

Associer blé et légumineuses, du champ aux gâteaux moelleux : variabilité matières premières / modification des procédés / ingénierie reverse

Anne-Flore Monnet, Marie Hélène Jeuffroy, David Blumenthal, Camille Michon

► **To cite this version:**

Anne-Flore Monnet, Marie Hélène Jeuffroy, David Blumenthal, Camille Michon. Associer blé et légumineuses, du champ aux gâteaux moelleux : variabilité matières premières / modification des procédés / ingénierie reverse. Innovations Agronomiques, INRAE, 2019, 78, pp.107-116. hal-02915111

HAL Id: hal-02915111

<https://hal.inrae.fr/hal-02915111>

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.



Associer blé et légumineuses, du champ aux gâteaux moelleux : variabilité matières premières / modification des procédés / ingénierie reverse

Monnet A.-F.¹, Jeuffroy M.-H.², Blumenthal D.¹, Michon C.¹

¹ Ingénierie Procédés Aliments, AgroParisTech, INRA, Université Paris-Saclay, F-91300, Massy

² UMR Agronomie, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, F-78850, Thiverval-Grignon

Correspondance : camille.michon@inra.fr

Résumé

L'association céréale-légumineuse présente des avantages aux niveaux agronomique (moins d'engrais et de pesticides, productivité accrue) et nutritionnel (profil protéique plus équilibré que la céréale seule). Pour limiter la consommation énergétique au long de la filière, il peut même être intéressant de récolter et transformer en farine les deux types de graines ensemble. Néanmoins, semer, conduire au champ, transformer en farine sans jamais séparer blé et légumineuse conduit à une grande variation de la composition des farines mixtes qu'il faut être capable de gérer pour produire des gâteaux moelleux de qualité constante. Dans le projet FlexiProcess, nous avons étudié la façon dont le gâteau se structure tout au long du procédé de fabrication et analysé l'impact de caractéristiques de farines mélangées pois-blé (granulométrie de la farine, proportion légumineuse/céréale) sur le moelleux des gâteaux et sur la structure alvéolaire de la mie. Un modèle multicritère et multi-contraintes a été développé. Il permet de corriger les variations de qualité des gâteaux induites par une variation de caractéristiques de farine en modifiant les paramètres de mélange des ingrédients et de cuisson au four.

Mots-clés : Cake, Physico-chimie, Qualité, Modèle, Durabilité, Filière

Abstract: Combine wheat and legumes, from the field to soft cakes: raw material variability / process modification / reverse engineering

The cereal-legume combination has agronomic (less fertilizer and pesticide, increased productivity) and nutritional (protein profile more balanced than cereal only) benefits. To limit the energy consumption all along the sector, it can even be interesting to harvest and transform into flour the two types of seeds together. However, sowing, leading to the field and turning into flour without ever-separating wheat and legume leads to a large variation in the composition of mixed flours that must be managed to produce soft cakes of consistent quality. In the FlexiProcess project, we studied how the cake structure itself throughout the manufacturing process. We also analyzed the impact of mixed pea-wheat flour characteristics (grain size, legume / cereal proportion) on the cake softness and on the cellular structure of the crumb. A multicriterion and multi-stress model was developed. It makes it possible to correct variations in the quality of the cakes induced by a variation in flour characteristics by modifying the mixing parameters of the ingredients and baking.

Keywords: Cake, Physico-chemistry, Quality, Model, Sustainability, Sector

1. Contexte général

1.1 Les challenges actuels

Les challenges auxquels nous sommes confrontés actuellement sont d'assurer à la population une alimentation répondant à ses besoins quantitatifs et qualitatifs tout en préservant la durabilité du système alimentaire dans sa globalité. Alors que la demande mondiale en protéines animales ne fait qu'augmenter malgré les externalités négatives de l'élevage intensif (Millenium Ecosystem Assessment, 2005 ; Gerber et al., 2013) l'enjeu est de pousser la population à s'en tenir à un apport conseillé de 0,8 g/kg/jour d'apport conseillé (FAO, 2007) (au lieu de 1,3 g en moyenne actuellement en France (AFSSA, 2007)) mais également d'augmenter la part des protéines végétales.

Dans le même temps les études sur la qualité nutritionnelle des protéines ont montré qu'en terme de composition en acides aminés indispensables par rapport aux besoins, les protéines végétales sont moins performantes que les protéines animales mais qu'il est possible de recréer des profils relativement équilibrés en associant des protéines de différentes origines. Ainsi céréales et légumineuses ont des profils en acides aminés complémentaires (Young et Pellet, 1994). Il peut donc être intéressant de remplacer une partie de la farine de blé par de la farine de légumineuses dans des produits à base de céréale et de grande consommation.

1.2 Durabilité de la filière blé

La filière blé classique comporte un certain nombre d'étapes clés : la sélection génétique, la production au champ, le tri des graines, la 1^{ère} transformation qui consiste à réduire la taille des grains, la deuxième transformation qui permet la fabrication de produits, et enfin la consommation qui conduit l'utilisation du produit par l'organisme avec un impact potentiel sur la santé des consommateurs puisque les protéines de blé sont particulièrement carencées en lysine (Young et Pellet, 1994). L'étape de production au champ est impactée par les intrants de synthèse tout particulièrement à travers la fertilisation azotée. Toutes les étapes de la production au champ à la deuxième transformation sont consommatrices d'énergie. Enfin, aujourd'hui, la maîtrise de la qualité des produits finis passe généralement par une standardisation de la farine par mélange afin de poursuivre la filière en fixant le procédé de deuxième transformation.

Du fait du changement climatique et de l'évolution des modes de culture afin de limiter l'utilisation d'intrants, une plus grande variabilité de la matière première est à prévoir (Rapport du ALIne, 2011) avec le risque de n'être plus en mesure de standardiser la farine suffisamment pour maîtriser la qualité des produits. De plus l'augmentation de la durabilité de la filière blé peut passer par une évolution forte des pratiques agro écologiques avec notamment des techniques de cultures blé-légumineuse associées au champ qui permettent de réduire de façon très sensible les intrants (Voisin, 2014). Néanmoins, pour véritablement améliorer la durabilité de l'ensemble de la filière, réduire l'énergie des étapes de tri, et de première et deuxième transformations est une piste également intéressante.

2. Le projet FlexiProcess

2.1 Contribution à la durabilité des filières blé et légumineuse

Le projet FlexiProcess proposait de développer des produits céréaliers contenant des légumineuses, sensoriellement appréciés et nutritionnellement équilibrés, tout en contribuant à rendre plus durable l'ensemble de la filière céréalière. Plusieurs unités de recherche impliquant notamment l'Inra ont apporté leurs compétences : cultures associées au champ et tri en sortie de champ (UMR Agronomie), 1^{ère} transformation ou fragmentation des graines (UMR IATE), 2^{ème} transformation (UMR GENIAL), perception sensorielle des produits (UMR GENIAL et GMPA) et aspects nutritionnels (UMR GMPA et UNH). Le gâteau moelleux ou cake a été choisi car il s'agit d'un produit de grande consommation,

pouvant ainsi impacter la filière si le principe de mélanger céréale et légumineuse prenait de l'ampleur. Le blé est un des composants classiques des cakes. La légumineuse pois cassé a été choisi car elle est régulièrement utilisée dans des cultures associées aux champs.

2.2 Problématique et stratégie du projet

Il fallait donc trouver le moyen de maîtriser la qualité des cakes enrichis en farine de pois cassé malgré des variations de composition de la matière première. Une approche intégrative a été mise en place avec une stratégie expérimentale développée en trois parties successives. Les connaissances ont d'abord été collectées auprès de experts de l'amont des deux filières et acquises grâce à des expériences permettant d'évaluer l'impact de variations des matières premières et des leviers de procédé sur les propriétés des cakes obtenus. Sur la base de ces résultats, un outil d'aide à la conduite de procédé, intégrant la complexité des effets a été construit afin de maîtriser la qualité des cakes. Enfin, la capacité du modèle ainsi construit à proposer des modifications du procédé pour corriger des variations de matière premières et produire des cakes de qualité constantes a été évaluée.

3. Résultats et discussion

3.1 Aquisition de connaissance

3.1.1 Quelles variations de la matière premières au stade « culture au champs » et 1^{ère} transformation?

Les experts agronomes ont d'entrée souligné le fait que si l'on sait très clairement quelle proportion blé/pois est semée dans une culture associée au champs, les techniques agro-écologiques actuelles ne permettent pas de maîtriser et donc de prédire la proportion blé/pois en sortie de champ (Cholez et Magrini, 2014). Néanmoins, un tri grossier en sortie de champ, qu'il faut toujours faire pour éliminer pierre, paille et autres agents étrangers, permet d'obtenir du blé en proportion de 85 à 95% contenant 5 à 15% de pois et inversement. Trier plus précisément demanderait trop d'énergie et une technologie plus chère. Il est donc intéressant de broyer ensemble les grains de blé et les graines de pois cassé en acceptant une certaine variation de la proportion entre les deux types de graine.

Les deux types de graine ont des formes, taille et dureté différentes. Les broyer ensemble nécessite de choisir une technologie permettant de co-broyer. Les dires d'experts privilégiaient le broyage sur meule de pierre ce qui n'a pas pu être vérifié dans le cadre de ce projet. Aussi, un travail de caractérisation de la variabilité potentielle des deux farines en fonction de l'intensité du broyage a été effectué. Il a montré que les farines de blé et de pois présentaient toutes les deux une fraction grossière et une fraction fine (Figure 1).

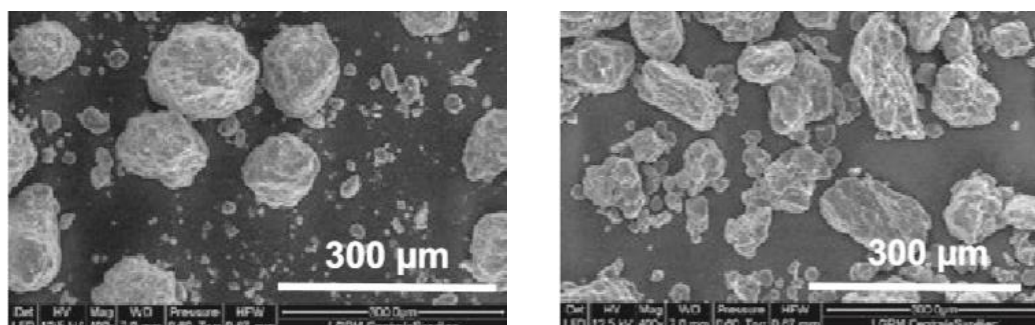


Figure 1 : Fraction grossière et fraction fine d'une farine de pois (gauche) et de blé (droite).

La fraction grossière correspondait majoritairement à une cellule d'albumen pour le blé et deux à trois cellules pour le pois. La fraction fine correspondait majoritairement à un grain d'amidon et des morceaux protéiques pour les deux farines. Ces différentes fractions n'avaient pas le même taux d'amidon endommagé pour le blé et le pois en lien avec des duretés de graine différentes, avec un impact sur les équilibres hydriques entre les composés lors de la formation des pâtes. Ces essais ont donc permis d'identifier une deuxième source de variation de la qualité de la matière première : la granulométrie des farines de blé et de pois (Figure 2).

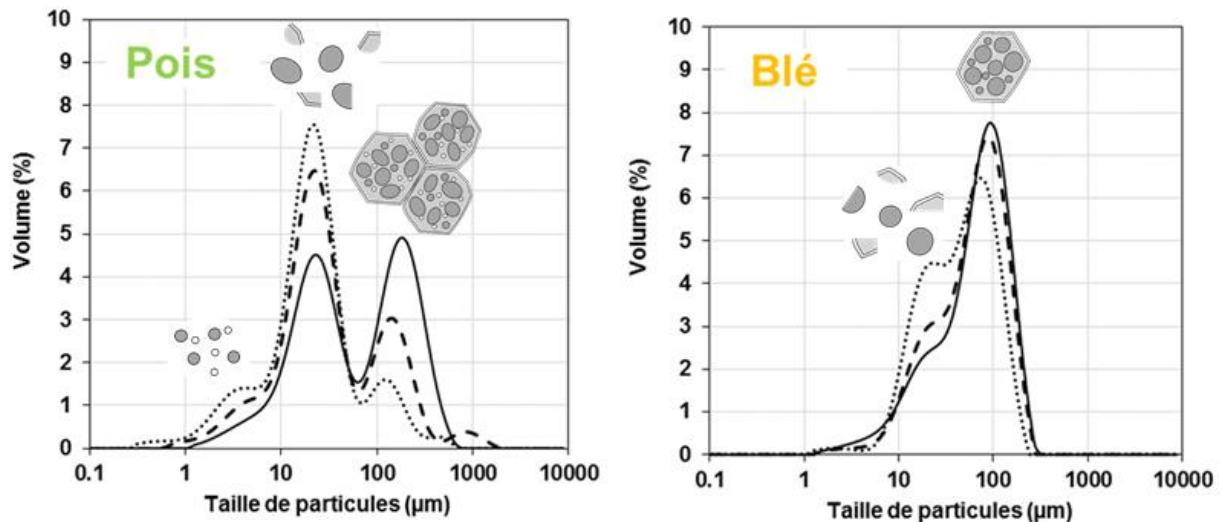


Figure 2 : Evolution des profils granulométriques de farines de pois et de blé obtenus après rebroyage (0, 3 et 9 min respectivement pour les traits continue, pointillés longs et pointillés courts), d'après Monnet et al., 2019a.

3.1.2 Quels leviers procédés ?

En passant en revue les compositions et mises en œuvre des ingrédients des cakes existant tant au plan domestique qu'industriel, un certain nombre de leviers procédés ont été identifiés pour les phases de formation de la pâte puis de cuisson et ont été testés. La pâte est formée dans un batteur Kitchen Aid équipé d'une feuille. Les paramètres importants sont : l'ordre d'incorporation de la phase aqueuse (œuf) et de la phase grasse (huile), la vitesse et la durée de mélange de la phase aqueuse, la vitesse et la durée de mélange de la phase grasse. Lors de la cuisson, la température du four a également été identifiée comme impactant fortement le cake.

3.1.3 Quelles caractéristiques cibles ?

En faisant varier les paramètres de composition de la farine et les leviers de procédés des cakes assez différents ont été obtenus ce qui a permis de définir toutes les caractéristiques intéressantes à mesurer. Pour des questions de temps, et de capacité à s'assurer d'une quantification des différences, ces mesures instrumentales ont été préférées à ce stade à des mesures sensorielles.

La masse volumique et l'indice de symétrie ont été mesurés grâce à un scanner laser (VolScan Profiler, StableMicro Systems, Surrey, UK). La fermeté de la mie a été évaluée à l'aide d'un Texturomètre (TAHD, Stable Micro Systems, Surrey, UK). Une méthode d'analyse d'image décrite dans Dewaest *et al.* (2017) a été utilisée pour déterminer la taille des alvéoles et les épaisseurs de parois. La couleur de la mie a systématiquement été caractérisée à travers les paramètres LAB mesurés à l'aide d'un spectrophotomètre (Spectro-guide 6834, BYK-Chemie GmbH, Wesel, Germany).

Afin de s'assurer que les grandeurs mesurées à l'aide de méthodes instrumentales étaient bien perceptibles au plan sensoriel, une analyse descriptive quantitative a également été réalisée, avec à la clé la mise en place de termes descriptifs partagés entre les panélistes assortis de leur méthode

d'évaluation et des références. 11 panélistes ont été recrutés, ils ont généré 16 descripteurs sensoriels (aspect, texture, saveur et arômes) qui ont été utilisés décrire les 12 produits choisis pour leur représentativité de l'espace produit exploré.

3.2. Construction de l'outil d'aide à la conduite du procédé

3.2.1. Définition d'un plan d'expérience optimal

En prenant en compte l'ensemble des paramètres sur les matières premières et les leviers procédés listés ci-dessus, le plan factoriel complet à trois niveaux proposait 19683 expériences pour couvrir toutes les modalités. A raison de 7 essais par jours, il aurait fallu près de 13 ans pour réaliser tous les essais prévus !!! Les variables de procédé les plus influentes ont donc été sélectionnées (Monnet 2018 ; Monnet et al., 2019c) et un plan d'expérience optimal a été élaboré à l'aide du logiciel Jump (JMP software version 13.1.0, SAS Institute Inc., Cary, SC, USA). Il comportait 56 essais réalisables en 8 jours.

3.2.2. Classement des 23 effets du modèle multicritère multi-contraintes

A partir des résultats des 56 essais, un modèle multicritère multi-contraintes a été conçu pour modéliser et maîtriser l'effet des 7 facteurs (taux de mélange blé/pois, pourcentage de fraction fine de blé, pourcentage de fraction fine de pois, vitesse de mélange des phases aqueuses, vitesse de mélange de l'huile, durée de mélange de l'huile, température de cuisson) sur 6 propriétés physiques des cakes (masse volumique, symétrie, fermeté de la mie, couleur de la mie, finesse de la mie, épaisseur des parois alvéolaires).

La Figure 3 présente les 23 effets pris en compte dans le modèle multicritère multi-contraintes par ordre décroissant de significativité. Les cinq effets les plus importants sont notés en noir. Deux d'entre eux sont liés à la qualité de la matière première et correspondent donc à une variabilité potentiellement subie. Les trois autres effets sont liés à des paramètres de procédé : température de cuisson, vitesse de mélange de la phase grasse et durée de ce mélange. Ce sont des paramètres maîtrisables qui peuvent servir à corriger les effets de la variabilité de la matière première.

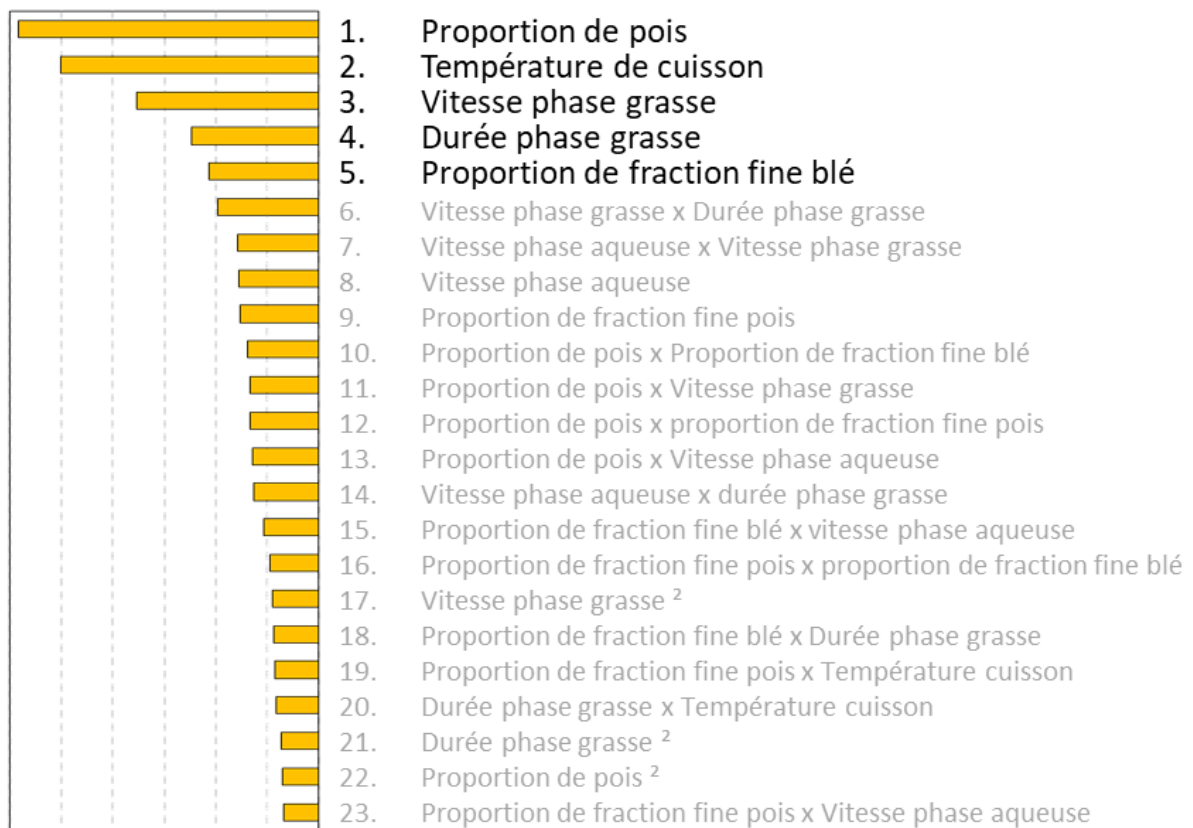


Figure 3 : Classement des 23 effets du modèle multicritères et multi-contraintes classés par significativité décroissante.

3.3 Application du modèle et vérification de son efficacité

3.3.1. Vérification de l'efficacité du modèle pour corriger une variation de la composition de la farine

Afin de vérifier la capacité du modèle multicritère multi-contraintes ainsi obtenu à corriger des variations de matière première entrante, deux cas d'école ont été testés. Le premier reposait sur l'hypothèse d'un industriel souhaitant remplacer 35% de la farine de blé par de la farine de pois cassé dans la recette d'un cake dont il souhaite modifier le moins possible les apparences. Cette proportion de 35% de farine de pois permet d'optimiser le profil en acide aminé de la farine et ainsi d'améliorer le cake au plan nutritionnel. Le deuxième reposait sur l'hypothèse d'une variation importante de la granulométrie des farines et donc de la proportion fraction fine / fraction grossière.

Pour mener à bien le premier cas d'école, trois cakes ont été fabriqués en duplicat : un cake « 100% blé » fabriqué en suivant le procédé et la recette de référence, un cake « 35% pois » (65% blé-35% pois) fabriqués à iso-procédé par rapport au cake 100% blé et un cake « 35% pois corrigé » (65% blé-35% pois) fabriqués à l'aide de paramètres de procédés proposés par le modèle multicritère et multiconcrètes en ayant pour cible les caractéristiques du cake 100% blé. Ainsi dans ce dernier cas la vitesse de mélange des phases aqueuses a été passée de 4 à 8 (numérotation KitchenAid), le temps de mélange de l'huile a été de 5 min (au lieu de 1 min) et la température du four a été fixée à 180°C au lieu de 179°C, le temps de cuisson changeant en conséquence pour obtenir la même Aw finale du produit. La Figure 4 montre l'aspect des tranches et un zoom sur les mies des 3 cakes obtenu dans le 1^{er} cas d'école. L'ajustement des paramètres de procédé corrige manifestement certains effets du changement de composition de la farine : mie plus fine et moins verte, gâteau moins bombé (Figure 3). Les valeurs de caractérisation instrumentales reportées dans le Tableau 1 montrent que le modèle

corrige toutes les caractéristiques des cakes sauf une : la masse volumique qui varie globalement peu entre les 3 cakes. La rigidité de la mie et la clarté sont très bien corrigées (valeurs en gras dans le Tableau 1). L'indice de symétrie et la structure de la mie sont « sur-correctés » (valeur en italique dans le Tableau 1).

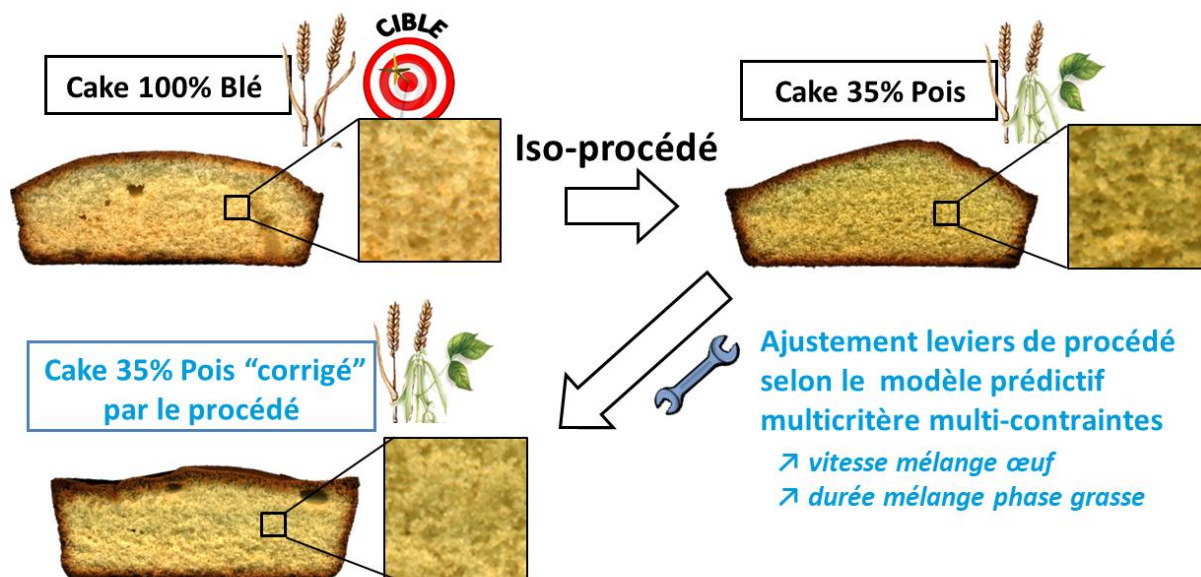


Figure 4 : Illustration de l'ajustement leviers de procédés permettant de corriger les effets d'une substitution de 35% de la farine de blé par de la farine de pois.

Tableau 1 : Caractéristiques des cakes 100% blé, 65% blé-35% pois fabriqués à iso-procédé par rapport au cake 100% blé (« 35% pois ») et 65% blé-35% pois fabriqués à l'aide de paramètres de procédés proposés par le modèle multicritère et multiconcrètes en ayant pour cible les caractéristiques du cake 100% blé (« 35% pois corrigé »).

	MASSE VOLUMIQUE (G.CM ⁻³)	INDICE DE SYMÉTRIE (-)	RIGIDITE (KPA)	FINESSE D'ALVEOLES	EPAISSEUR DE PAROIS	CLARTE L*
100% BLE	0,39	<u>6,7</u>	25	<u>-0,2</u>	<u>0,9</u>	84,6
35% POIS	0,39	7,5	37	-4,8	1,2	79,6
35% POIS CORRIGE	0,43	<u>5,4</u>	28	<u>3,7</u>	<u>-2,4</u>	83,2

Dans le deuxième cas d'école, la proportion de la fraction fine dans la farine de pois a été augmentée passant de 50% à 100% dans un gâteau contenant 35% de farine de pois et produit en utilisant le procédé de référence (Cake « 100% fine »). Le cake de référence contenait 35% de farine de pois (50% fraction fine et 50% fraction grossière (Cake « 50% fine »). Le cake « corrigé » contenait 100% de fraction fine de farine de pois et était fabriqué à l'aide d'un procédé corrigé grâce au modèle : diminution de la vitesse de mélange des phases aqueuses de 4 à 1, augmentation de la vitesse du mélange de l'huile de 1 à 2 et une diminution de la température de cuisson de 180 ° C à 165 ° C. Dans ce deuxième cas, l'aspect visuel des structures alvéolaires des mies était à nouveau bien corrigé. Les différences des caractéristiques mesurées instrumentalement pour les trois types de cake étaient moins importantes et, en conséquence, du même ordre de grandeur que les écarts observés entre des cakes 50% fine « référence » préparés à 6 mois d'intervalle. Ce résultat a montré que les corrections

apportées grâce à la modification du procédé étaient réelles mais qu'une variation de la proportion en fraction fine, même si elle était poussée à son maximum, engendrait des modifications relativement faibles au regard de celles dues à des variations saisonnières (température ambiante, évolution de la farine). En tout état de cause, les ajustements de procédé, nécessaires pour cette correction, allaient dans le sens d'une économie d'énergie, notamment grâce à une réduction importante des températures de cuisson.

3.3.2. La correction est-elle perçue sensoriellement ?

A partir de ces résultats, la question de la capacité du consommateur à percevoir des changements de caractéristiques des cakes mesurées instrumentalement s'est logiquement posée. L'analyse descriptive quantitative mise en place a permis de montrer qu'à travers les descripteurs « fermeté au toucher » et « fermeté en bouche » le panel était en capacité de classer les produits dans le même ordre que celui issu des mesures instrumentales. De même des classements équivalents ont été obtenus pour le descripteur « couleur de mie » et pour la clarté mesurée instrumentalement (L*).

Le test sensoriel a permis également de mettre en évidence que l'arôme caractéristique du pois et une sensation asséchante était très clairement perçue pour les cakes contenant 35% de farine de pois. L'ensemble de l'étude a été réalisée sans travail particulier sur les arômes, l'équipe projet considérant que ces aspects organoleptiques particuliers pouvaient être travaillés par ailleurs indépendamment de maîtrise de la structure et la texture.

3. Conclusion générale : vers l'ingénierie réverse

Un modèle multicritère et multi-contraintes a été conçu pour modéliser et maîtriser l'effet de 7 facteurs sur 6 propriétés physiques des cakes. Cette démarche est originale puisqu'à notre connaissance la correction des effets d'une variation de la qualité des matières premières par les paramètres de procédé n'a jamais été réalisée en construisant ainsi un plan d'expériences avec une sélection des paramètres en amont.

Le modèle multicritère multi-contraintes a été validé pour sa capacité de prévision utilisé dans le cadre de deux scénarii d'optimisation. Ces scénarii ont montré que le modèle était capable de corriger une dégradation de la qualité des cakes lorsque celle-ci excédait les différences de propriétés liées à la répétabilité de fabrication. La réalisation d'un panel sensoriel par analyse descriptive quantitative a permis de mettre en lumière des convergences entre les variations instrumentales et les perceptions sur certaines dimensions même si les corrélations entre certaines « propriétés physiques » - et certains attributs sensoriels pris deux à deux ne sont pas linéaires et simples. Nous avons ainsi démontré qu'il est possible de se doter d'outils d'aide à la conduite de procédé permettant la maîtrise de la qualité des produits finis tout en ayant une plus grande variabilité de la matière première entrante.

Au-delà du développement de l'outil d'aide à la conduite de procédé, le projet FlexiProcess a généré des connaissances qui peuvent être utilisées au profit de l'ensemble des filières blé et pois dans une logique d'ingénierie reverse. Nous pouvons ainsi formuler les conclusions et recommandations suivantes pour les différentes étapes de la filière (Figure 5) :

- 1) Pour faciliter la valorisation des cultures associées en limitant le tri des graines en sortie de champ grâce à de la **co-fragmentation**, il y a intérêt à **diminuer le différentiel de dureté entre les graines de blé tendre et de légumineuse**. La sélection génétique pourrait donc travailler à augmenter la dureté intrinsèque des graines de légumineuse ou à diminuer la durée de leur cycle cultural. En effet la légumineuse arrive généralement à maturité et à dureté maximale avant le blé. Plus tôt elle est récoltée, plus la dureté du blé qui l'accompagne sera faible. En conséquence, il y a intérêt à récolter l'association plutôt à maturité du pois (alors que généralement c'est la maturité du

blé qui est privilégiée pour optimiser le remplissage des grains de blé en protéines). Par ailleurs, il est déconseillé de faire un apport de fertilisation azotée tardif qui accélère le remplissage des grains de blé et augmente leur dureté. Enfin, il faudrait étudier les différentes modalités de co-fragmentation, leur faisabilité et leurs impacts sur les propriétés des farines mixtes produites même si nous avons démontré la faisabilité d'une maîtrise de la qualité par ajustement du procédé de la seconde transformation.

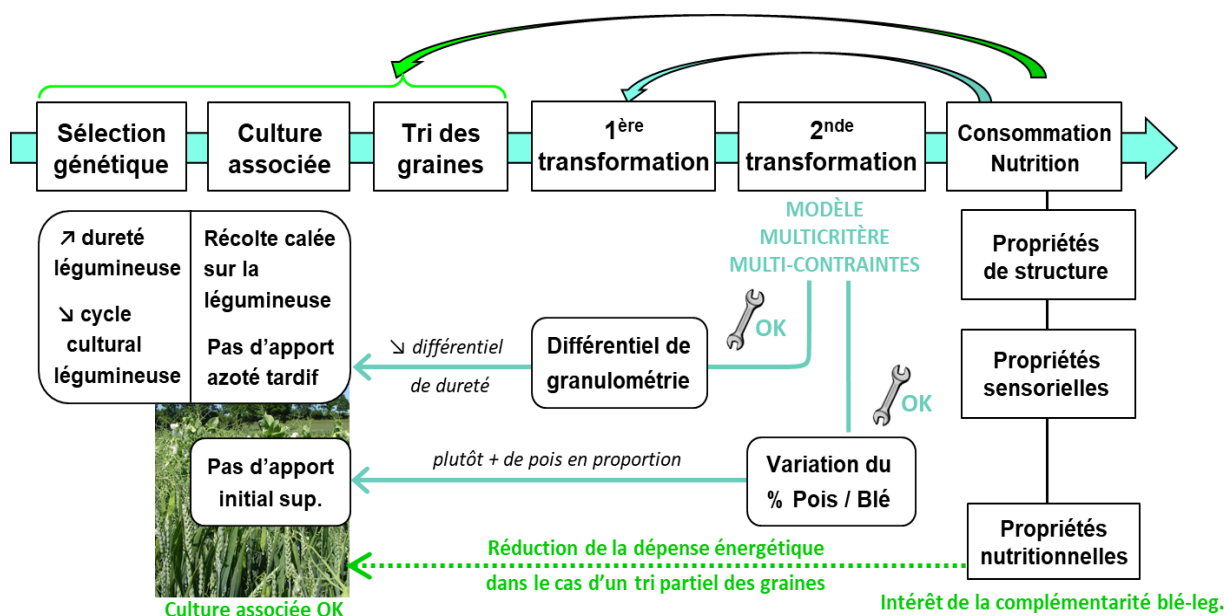


Figure 5 : Recommandations à l'amont des filières blé et légumineuse proposées à l'issue du projet FlexiProcess

- En terme de gestion de la **variabilité de la proportion pois/blé** sur l'ensemble de la chaîne, mieux vaut privilégier les conditions qui maximisent la proportion de pois afin de permettre à l'industrie de seconde transformation d'optimiser les propriétés des produits. Ce choix a par ailleurs le mérite de permettre une valorisation d'une quantité importante de pois hors les filières légumineuses cherchant à augmenter leurs débouchés. Concrètement, au niveau des pratiques culturales, cela signifie qu'il est préférable de ne pas faire d'apport azoté excédentaire en début de culture.
- Un point sensible pour la mise en place de toute filière de cultures associées, quel que soit le niveau de tri, concerne la **rémunération des agriculteurs**. En effet dans le mode de fonctionnement habituel, un taux d'impuretés (cailloux, débris végétaux ou graines d'autres espèces) supérieur à 2% constitue un facteur de dévalorisation économique pour le lot de graines pour lequel l'agriculteur voit sa rémunération diminuer. Pour les filières de cultures associées, c'est donc un tout nouveau système de rémunération, de valorisation et de stockage qu'il faut inventer et qui puisse rentrer dans les standards légaux.

Remerciements

Les auteurs remercient le Carnot Qualiment, AgroParisTech et le Ministère français de l'Enseignement supérieur et de la Recherche pour leur soutien financier.

Références bibliographiques

- AFSSA, 2007. Apport en protéines: consommation, qualité, besoins et recommandations. Agence française de sécurité sanitaire des aliments. Paris, France, 461 p.
- Cholez C., Magrini M.-B., 2014. Cultiver des légumineuses à graines en pure ou en association avec des céréales : points de vue d'acteurs du système sociotechnique agricole. *Innovations Agronomiques* 40, 45–63.
- Dewaest M., Villemejeane C., Berland S., Neron S., Clement J., Verel A., Michon C., 2017. Effect of crumb cellular structure characterized by image analysis on cake softness. *Journal of Texture Studies*, 49, 328–338.
- Esnouf C., Russel M., Bricas N., 2011. DuALIne – Durabilité de l'alimentation face à de nouveaux enjeux. Questions à la recherche. Rapport Inra-Cirad (France), 236 p. http://www.inra.fr/l_institut/prospective/rapport_dualine.
- Monnet A.-F., 2018. Optimisation de la transformation de matières premières issues de cultures associées légumineuse – blé tendre par une bonne connaissance de la physico-chimie des ingrédients et du procédé de fabrication. Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay, Massy, France, 377 p.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2007. Conceptual framework for estimating protein and amino acid requirements. In *Protein and amino acid requirements in human nutrition: report of a joint WHO/FAO/UNU expert consultation (Food and A, pp.)*. Genève: United Nations University, p. 9–34.
- Gerber P. J., Steinfeld H., Henderson B., Mottet A., Opio C., Dijkman J., Tempio G., 2013. The aggregate picture. In FAO (Ed.), *Tackling climate change through livestock - a global assessment of emissions and mitigation opportunities*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). p. 15–22.
- Millenium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-being : General Synthesis*. (World Resources Institute, Ed.). Washington, DC, USA: Island Press. 137 p.
- Monnet A.-F., Eurieult A., Berland S., Jeuffroy M.-H., Michon C., 2019a. Effect of grinding on the proportion of damaged starch and on particle size distribution of legume and wheat flours. *Cereal Chemistry* 96, 465–477.
- Monnet A.-F., Laleg K., Michon C., Micard V., 2019b. Legume-enriched cereal products: A generic approach derived from material science to predict their structuring by the process and their final properties. *Trends in Food Science and Technology* 86, 131–143.
- Monnet A.-F., Michon C., Jeuffroy M.-H., Blumenthal D., 2019c. Taking into account downstream variability of flours with processing variables in legume-enriched soft cakes: conception of a multiobjective model for the monitoring of physical properties. *Food and Bioprocess Technology* 12, 625–635.
- Voisin A.-S., Guéguen J., Huyghe C., Jeuffroy M.-H., Magrini M.-B., Meynard J.-M., Pelzer E., 2014. Legumes for feed, food, biomaterials and bioenergy in Europe: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 361–380.
- Young V.-R., Pellett, P.-L., 1994. Plant proteins in relation to human protein and amino acid nutrition. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 59, 1203S–1212S.

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 ou DOI).