. Lan W., Renard C.M.G.C., Jaillais B., Leca A., Bureau S. 2020. Food Chemistry 330, 127357.
11. Bureau S., Vilas-Boas A., Giovinazzo R., Page D. 2020. LWT - Food Science and Technology 130, 109518.
12. Lan W., Jaillais B., Leca A., Renard C.M.G.C., Bureau S. 2020. Food Chemistry 310, 125944.
13. Mouret, J.R., et al., Food Research International, 2014. 62: p. 1-10.
14. Delarue, J., et al. 2003. Flavour Research at the Dawn of the Twenty-First Century, ed. J.L. LeQuere and P.X. Etievant. 556-559.
15. Maire, M., et al., 2013. Food Chemistry, 141(4), 3510-3518.
16. Xu, K.M., et al., 2017. Journal of Food Engineering, 203, 25-31.
17. Zhu, J., et al., 2017. Food Chemistry, 221, 1484-1490.
18. Catelani, T., et al., 2017. Food and Bioprocess Technology, 10(4), 630-638.
19. Santos, J.R., et al., 2016. Food Control, 60, 408-415.
20. Santos, J.R., et al., 2016, Food Chemistry, 208, 103-110.
21. Herrero-Langreo, A., et al., 2012. Journal of Food Engineering, 108(1), 150-157.
22. Mendoza, F., R.F. Lu, and H.Y. Cen, 2012. Postharvest Biology and Technology, 73, 89-98.
23. Molina-Delgado, D., et al., 2009. Biosystems Engineering, 104(1), 33-
24. Zhang, X., Zhou, T., Zhang, L., Fung, K. Y., & Ng, K. M. 2019. Industrial & Engineering Chemistry Research, 58(36), 16743-16752.
25. Truan, C., Peres, C., & Engel, E. 2020. Flavour and Fragrance Journal, 35(3), 309-319.