

VetAgro Sup

Mémoire de fin d'études d'ingénieur

Mise en place d'un protocole caractérisant l'aptitude technologique des légumes secs (lentilles, haricots blancs, haricots rouges) et permettant l'agrégage des lots à réception.

Alixia Rustici

Option ALIME

2014

CONFIDENTIEL

VetAgro Sup

Mémoire de fin d'études d'ingénieur

Mise en place d'un protocole caractérisant l'aptitude technologique des légumes secs (lentilles, haricots blancs, haricots rouges) et permettant l'agrégage des lots à réception.

Alixia Rustici

Option ALIME

2014

CONFIDENTIEL

Maître de stage : Vincent BESSE – Chargé développement produit

Tuteur de stage : Julie MARDON

Note de confidentialité

La diffusion de ce document est limitée aux responsables du stage. Sa consultation par d'autres personnes est soumise à l'autorisation de l'entreprise Raynal et Roquelaure.

L'étudiant conserve la qualité d'auteur ou d'inventeur au regard des dispositions du code de la propriété intellectuelle pour le contenu de son mémoire et assume l'intégralité de sa responsabilité civile, administrative et/ou pénale en cas de plagiat ou de toute autre faute administrative, civile ou pénale. Il ne saurait, en cas, seul ou avec des tiers, appeler en garantie VetAgro Sup.

Remerciements

Je remercie Mme Mardon, maître de conférences à VetAgro Sup, ma tutrice de stage, pour l'aide et les conseils concernant l'étude de ce mémoire, qu'elle m'a apporté lors des différents suivis.

Je tiens à remercier tout particulièrement et à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes pour l'expérience enrichissante et pleine d'intérêt qu'elles m'ont fait vivre durant ces 6 mois au sein de Raynal et Roquelaure :

M. Besse, chargé de développement produit, mon maître de stage, pour m'avoir accordé toute sa confiance, pour le temps qu'il m'a consacré tout au long de cette période et répondant à toutes mes interrogations, sans oublier sa participation au cheminement de ce mémoire.

M. Loubet, responsable R&D, pour la confiance qu'il m'a accordée et sa participation à l'aboutissement de ce mémoire.

Mme Fosseux, Mme Meurgue et Mme Ville, pour leur aide précieuse lors de la réalisation des essais au laboratoire.

L'ensemble du personnel de Raynal et Roquelaure pour leur accueil chaleureux et leur coopération professionnelle pendant ces 6 mois.

Table des matières

Introduction.....	- 1 -
I. Raynal & Roquelaure : une conserverie depuis 1876.....	- 2 -
A. Historique.....	- 2 -
B. Organisation du groupe.....	- 2 -
1. Le siège social R&R : le site de Capdenac	- 2 -
2. Sainte Livrade et Camaret : deux sites spécialisés.....	- 3 -
C. Une gamme de produits toujours plus innovante.....	- 3 -
D. Etat des lieux sur la qualité des légumes secs	- 4 -
E. Les enjeux liés à la mise en place d'une méthode de caractérisation des légumes secs	- 5 -
II. Etude bibliographique	- 6 -
A. Les légumes secs de l'étude : lentilles, haricots rouges et haricots blancs	- 6 -
1. Morphologie du grain.....	- 6 -
2. Propriétés biochimiques et physico-chimiques du grain.....	- 7 -
B. Comportement des légumes secs au cours du procédé d'appertisation	- 9 -
1. Réception et stockage des matières premières	- 9 -
2. Trempage	- 10 -
3. Blanchiment	- 11 -
4. Appertisation.....	- 12 -
5. Principaux défauts de qualité des produits finis.....	- 12 -
III. Evaluation du test rapide de caractérisation des légumes secs à réception.....	- 13 -
A. Application du protocole du CTCPA.....	- 13 -
1. Présentation de l'étude du CTCPA	- 13 -
2. Conditions de réalisation des essais	- 14 -
3. Echantillonnage.....	- 15 -
4. Réalisation des essais en autocuiseur.....	- 15 -
a) Test en autocuiseur.....	- 15 -
b) Evaluation du taux de casse	- 15 -
c) Mesure de la conductivité	- 15 -
5. Réalisation des essais en stérilisateur.....	- 16 -
a) Test en autoclave.....	- 16 -
b) Mesure du taux de casse.....	- 16 -
6. Etablissement des modèles statistiques.....	- 16 -
B. Tests/mesures complémentaires au protocole du CTCPA.....	- 17 -
1. Le calibre.....	- 17 -
2. Le rendement.....	- 17 -
3. La capacité d'hydratation.....	- 17 -

4.	La mesure de dureté	- 18 -
5.	Détermination du taux de casse cible acceptable	- 18 -
C.	Résultats et discussions des expérimentations	- 18 -
1.	Les lentilles	- 18 -
a)	Caractérisation en autocuiseur et après cycle complet de fabrication	- 18 -
b)	Evaluation du modèle.....	- 19 -
c)	Etude des corrélations	- 20 -
2.	Les haricots rouges.....	- 21 -
a)	Caractérisation en autocuiseur et après cycle complet de fabrication	- 21 -
b)	Evaluation du modèle.....	- 22 -
c)	Etude des corrélations	- 23 -
3.	Les haricots GN	- 24 -
a)	Caractérisation en autocuiseur et après cycle complet de fabrication	- 24 -
b)	Evaluation du modèle.....	- 25 -
c)	Etude des corrélations	- 25 -
4.	Les haricots lingots	- 26 -
a)	Caractérisation en autocuiseur et après cycle complet de fabrication	- 26 -
b)	Evaluation du modèle.....	- 27 -
c)	Etude des corrélations	- 27 -
5.	Discussions sur l'ensemble des légumes secs testés.....	- 28 -
IV.	Les perspectives de l'étude	- 30 -
A.	Poursuite et approfondissement de l'étude	- 30 -
1.	Réévaluation des modèles des différents légumes secs	- 30 -
a)	Modèle sur les lentilles	- 30 -
b)	Modèle sur les haricots rouges.....	- 31 -
c)	Modèles sur les haricots GN	- 31 -
d)	Modèle sur les haricots lingots.....	- 31 -
2.	Etablissement d'un autre modèle pour les GN.....	- 32 -
3.	Etude de la relation mise en évidence sur les haricots rouges	- 32 -
B.	Pistes d'amélioration de la qualité par pilotage du procédé.....	- 33 -
1.	Etude de l'influence du trempage sur les lentilles	- 33 -
2.	Essais de pilotage de la consigne d'emboitage	- 33 -
3.	Autres pistes de pilotage	- 34 -
	Conclusion	- 35 -

Table des figures

Figure 1 : Evolution mondiale de la production et de la consommation des légumineuses	- 1 -
Figure 2 : Répartition de la production mondiale de légumineuses.....	- 1 -
Figure 3 : Répartition mondiale de la production de légumes secs	- 1 -
Figure 4 : Organigramme fonctionnel du groupe.....	- 2 -
Figure 5 : Répartition des volumes de ventes par catégories de produits et par activités.....	- 3 -
Figure 6 : Répartition des volumes d'achats de légumes secs (2012)	- 4 -
Figure 7 : Volume de vente de produits fini par légumes secs	- 4 -
Figure 8 : Répartition des réclamations clients pour chaque légume sec concernant un défaut de texture.....	- 5 -
Figure 9 : Structure externes et internes d'une graine de légumineuse. Exemple du haricot (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	- 6 -
Figure 10 : Diagramme de fabrication des conserves de légumes secs	- 9 -
Figure 11 : Causes des pertes post-récolte des légumes secs.....	- 9 -
Figure 12 : Schéma explicatif du taux de casse	- 13 -
Figure 13 : Traçabilité des échantillons (exemple de la lentille)	- 15 -
Figure 14 : Casse de différents lots de légumes à l'autocuiseur et à l'autoclave	- 15 -
Figure 15 : Taux d'hydratation des lentilles après cuisson en autocuiseur	- 18 -
Figure 16 : Taux de casse des lentilles après cuisson en autocuiseur et appertisation	- 18 -
Figure 17 : Conductivité de l'eau après cuisson en autocuiseur.....	- 18 -
Figure 18 : Taux d'hydratation des lentilles après trempage et cycle complet de fabrication	- 19 -
Figure 19 : Taux de casse des lentilles après appertisation.....	- 19 -
Figure 20 : Dispersion des valeurs des différents paramètres pour les lentilles	- 19 -
Figure 21 : Evaluation du taux de casse en fonction du taux de casse prédit	- 20 -
Figure 22 : Taux d'hydratation des haricots rouges en autocuiseur	- 21 -
Figure 23 : Taux de casse des haricots rouges après cuisson en autocuiseur et appertisation	- 21 -
Figure 24 : Ecart de qualité à réception de deux lots de haricots rouges	- 21 -
Figure 25 : Conductivité de l'eau après cuisson en autocuiseur.....	- 21 -
Figure 26 : Taux d'hydratation des haricots rouges après trempage et cycle complet de fabrication....	- 22 -
Figure 27 : Taux de casse des haricots rouges après appertisation	- 22 -
Figure 28 : Dispersion des valeurs des différents paramètres pour les haricots rouges.....	- 22 -
Figure 29 : Comparaison des modèles établis en fonction des outils de stérilisation.....	- 23 -
Figure 30 : Taux d'hydratation des GN en autocuiseur.....	- 24 -
Figure 31 : Taux de casse des haricots GN après cuisson en autocuiseur et appertisation.....	- 24 -
Figure 32 : Conductivité de l'eau après cuisson en autocuiseur.....	- 24 -
Figure 33 : Taux d'hydratation des GN après trempage et cycle complet de fabrication	- 24 -
Figure 34 : Taux de casse des GN après appertisation	- 25 -
Figure 35 : Dispersion des valeurs des différents paramètres pour les GN	- 25 -
Figure 36 : Evaluation du taux de casse en fonction du taux de casse prédit des GN	- 25 -
Figure 37 : Taux d'hydratation des haricots lingots en autocuiseur	- 26 -
Figure 38 : Taux de casse des haricots lingots après cuisson en autocuiseur et appertisation.....	- 26 -
Figure 39 : Conductivité de l'eau après cuisson en autocuiseur.....	- 26 -
Figure 40 : Taux d'hydratation après trempage et cycle complet de fabrication	- 26 -
Figure 41 : Taux de casse des lingots après appertisation	- 27 -
Figure 42 : Dispersion des valeurs des différents paramètres pour les lingots	- 27 -
Figure 43 : Justesse du modèle établis pour chacun des légumes secs	- 27 -
Figure 44 : Evaluation de la robustesse du modèle sur les HR.....	- 31 -
Figure 45 : Evaluation du modèle sur les haricots rouges	- 31 -
Figure 46 : Evaluation de la robustesse du modèle sur les GN.....	- 31 -

Figure 47 : Evaluation du modèle sur les GN	- 32 -
Figure 48 : Evaluation de la robustesse du modèle sur les HL	- 32 -
Figure 49 : Evaluation du modèle sur les HL	- 32 -

Liste des tableaux

Tableau 1 : Nombre de non-conformités sur les légumes secs	- 5 -
Tableau 2 : Composition moyenne des légumes secs	- 7 -
Tableau 3 : Quelques minéraux contenus dans les légumes secs	- 8 -
Tableau 4 : Quelques effets du stockage sur la qualité de cuisson	- 10 -
Tableau 5 : Sensibilité de deux pigments aux facteurs de décoloration	- 12 -
Tableau 6 : Barème de stérilisation, temps de trempage et de blanchiment des différents légumes secs	- 16 -
Tableau 7 : Divergences de procédé pouvant expliquer des écarts de résultats (exemple des haricots rouges).....	- 29 -
Tableau 8 : Caractéristiques des eaux utilisées par le CTCPA et R&R.....	- 29 -

Liste des abréviations

Aw : Activity of water

COFIGEO : Compagnie Financière de Geo

CTCPA : Centre Technique de la Conservation des Produits Agricoles

DG : Direction Générale

GN : Great Northern

HL : Haricot Lingot

HQSE : Hygiène Qualité Sécurité Environnement

HR : Haricot Rouge

LB : Lentille Blonde

MDD: Marque de Distributeur

mS : millisiemens

QSE : Qualité Sécurité Environnement

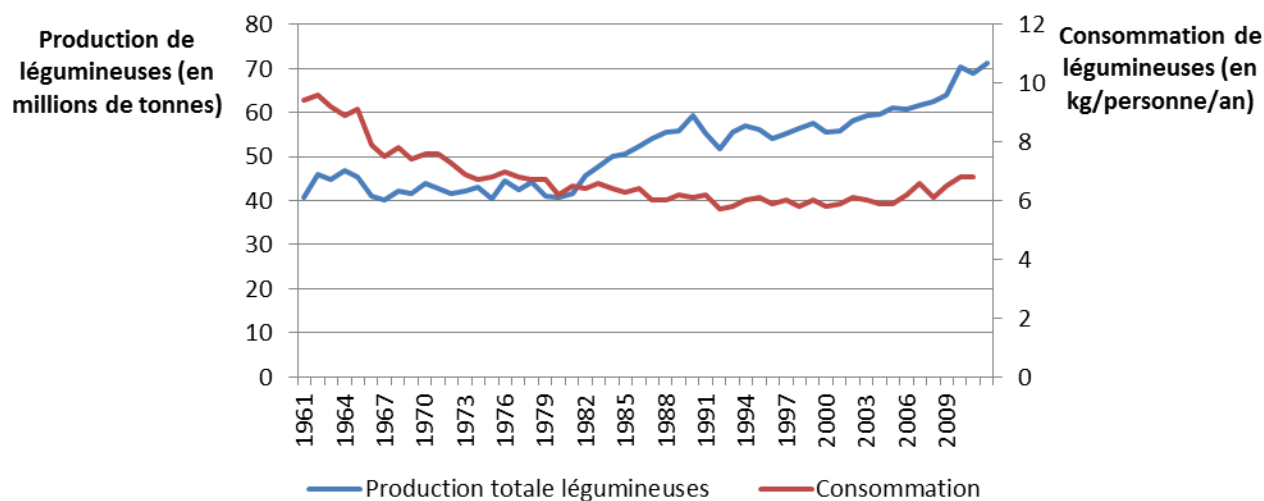
R&D : Recherche et Développement

R&R : Raynal et Roquelaure

Abstract

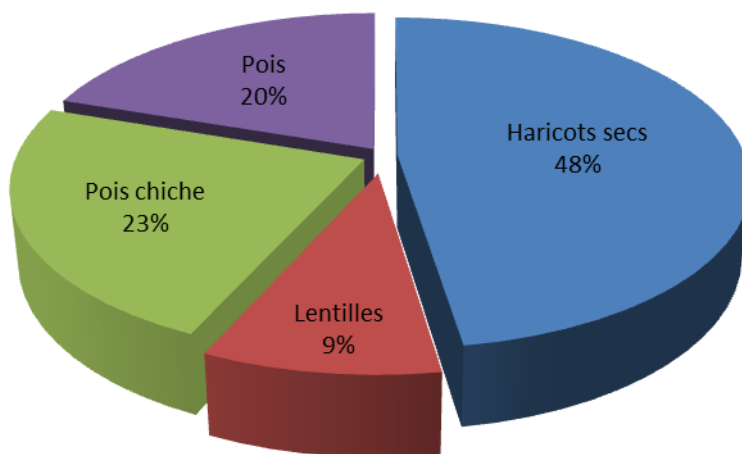
This report presents the evaluation of a method for characterizing the processing quality of pulses (lentils, kidney beans, lingots and Great Northern (GN)) on receipt. The method, based on a pressure cooker test, consisting in the creation of a predictive statistical model, connecting the breakage rate in the autoclave with the breakage rate and the conductivity of water pressure cooking. Monitoring the size, yield and hydration rate could help to connect the pressure cooker test and tests performed by R & R. Twenty independent measurements have enabled a model for each pulse. Of the four models, only one (lingots) shows a good correlation between the breakage rate predicted by the model and the real rate of breakage ($R^2 = 0.60$). The correlation analysis does not establish links between different measured parameters. The method does not predict the processing quality of all pulses. It needs to be adjusted (lingots), abandoned (lentils) or reconsidered (red beans and GN) either increasing the number of measurements or building a model with other parameters more suitable.

However, by reassessing the models and focusing on batch to batch variability, reliable models of ingots, red beans and GN were established. This reevaluation confirming that the method is not suitable for lentils.



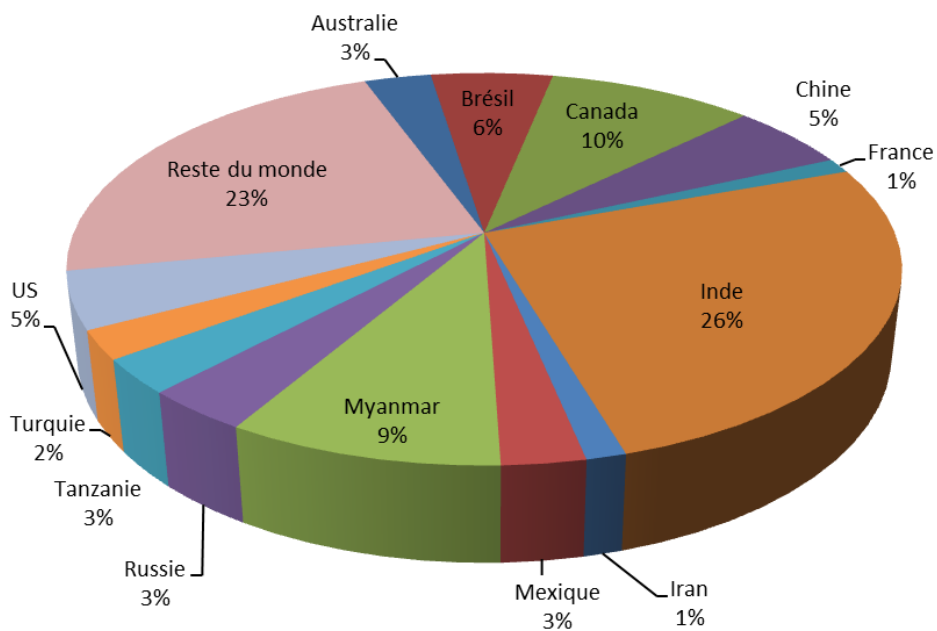
D'après FAOSTAT (2011)

Figure 1 : Evolution mondiale de la production et de la consommation des légumineuses



D'après FAOSTAT (2012)

Figure 2 : Répartition de la production mondiale de légumineuses



D'après FAOSTAT (2012)

Figure 3 : Répartition mondiale de la production de légumes secs

Introduction

Au cours des dix dernières années, la production mondiale de légumineuses est restée stable, aux alentours de 40 millions de tonnes par an¹. Toutefois depuis 2009, la production tend à augmenter et à se stabiliser aux alentours de 50 millions de tonnes (FAOSTAT, 2012) (Figure 1). Avec près de 24 millions de tonnes en 2012, la production de haricots secs représente la plus importante part de la production mondiale de légumineuses. Les autres productions majeures étant respectivement le pois chiche, le pois et la lentille (Figure 2).

L'Inde est le plus grand producteur de légumineuses suivi par le Canada. Certains pays comme le Brésil sont « spécialisés » dans la culture de haricots secs, tandis que les pays comme la Chine, les Etats-Unis ou le Mexique produisent diverses légumineuses (Figure 3).

En 2011, ce sont près de 11 millions de tonnes de légumineuses qui ont été exportées dans le monde. Sur l'année la part des exports a été plus importante pour les pois secs (43%) et pour les haricots secs (30%). Les lentilles (17%) et les pois chiches (10%) ont été exportés dans de moindres quantités (FAOSTAT, 2011).

Avec une consommation mondiale d'un peu plus de 6 kg/an/personne (FAOSTAT, 2011) (Figure 1), les légumes secs font partie des légumes les plus consommés au monde, aussi bien en tant que constituant principal qu'en tant que composant d'une recette (par exemple les haricots dans le cassoulet ou le chili con carne, les lentilles dans le petit salé aux lentilles). Toutefois il existe quelques disparités de consommation entre les différents pays. En effet, les populations d'Amérique du Sud et centrale ou du Burundi sont de grands consommateurs avec respectivement une consommation de 25 kg/an/personne et 50 kg/an/personne. A l'inverse, en France la consommation de légumes secs a été divisée par cinq entre les années 1880 et 2002, passant ainsi de 10 kg/an/personne à 2 kg/an/personne (Roudaut et Lefrancq, 2005). Elle est aujourd'hui jugée insuffisante par le Plan National Nutrition Santé (PNNS) (OEAP, 2013).

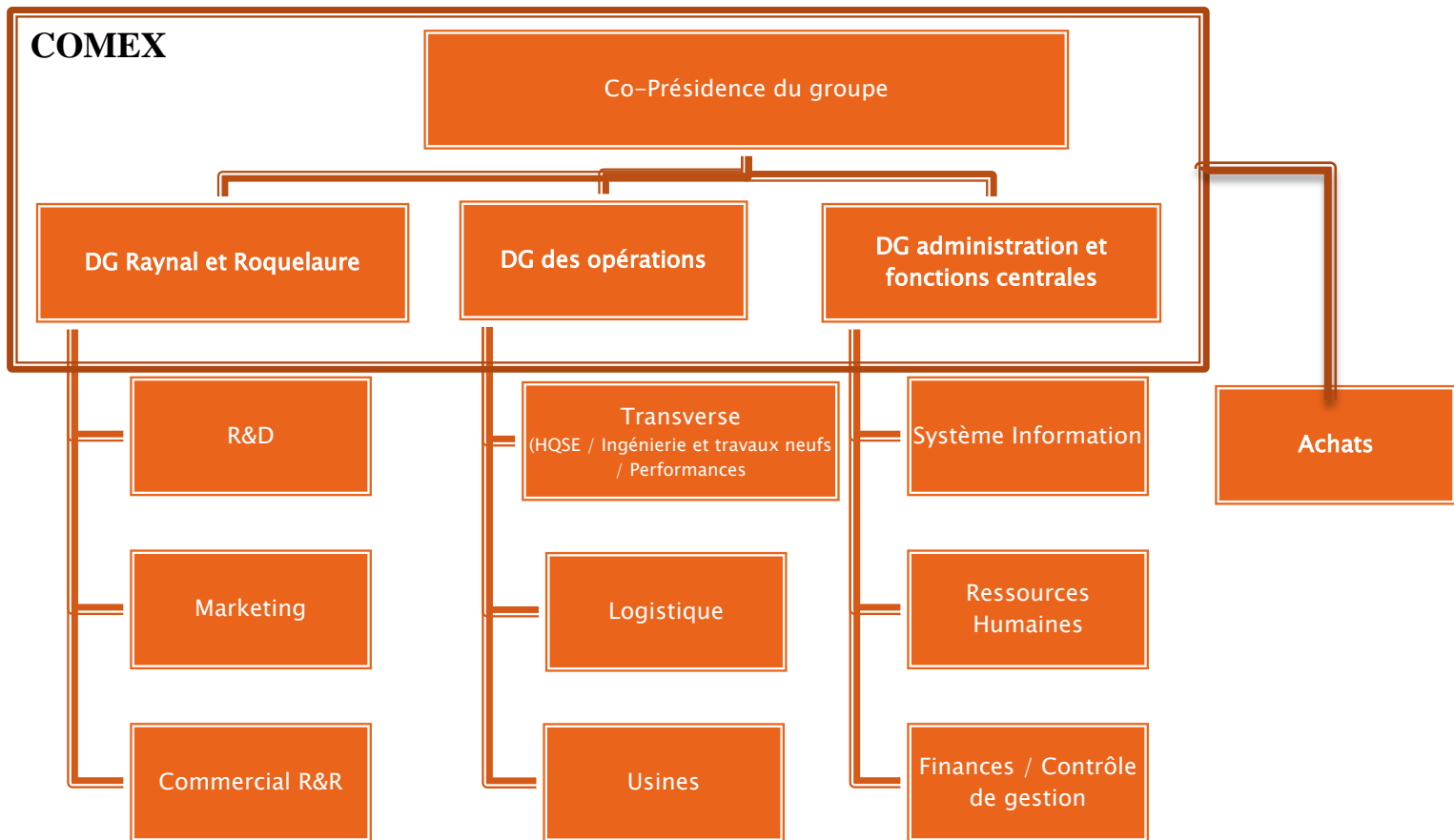
Avec la crise économique, la conserve devient un nouveau mode de consommation alimentaire, jugée à la fois plus économique et plus pratique par les consommateurs (France AgriMer, 2011). Les légumes secs sont principalement consommés sous forme de produits de conserverie (60%, le reste étant consommé en sec après une cuisson domestique) ce qui implique une bonne maîtrise du procédé de transformation afin d'assurer la qualité du produit fini.

Or, le secteur de la conserve, est confronté à des problèmes de variabilité de qualité des matières premières liés à des soucis de texture (légumes secs trop durs ou trop mous) et d'aspect (légumes cassés, fendus) dans le produit fini. La maîtrise du procédé de transformation est importante mais elle est aujourd'hui assez bien maîtrisée. Cependant les caractéristiques intrinsèques de la matière première influencent la qualité dans le produit fini et restent difficiles à caractériser.

L'entreprise aveyronnaise, Raynal et Roquelaure, spécialisée dans les plats cuisinés appertisés (notamment sur les plats cuisinés à base de légumes secs) depuis plus de 100 ans, a exprimé le besoin de pouvoir caractériser les lots de matières premières qu'elle réceptionne afin de mieux maîtriser la qualité des produits. C'est pourquoi la mise en place d'une méthode permettrait de qualifier dès la réception, l'aptitude technologique des légumes secs à l'appertisation.

La mise en place de la méthode consiste à s'appuyer sur un protocole établi par le CTCPA (Centre Technique de la Conservation des Produits Agricoles) et à l'évaluer pour voir s'il est utilisable par l'entreprise.

¹ Les chiffres ne prennent en compte que la production des principales cultures de légumineuses présentées (haricot sec, pois, pois chiche et lentille).



D'après documents internes R&R (2014)

Figure 4 : Organigramme fonctionnel du groupe

Divers points seront abordés au cours de ce présent mémoire. La première partie présentera de façon générale l'entreprise Raynal et Roquelaure (R&R) et ses attentes vis-à-vis d'une méthode de caractérisation de l'aptitude technologique des légumes secs. Ensuite l'étude bibliographique décrira les différents légumes secs utilisés tout en introduisant leurs propriétés biochimiques et physico-chimiques ainsi que leur aptitude technologique au cours des différentes étapes du procédé de transformation. Après cela, la méthode à évaluer sera exposée, présentant les principaux résultats de l'étude réalisée par le centre technique, l'application de la méthode dans l'entreprise et les différentes mesures venant compléter la méthode. La dernière partie se focalisera sur les perspectives du travail mené, présentant différentes pistes d'utilisation des résultats de l'étude.

I. Raynal & Roquelaure : une conserverie depuis 1876

A. Historique

En 1866, la ville de Capdenac-Gare, située dans l'Aveyron, devient un centre ferroviaire important de la ligne reliant Toulouse à Paris, ce qui entraîne l'ouverture du Buffet de la Gare. En 1876, le gérant du Buffet de la Gare, Théophile Raynal et son chef cuisinier Ernest Roquelaure (qui était aussi son gendre) décident de s'associer, c'est ainsi que naît l'entreprise familiale Raynal et Roquelaure. La réputation grandissante de l'entreprise leur donne l'idée de proposer leurs plats traditionnels à emporter. Ils se tournent donc vers la nouvelle technologie de l'appertisation (Raynal et Roquelaure, 2014).

Depuis sa création, la petite entreprise familiale n'a cessé de se développer, faisant d'abord partie de la Société d'Alimentation de Provence, puis en 1972, intégrant le groupe COFIGEO (Compagnie Financière de Geo), spécialisé dans la production de jambon. Aujourd'hui, COFIGEO compte 3 sites de production : Capdenac (Aveyron), Sainte-Livrade (Lot-et-Garonne) et Camaret-sur-Aigues (Vaucluse), tous certifiés ISO 9001, ISO 14 001, ISO 22 000 et IFS. Avec ses deux marques phares **Raynal et Roquelaure** (plats cuisinés appertisés français) et **Zapetti** (plats cuisinés appertisés italiens et exotiques), le groupe réalise un chiffre d'affaire d'un peu plus de 130 millions d'euros en 2013 (MBO Partenaires, 2014). Ce qui place le groupe au rang de numéro deux français sur le marché des plats cuisinés appertisés après William Saurin.

B. Organisation du groupe

Le groupe COFIGEO est dirigé par un Comité Exécutif (Comex) qui s'organise autour de cinq fonctions permettant ainsi un maximum d'efficacité et des prises de décisions rapides. Les achats sont directement rattachés au Comex (Figure 4).

Le capital du groupe est détenu pour moitié par MBO Partenaires et la Société Générale Capital Partenaires. Le restant des parts étant détenu par les salariés à hauteur de 38% auxquels s'ajoutent des investisseurs privés et le Crédit Agricole (RIA, 2014).

S'appuyant sur un savoir-faire historique et un outil de production performant, le groupe poursuit sa stratégie de développement et d'innovation sur les axes de la naturalité et de la qualité nutritionnelle. La diversification vers de nouveaux marchés comme la Restauration Hors Foyer, le renforcement de l'export (actuellement il représente 9% du chiffre d'affaires) et la croissance externe sont trois composantes du projet stratégique (MBO Partenaires, 2014).

1. Le siège social R&R : le site de Capdenac

Le site de Capdenac (230 personnes) comprend le siège social de l'entreprise et l'usine de production des plats cuisinés français, des légumes, des pâtés, des garnitures de bouchées et des plats exotiques chauds.

Le site produit 20 000 tonnes par an de produits répartis en 73 recettes dont les trois quart sont sous la marque R&R et un quart des produits sont pour la marque de distributeur (MDD).

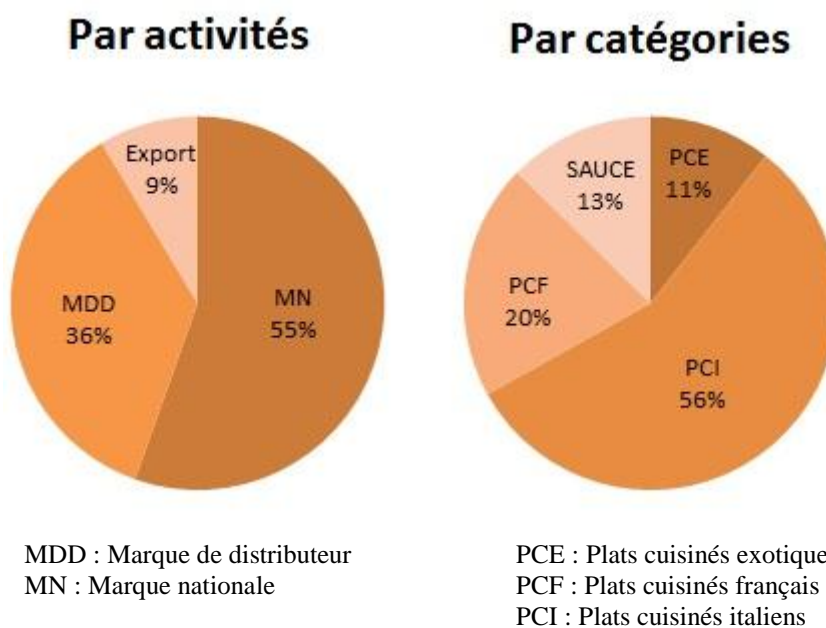
2. Sainte Livrade et Camaret : deux sites spécialisés

Le site de Sainte-Livrade (70 personnes) est le plus petit des trois sites. Son activité repose principalement sur la fabrication de barquettes micro-ondables et d'emballages spécifiques. Avec 81 recettes, ce sont 4 000 tonnes de produits par an qui sortent de l'usine dont la moitié est en marque nationale (R&R) et l'autre moitié en MDD.

Le site de Camaret (205 personnes), spécialisé dans les plats cuisinés appertisés Italiens et Exotiques, est le site le plus important en volume sortant. Avec 53 recettes, le site produit 47 000 tonnes par an, répartis de la manière suivante : 79% de plats cuisinés italiens, 12% de sauces et 9% de plats cuisinés exotiques.

C. Une gamme de produits toujours plus innovante

La gamme de produit s'articule autour de 4 grandes catégories de produits : les plats cuisinés italiens (ravioli, cannelloni...), les plats cuisinés français (cassoulet, lentilles cuisinées, choucroute, quenelles,...), les sauces et les produits cuisinés exotiques (paella, couscous, chili con carne,...) (Figure 5). Les produits sont principalement vendus en grandes et moyennes surfaces (GMS) soit sous les marques nationales Raynal et Roquelaure et Zapetti, soit sous la marque de distributeur. Une partie de la production est envoyée à l'export (principalement en Europe) (Figure 5).



D'après documents internes R&R, 2013

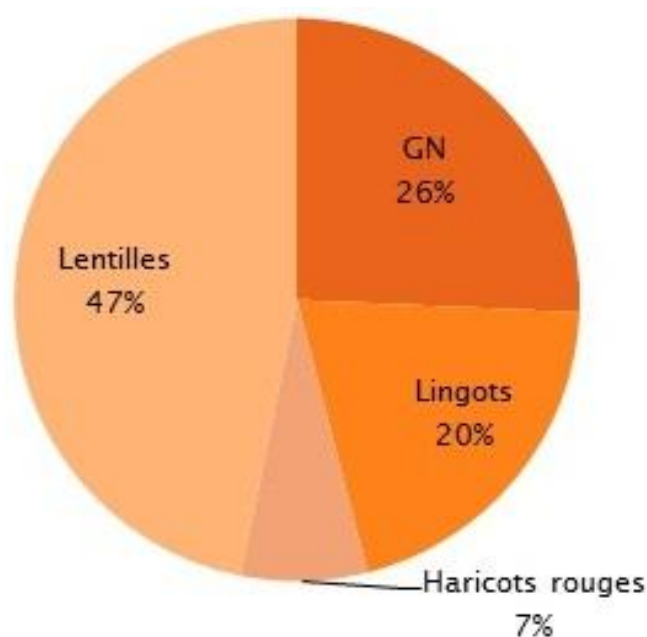
Figure 5 : Répartition des volumes de ventes par catégories de produits et par activités

Fort de son innovation, l'entreprise compte plus de 200 recettes, et n'hésite pas à investir sur de nouveaux marchés comme ceux de la barquette micro-ondable (2007), du bio et de l'allégé avec un partenariat avec WeightWatchers® (2011), du halal (2013) ou encore la restauration hors domicile avec un conditionnement en sachet souple (2014). L'innovation est aussi marquée par un désir de naturalité des produits par l'entreprise, de leur assurer une bonne qualité nutritionnelle et de privilégier autant que possible les approvisionnements au niveau national.

Ainsi l'appertisé représente une vraie force pour l'entreprise puisqu'elle est le gage d'un produit sûr (hygiène et sécurité alimentaire), pratique et facile de stockage, plus économique que les produits frais ou surgelés, avec une date limite d'utilisation optimale (DLUO) longue et des qualités organoleptiques semblables à celles du frais.

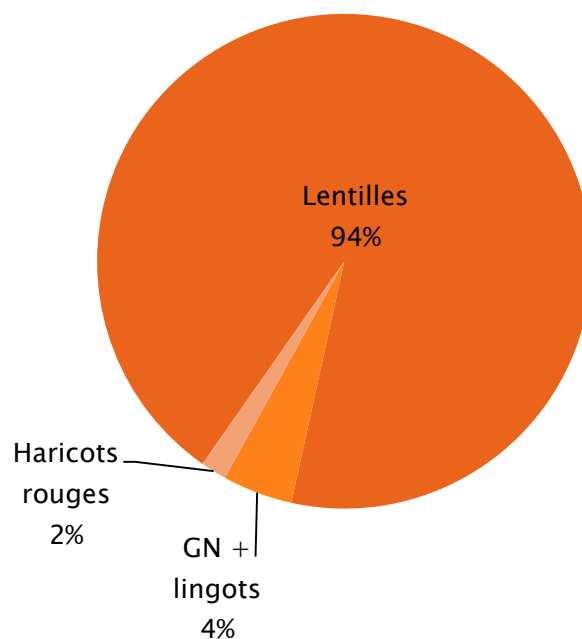
D. Etat des lieux sur la qualité des légumes secs

Chaque année l'entreprise achète près de 900 tonnes de GN (Great Northern), 700 tonnes de lingots (HL), 260 tonnes de haricots rouges (HR) et 1 700 tonnes de lentilles blondes (LB). Les lentilles représentent la moitié des achats en légumes secs de l'entreprise (Figure 6), ce qui s'explique par le fait que les lentilles cuisinées soient la première référence de la marque Raynal et Roquelaure (Figure 7). Toutefois en 2013, l'année a été particulière puisqu'il y a eu une rupture en haricots lingots ce qui a poussé R&R à se rabattre sur l'achat de haricots GN. En effet la quantité de lingots achetée a été divisée par 13, passant ainsi de 700 tonnes à 60 tonnes achetées. La quantité de GN a été multipliée par 1,5 passant de 900 tonnes à 1 400 tonnes achetées.



D'après documents internes R&R, 2012

Figure 6 : Répartition des volumes d'achats de légumes secs (2012)



D'après documents marketing R&R, 2013-2014

Figure 7 : Volume de vente de produits fini par légumes secs

Dans le passé l'entreprise a pu rencontrer quelques problèmes avec les légumes secs qu'elle reçoit de son fournisseur. Toutefois peu de lots sont refusés (1 seul refus de lot en 2013) bien que ceux-ci soient parfois à la limite de l'acceptabilité (grains abîmés, cassés, tâchés, trop petits...). R&R tente quand même de piloter le procédé industriel, afin de rendre le produit fini acceptable par le consommateur. Cependant, il arrive que la qualité du produit fini ne soit pas celle désirée.

Actuellement les contrôles à réception consistent en la mesure du calibre et le contrôle des corps étrangers. Des tests de réhydratation et de dureté sur les légumes secs, trempés et cuits sont effectués uniquement sur les lingots. Le contrôle sur produit fini s'effectue par une dégustation où les critères suivants sont évalués : la couleur, la texture, l'uniformité et le goût.

L'acceptabilité d'un lot se base sur les critères de la spécification matière première. Pour les lingots, la valeur limite du test de réhydratation ne doit pas dépasser 10% d'éclatement.

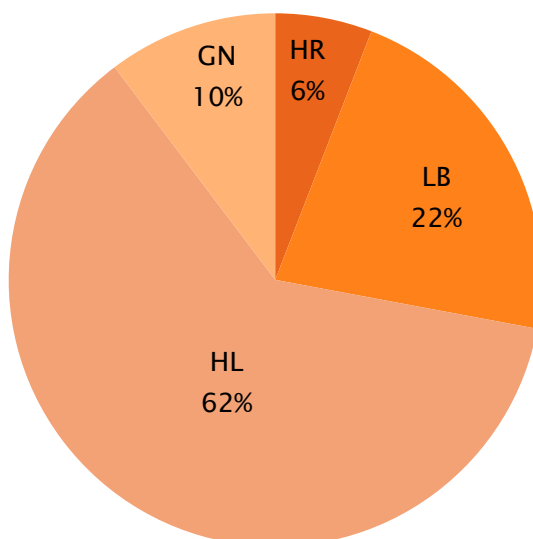
Les non-conformités sur les légumes secs peuvent être constatées à 2 niveaux : à réception ou en interne. Elles sont principalement constatées sur les critères de calibre, de corps étrangers et de taux de réhydratation.

Pour l'année 2014, l'objectif du taux de conformité globale des matières premières est fixé à 97%. Depuis le début de l'année, l'objectif n'est pas atteint puisque le taux de conformité est de 92,3%.

Tableau 1 : Nombre de non-conformités sur les légumes secs

	Lentilles	GN	Lingots	Haricots rouges
Nombre de réception	145	127	32	61
Nombre de non-conformité	0	37	16	12
Part de Non-conformité	0%	29%	50%	20%

D'après documents internes achats, 2013-2014



D'après documents internes qualité, 2013

Figure 8 : Répartition des réclamations clients pour chaque légume sec concernant un défaut de texture

Pour la campagne 2013/2014 les non-conformités pour chacun des légumes secs, à réception, se répartissent comme présenté dans le Tableau 1.

Les réclamations peuvent être liées à différents types de défauts comme le goût, la recette, la présence de moisissure, l'aspect et la texture du produit. En 2013, le nombre total de réclamations clients pour des défauts d'aspect et de texture des légumes secs est de 68 réclamations (Figure 8). Les réclamations clients concernent principalement les haricots lingots. En comparant avec les non-conformités, ce sont les lingots sur lesquels l'entreprise rencontre le plus de problèmes de qualité sur matière première et sur produit fini.

E. Les enjeux liés à la mise en place d'une méthode de caractérisation des légumes secs

La mise en œuvre d'une méthode de caractérisation, s'inscrit dans la démarche QSE de l'entreprise, sur la base de l'amélioration continue (principe de la roue de Deming : Plan – Do – Check - Act). Les écarts de qualité entre les produits, poussent R&R à rechercher une méthode de caractérisation des légumes secs. Celle-ci devra permettre de discriminer des lots adaptés ou non à l'appertisation et devra être facile et rapide à mettre en place.

Cette méthode de caractérisation de l'aptitude technologique des légumes secs par un test des lots à réception pourrait permettre à R&R :

- D'affiner le cahier des charges interne et/ou fournisseurs : la qualité des produits serait améliorée par le refus de lots susceptibles de compromettre la qualité après stérilisation.
- Attirer et fidéliser les clients : les produits finis sont plus qualitatifs et les clients sont donc plus satisfaits des produits qu'ils consomment.
- De piloter le procédé : la méthode devrait permettre de caractériser la matière première. En fonction des critères de sélection des légumes secs et l'établissement de valeur cible, il sera alors possible de piloter l'étape de trempage ou de blanchiment ainsi que la consigne d'emboitage.

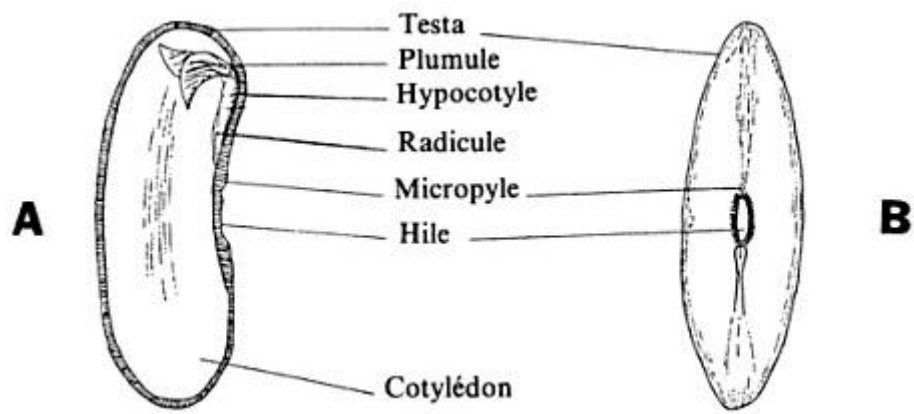
La qualité devient alors un levier de compétitivité, puisqu'elle constitue un véritable critère de différenciation concurrentielle (DGCIS, 2012).

Ainsi la mise en place d'une méthode permettant de qualifier l'aptitude technologique des différents légumes secs à réception des lots permettrait à R&R d'être plus réactif en terme de qualité sur le produit fini, de limiter le nombre de produits finis non conformes en adaptant les paramètres de son procédé, et enfin de pouvoir émettre des exigences quant aux spécifications de la matière première dans les cahiers des charges internes et/ou destinés au(x) fournisseur(s). Ce qui amène à la problématique suivante :

Comment évaluer à réception l'aptitude technologique des légumes secs (haricots rouges, haricots blancs et lentilles) à l'appertisation ?

Les objectifs de l'étude seront donc :

- La mise en place d'un protocole permettant de caractériser l'aptitude des lots à l'appertisation dès leur réception,
- L'évaluation de la pertinence et des applications de la méthode pour R&R.



D'après Développement et morphologie de la graine (1989)

Figure 9 : Structure externes et internes d'une graine de légumineuse. Exemple du haricot (*Phaseolus vulgaris*)

II. Etude bibliographique

A. Les légumes secs de l'étude : lentilles, haricots rouges et haricots blancs

Appartenant à la famille de Papilionacées, les légumes secs se définissent comme les graines sèches de légumineuses se distinguant des graines oléagineuses par leur faible teneur en matière grasse. Cette catégorie de légumes comprend (Programme mixte FAO/OMS sur les normes alimentaires et al., 2007) :

- Le haricot commun (*Phaseolus spp.*) ;
- La lentille (*Lens culinaris*) ;
- Le pois (*Pisum sativum*) ;
- Le pois chiches (*Cicer arietinum*) ;
- La fève (*Vicia faba*) ;
- Le niébé ou haricots à œil noir (*Vigna unguiculata*).

Les légumes secs possèdent de nombreux atouts nutritionnels : richesse en protéines, en glucides complexes, en minéraux, en vitamines et en fibres alimentaires. Toutefois leur déficit en acides aminés essentiels soufrés est un facteur limitant de la qualité nutritionnelle, et la présence de facteurs antinutritionnels² ainsi que le phénomène « hard to cook » peuvent l'altérer (Pirhayati, Soltanizadeh, et Kadivar, 2011).

1. Morphologie du grain

Les légumes secs sont constitués de 3 parties : le tégument (8%), le cotylédon (90%) et le germe aussi appelé embryon (2%). Les cotylédons sont les parties les plus importantes de la graine et constituent le réservoir en nutriments de celle-ci (Bhatty, 1988). Le germe constitue une source de nutriments essentiels (vitamine E, acide folique, phosphore, thiamine, zinc, magnésium,...).

La structure des légumes secs est généralement la même, toutefois il existe des différences au niveau de la couleur et de la forme de la graine, de la taille et de l'épaisseur du tégument (Tiwari et Singh, 2012).

D'un point de vue botanique, selon leur localisation, les éléments qui composent le grain peuvent être classés de la façon suivante (Figure 9) :

- Au niveau externe :
 - La testa (tégument du grain) joue un rôle de protection contre les agressions de l'environnement (mécanique et microbienne) et constitue une réserve de nutriments pendant la germination.
 - Le hile correspond au point d'attache de la gousse.
 - Le micropyle permet la pénétration de l'eau pendant la germination.

² **Facteur antinutritionnel:** composé présent dans un aliment, qui limite la capacité de l'organisme à utiliser certains nutriments utiles (Chesworth et Guerin, 1996)

Les facteurs antinutritionnels contenus dans les légumineuses sont les suivants : l'inhibiteur de protéases, les phytohémagglutinines, les cyanogènes, l'acide phytique, les saponines, le facteur de flatulence, le facteur antivitamin E et l'inhibiteur de l'amylase (Tacon et Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 1995).

- Au niveau interne, l'embryon est composé de différents organes :
 - La plumule, formée par les deux feuilles primaires ;
 - La radicule correspondant aux prémices de la future racine ;
 - ⇒ La radicule et la plumule sont des organes de transport pour la nutrition de l'embryon pendant la germination. Ils jouent aussi un rôle important dans l'absorption de l'eau par le tégument.
 - L'hypocotyle forme le point de départ de la racine principale ;
 - Les deux cotylédons constituent des réserves nutritives pour le germe pendant la germination.

L'enveloppe de la graine est formée de 4 principales couches de cellules formant : la cuticule, l'épiderme, l'hypoderme et le parenchyme. Elle est principalement composée de fibres (80-90%). Le tégument est riche en minéraux tels que le calcium (32-50% du calcium total de la graine), le magnésium, le fer, le zinc, le potassium et le cuivre, mais aussi en phytates, en tanins et en composés phénoliques.

Les graines de lentilles et de haricots sont composées de deux cotylédons. Ceux-ci sont constitués de cellules du parenchyme qui permettent le stockage de glucides complexes sous la forme de grains d'amidon, de glucides simples, de protéines et de lipides (Bhatty, 1988 ; Sgarbieri, 1989). Ils ont à la fois un rôle d'organes de stockage et de structures photosynthétiques persistantes.

2. Propriétés biochimiques et physico-chimiques du grain

Le haricot blanc (7,26g/100g cuits), la lentille (6,4g/100g cuits) et le haricot rouge (8,58g/100g cuits) font partie des aliments végétaux contenant le plus de protéines (Anses, 2013a) (Tableau 2). Pour compenser leur déficit en acides aminés soufrés (cystéine et méthionine), les légumes secs peuvent être combinés à une autre source protéique, comme les céréales afin d'équilibrer la balance des différents acides aminés essentiels (Anses, 2013b). Leur teneur élevée en fibres alimentaires leur confère un index glycémique bas. Les principaux composés glucidiques des légumes secs sont essentiellement des polysaccharides (cellulose, amidon,...) tandis que les glucides simples sont retrouvés dans de moindres proportions.

Tableau 2 : Composition moyenne des légumes secs

Composants	Teneur (%)
Teneur	10
Glucides	60-65
Protéines	21-25
Lipides	1-1,5
Cendres	2,5-4

D'après Pulse chemistry and technology (2012)

L'enveloppe de la graine est riche en fibres solubles (pectines) et insolubles (celluloses, hémicelluloses, lignines) (Roudaut et Lefrancq, 2005). Les propriétés mécaniques de rigidité de la paroi sont essentiellement dues à la présence de lignine et de cellulose. La présence de calcium dans le tégument assure la stabilité et la cohésion des parois cellulaires due à la formation d'un complexe insoluble avec la pectine (Tiwari et Singh, 2012). L'épiderme est composé de 2 couches : la première composée de glucides plus ou moins complexes (cellulose, hémicellulose, pectines et polysaccharides), la deuxième est une couche cellulosique. Entre ces deux couches de cellules se trouve la lamelle moyenne, contenant des pectates de calcium et de magnésium qui constituent un réseau solide et assurant la cohésion du tégument. La présence de pores au niveau du tégument assure la réhydratation du grain lors du trempage (Powrie, Adams, et Pflug, 1960).

De nombreux facteurs tels que le cultivar, la maturité du grain, le procédé utilisé, les conditions environnementales et de stockage, influent sur la qualité à l'appertisation (Tiwari et Singh, 2012). La fermeté des haricots cuits appertisés est en lien avec la teneur en pectines ainsi que la teneur en calcium. Des sels de calcium peuvent être ajoutés au moment du trempage afin d'augmenter la fermeté des grains (Brennan, Grandison, et Wiley InterScience (Online service), 2011 ; Lu et Chang, 1996 ; Wang, Chang, et Grafton, 1988, Lu et Chang, 1996 ; Wang, Chang, et Grafton, 1988). La fermeté des lentilles n'est pas étudiée dans la littérature, cependant leur aptitude à la cuisson dépend de nombreux facteurs tels que les conditions de cultures et la variété (Bhatty, 1988) ; la teneur en acide phytique, chélateur³ d'ions divalent limitant la complexation avec la pectine (Bhatty et Slinkard, 1989).

Les légumes secs sont riches en minéraux (Tableau 3). Pour le haricot, ils sont contenus principalement dans les téguments alors que pour la lentille une grande partie se retrouve dans les cotylédons. Toutefois, la teneur en matière minérale est très variable selon le cultivar du légume sec et dépend notamment des conditions de cultures (Bhatty, 1988 ; Powrie, Adams, et Pflug, 1960).

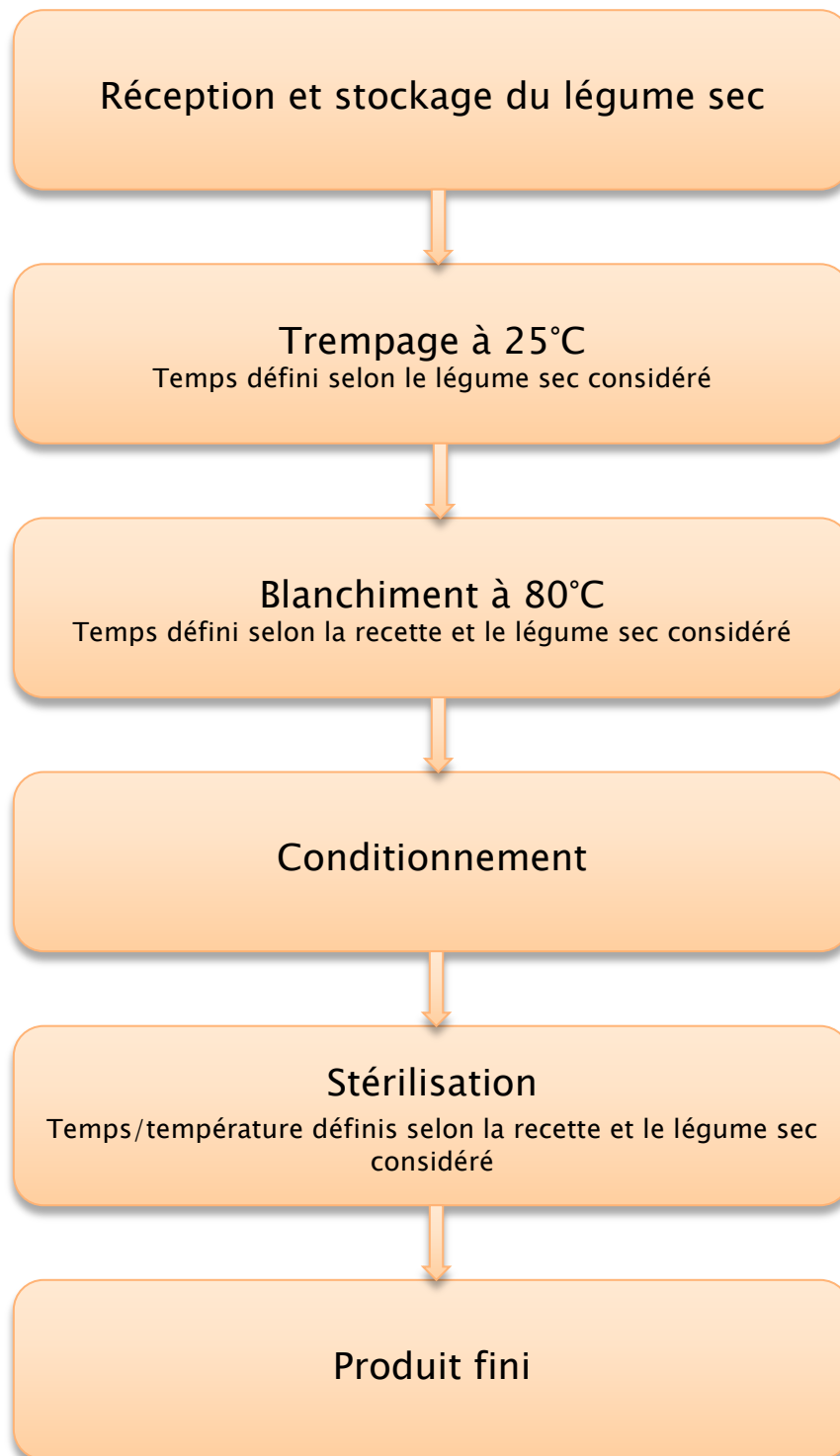
Tableau 3 : Quelques minéraux contenus dans les légumes secs

	Lentilles cuites appertisées (g/100g cuits)	Haricots blancs cuits appertisés (g/100g cuits)	Haricots rouges cuits (g/100g cuits)
Calcium	29	68,3	46,3
Fer	1,67	2,99	2,32
Potassium	106	270	400
Phosphore	82,7	91	135
Magnésium	14,6	25,7	29,6

D'après Table de composition nutritionnelle Ciqual, 2013a

La couleur de l'enveloppe (principalement pour les haricots rouges) est aussi un paramètre important de qualité et dont tiennent compte les industriels et les consommateurs (Tiwari et Singh, 2012). Elle est déterminée par la teneur en polyphénols, notamment les anthocyanes et les tannins, se trouvant dans le tégument. Les composés phénoliques ont un pouvoir antioxydant. Leur présence dans le tégument des légumes secs permet de protéger la graine des dégradations oxydatives. L'étude de Pirhayati, Soltanizadeh, et Kadivar, (2011) a démontré qu'il existait un lien entre la couleur des grains « hard to cook » et leur fermeté. Le phénomène « hard to cook » ou grain « difficile à cuire » est un défaut de texture lié à de mauvaises conditions de stockage et de procédé et qui implique une cuisson prolongée. Le durcissement du grain selon des hypothèses, serait lié aux activités enzymatiques entraînant des modifications de composition chimique au niveau des membranes cellulaires lors du stockage (CTCPA, 2000).

³ **Chélateur** : produit chimique qui forme avec les ions bi- et trivalents des complexes stables, non toxiques (Larousse, 2014).



D'après *Aptitude technologique des légumes secs pour l'appertisation*, CTCPA, 2014

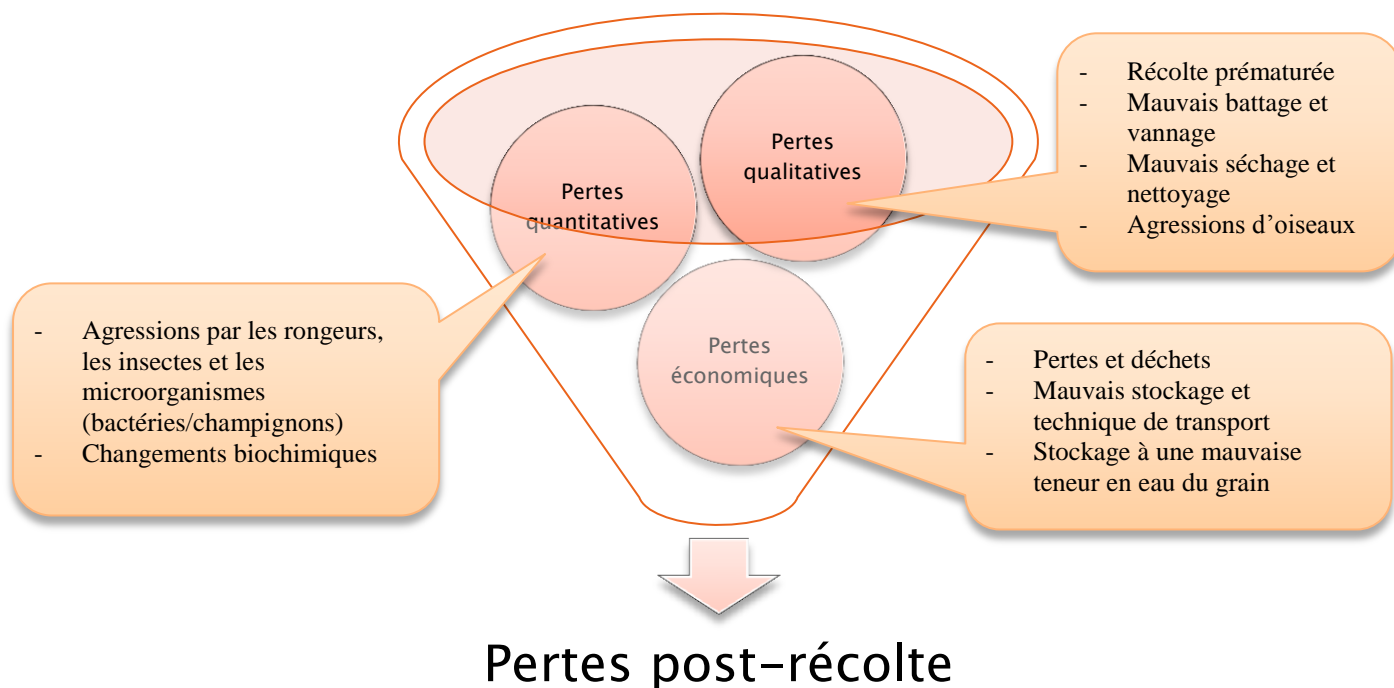
Figure 10 : Diagramme de fabrication des conserves de légumes secs

B. Comportement des légumes secs au cours du procédé d'appertisation

L'aptitude technologique des légumes secs peut être dégradée depuis la récolte jusqu'à l'appertisation (Figure 10). Le stress engendré par ces différentes étapes va influencer sur les propriétés physicochimiques du grain pouvant le fragiliser ou le casser.

1. Réception et stockage des matières premières

L'évaluation des pertes après récolte peut s'évaluer autour de 3 thématiques : les pertes qualitatives, les pertes quantitatives et les pertes économiques (Figure 11).



D'après Pulse chemistry and technology, 2012
Figure 11 : Causes des pertes post-récolte des légumes secs

Dès la réception, les matières premières subissent un contrôle d'agrégage avant stockage. Elles doivent être conformes aux critères de qualité stipulés dans le cahier des charges. En effet, tout dommage mécanique survenu lors de la récolte ou pendant l'entreposage peut altérer la qualité dans la conserve : agglutination ou casse (CTCPA, 2013a). Les différents critères qualité sont définis par le Codex Alimentarius :

- De manière générale, les légumes secs doivent être sains et propres à la consommation humaine. Ils doivent être exempts d'odeurs, de goûts anormaux, d'insectes vivants, mais aussi de souillures (impuretés d'origine animale) pouvant présenter un risque pour la santé humaine.
- La teneur en eau des légumes secs est donnée en fonction des conditions de stockage. Pour des conditions de stockage à long terme il est recommandé une teneur en eau de 15% pour les haricots et les lentilles. Pour un stockage à court terme des teneurs en eau de 19% (haricots) et 16% (lentilles) sont suggérées.
- Il est toléré 1% de matières étrangères dont maximum 0,25% d'origine minérale et 0,10% au plus de débris d'insectes et/ou d'autres impuretés d'origine animale.
- Les légumes secs doivent être exempts de graines toxiques ou nocives en quantités susceptibles de nuire à la santé humaine : crotalaire (*Crotalaria* spp.), nielle des blés (*Agrostemma githago* L.), ricin (*Ricinus communis* L.), stramoine (*Datura* spp.), et autres graines généralement reconnues dangereuses pour la santé.

- La présence de contaminants tels que les métaux lourds, les résidus de pesticides et les mycotoxines doivent être conformes aux limites fixées par la Commission du Codex Alimentarius
- Les légumes secs doivent répondre aux exigences d'hygiène, être conditionnés et étiquetés selon les règles décrites dans le Codex (Programme mixte FAO/OMS sur les normes alimentaires et al., 2007).

Les conditions d'entreposage des légumes secs influent sur leur composition biochimique et par conséquent sur leur aptitude technologique à l'appertisation. Les conditions optimales de stockage correspondent à des températures inférieures à 25°C et une humidité relative inférieure à 65% (Tiwari et Singh, 2012). De plus, les études de Rani et al. (2013) et Sravanthi et al. (2013) ont déterminé les teneurs en eau maximales que devaient contenir les grains de lentilles (17,5%) et de haricots (14%) afin de limiter les pertes. Des conditions de stockage chaudes et humides entraînent la rigidité de l'enveloppe et induisent l'activation d'enzymes (amylases et phytases). Celles-ci vont alors dégrader l'amidon et l'acide phytique. L'amidon n'absorbe plus l'eau pendant le trempage et l'hydrolyse de l'acide phytique libère des ions divalents qui vont aller se complexer avec les pectines pour former des pectates insolubles (Pirhayati, Soltanizadeh, et Kadivar, 2011). Ces dernières jouent un rôle essentiel dans la fermeté des légumes appertisés. Ainsi de mauvaises conditions de stockage entraînent une diminution de la capacité d'absorption de l'eau (Tiwari et Singh, 2012). De mauvaises conditions de stockage entraînent également des changements de coloration des légumes secs due à une réaction entre les glucides et les protéines. Ainsi le temps de stockage, la température, l'humidité relative et la teneur en eau du grain sont des paramètres importants qui influencent le temps de cuisson et le ramollissement de la texture (Tableau 4) (Tiwari et Singh, 2012).

Tableau 4 : Quelques effets du stockage sur la qualité de cuisson

Conditions de stockage	Influence sur la qualité
Haute température de stockage (30-35°C)	Augmentation de la dureté des grains et du temps de cuisson
Teneur en eau des grains stockés	La dureté du grain entraîne une absorption de l'eau plus lente pendant la cuisson
Durée de stockage	Apparition du phénomène de grain difficile à cuire (« hard to cook »)
Humidité relative élevée (> 80%) de stockage	Augmentation de la teneur en eau du grain favorisant le développement de moisissures
Humidité relative basse (12-35%) de stockage	Diminution de la teneur en eau du grain Augmentation du temps de cuisson Diminution de la gélatinisation de l'amidon pendant la cuisson

D'après Pulse chemistry and technology, 2012

2. Trempage

La première étape du procédé de fabrication consiste en un lavage des légumes secs, permettant d'éliminer tous corps étrangers. Les légumes sont ensuite mis à tremper pendant 12 à 14 heures à température ambiante (Tiwari et Singh, 2012). Les haricots peuvent reprendre jusqu'à 80% de leur poids et atteindre une teneur en eau voisine de 55%. L'étude de Taiwo, Akanbi, et Ajibola (1998) a montré que la quantité d'eau absorbée par unité de masse augmentait pendant le temps de trempage. L'eau dans laquelle les légumes sont trempés peut être renouvelée toutes les 4 à 6 heures, ce qui limite le développement bactérien. Il existe de nombreuses solutions permettant de limiter le temps

de trempage, notamment l'ajout d'une solution alcaline saline, effectuer le trempage dans une eau chaude (entre 82°C et 100°C) ou encore l'utilisation des ultrasons ou d'un gradient de pression (CTCPA, 2013a ; Ghafoor et al., 2014 ; Zanella-Díaz et al., 2014). Néanmoins cette réhydratation rapide entraîne une réhydratation moindre que lors d'un trempage en eau froide, mais il permet d'augmenter la fermeté des grains, de limiter le taux de casse et de limiter l'apparition d'une saveur aigre dans la conserve (CTCPA, 2013a ; Abu-Ghannam, 1998).

La technique de trempage permet de diminuer le temps de cuisson. Au bout de 10 heures, la capacité d'absorption de l'eau commence à arriver à son maximum, cependant celui-ci n'est atteint qu'au bout de 14 heure de trempage (Abu-Ghannam, 1998 ; Wang, Chang, et Grafton, 1988).

Cette étape entraîne l'activation des phytases qui vont alors dégrader l'acide phytique, ce qui va influencer sur la fermeté des légumes secs (Pirhayati, Soltanizadeh, et Kadivar, 2011 ; Tiwari et Singh, 2012). Elle entraîne également une diminution de la teneur en facteurs antinutritionnels et une perte en minéraux (EIMaki et al., 2007).

Des sels de minéraux peuvent être ajoutés à l'eau de trempage, de façon à rendre plus tendres les légumes secs. Les sels de chlorure (NaCl) et/ou le bicarbonate de sodium (NaHCO₃) agissent sur les membranes au niveau du tégument, ce qui favorise la pénétration de l'eau dans la cellule. Ils induisent la gélatinisation de l'amidon ainsi que le ramollissement de l'enveloppe. Cependant l'utilisation de ces sels de minéraux a des limites puisqu'ils peuvent donner un goût indésirable dans les conserves (CTCPA, 2013a).

L'effet inverse peut être obtenu en ajoutant des ions calcium ou magnésium dans l'eau de trempage. Ceux-ci vont alors créer des ponts salins dans la lamelle moyenne et entraînant un raffermissement des grains. Toutefois la présence excessive d'ions calcium dans les eaux de trempage empêcherait l'absorption de l'eau (CTCPA, 2013a ; Pirhayati, Soltanizadeh, et Kadivar, 2011).

Le pH du milieu dans lequel évoluent les grains influence la réhydratation. L'ajout d'acide éthylène diamine tétra acétique (EDTA), abaisse le pH, ce qui inhibe le gonflement de l'amidon et des protéines, diminuant l'absorption de l'eau et par conséquent donnant une plus grande fermeté aux produits finis (CTCPA, 2013a).

3. Blanchiment

Le blanchiment est un traitement thermique permettant l'inactivation d'enzymes, l'amélioration de la réhydratation, le raffermissement des tissus, l'évacuation des gaz contenus dans les tissus (ce qui facilite l'emboitage) et la réduction de la charge microbienne. L'efficacité du blanchiment se détermine par l'évaluation de l'activité de la peroxydase et de la catalase. Il consiste à mettre la matière première en contact avec de l'eau chaude, de l'air chaud ou de la vapeur pendant un temps donné en fonction du produit et/ou des enzymes à inhiber. Le temps et la température de blanchiment sont déterminés en fonction du type et de la taille des légumes secs, de la méthode de chauffage et de la température de chauffage moyenne (Clark, Jung, et Lamsal, 2014). Généralement le blanchiment s'effectue à une température comprise en 70°C et 100°C pour un temps allant de 1 à 15 minutes (Brennan, Grandison, et Wiley InterScience (Online service), 2011). La bonne maîtrise des paramètres de blanchiment permet de limiter/éviter la perte de texture, de poids, de couleur et de nutriments. En effet un surblanchiment pourrait conduire à une fermeté excessive et à une perte de saveur du légume (Fellows, 2009).

La pratique d'un blanchiment rapide à de hautes températures suffit à augmenter la fermeté des légumes secs appertisés et à diminuer l'agglutination des grains (Wang, Chang, et Grafton, 1988). La dureté de l'eau utilisée pour le blanchiment a aussi un impact sur la tenue des légumes secs. Une eau dure limite l'éclatement des grains ainsi que la diffusion de l'amidon. Une eau douce entraîne la dispersion de l'amidon, la fragmentation des téguments et des cotylédons dans le jus de couverture (CTCPA, 2013a ; USA dry pea & lentil council, 2010).

4. Appertisation

Le traitement d'appertisation à des températures supérieures à 100°C vient finaliser la cuisson des légumes secs. Cette étape du procédé doit permettre l'inactivation des spores bactériennes. Le traitement thermique doit pouvoir rendre le produit fini exempt de microorganismes capable de se multiplier dans le produit fini conservé dans des conditions de stockage et de distribution non réfrigérée. Il doit aussi être indemne de cellules ou de spores microbiennes viables présentant un risque pour la santé humaine. L'utilisation de cette technique de conservation permet de conserver les produits appertisés pendant 2 ans voire plus à température ambiante (Clark, Jung, et Lamsal, 2014). La cuisson s'effectue en deux étapes : une absorption hydrique rapide puis un ramollissement de la texture par la chaleur dû à la dénaturation des protéines. Pendant la cuisson, l'hydratation et le gonflement des polysaccharides (cellulose, hémicellulose et pectine) favorisent le ramollissement de l'enveloppe. Les échanges d'ions divalents Ca^{2+} et Mg^{2+} contre des ions Na^+ et K^+ entraînent une perte de cohésion cellulaire, ce qui serait à l'origine de ce changement de texture (CTCPA, 2013a). En présence d'un excès d'eau (> 70%) et à des températures supérieures à 60°C, l'amidon est gélatinisé et va alors se solubiliser. Cela se traduit par un gonflement irréversible des grains d'amidon et une modification de l'organisation observable en microscopie par perte de biréfringence (diffusion de l'amylose hors du grain d'amidon gonflé). La gélatinisation de l'amidon conduit à la formation d'un empois constitué de fantômes de grains d'amidon (rémanence de grains gonflés riches en amylopectine) et des macromolécules en solution (Fardet, Souchon, et Dupont, 2013). Le traitement thermique va aussi avoir un impact sur la couleur (anthocyanes et caroténoïdes) (Awuah, Ramaswamy, et Economides, 2007). Ces changements entre les légumes secs et le milieu dans lequel ils évoluent est conditionné par la teneur en sel ou en sucre du milieu de cuisson (Roudaut et Lefrancq, 2005) ou encore l'ajout d'ingrédients acides. En effet, ceux-ci durcissent les légumes secs (Fortin, 1996).

5. Principaux défauts de qualité des produits finis

Le point II.B.4 évoquait des changements de texture et de couleur, ce sont principalement sur ces deux aspects que se joue la qualité du produit fini.

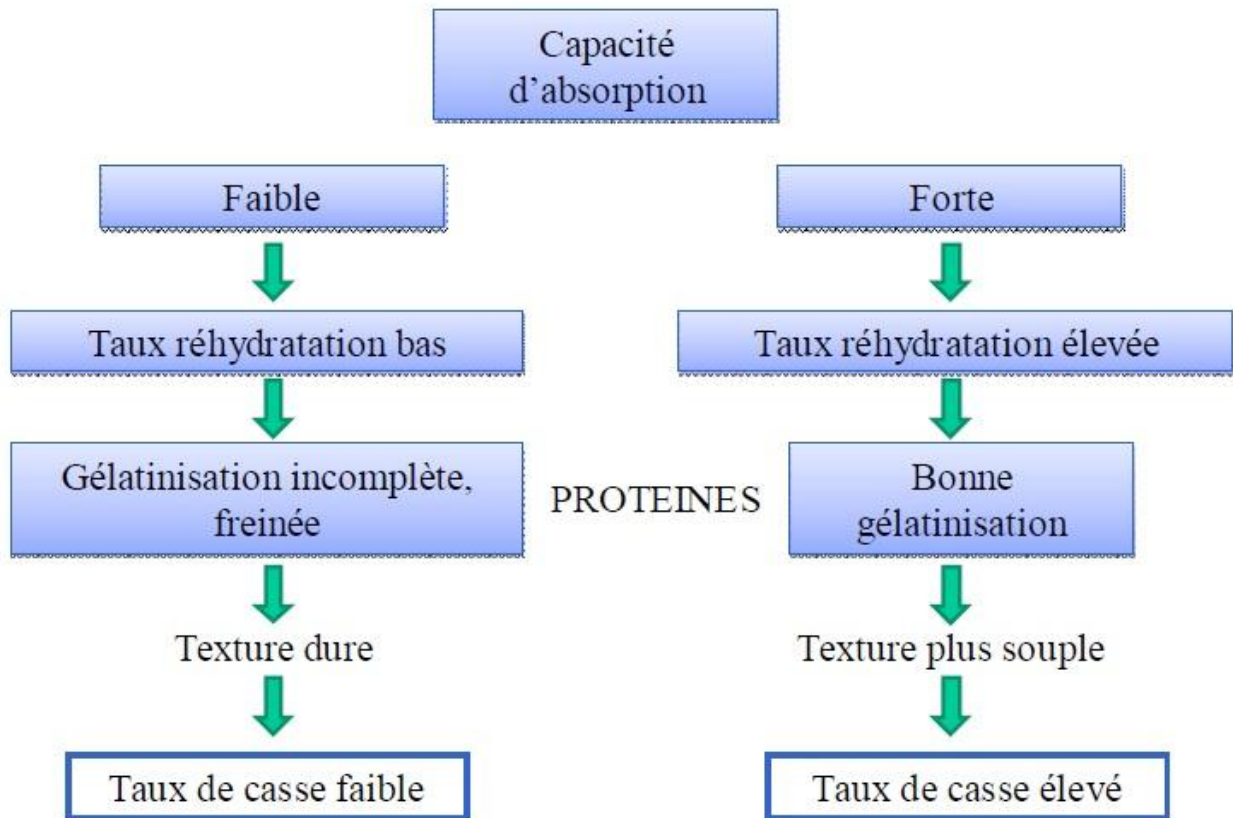
Le changement de couleur peut avoir lieu pendant le procédé de fabrication à différentes étapes : le trempage, le blanchiment et la cuisson. Généralement, les pigments sont sensibles à l'activité de l'eau, la lumière, le pH et l'oxygène. Pendant les étapes de trempage et de blanchiment il y a une décoloration des légumes secs. Néanmoins la sensibilité des pigments à différents facteurs diffèrent selon leur composition chimique (Tableau 5) (Delacharlerie et al., 2008).

Tableau 5 : Sensibilité de deux pigments aux facteurs de décoloration

PIGMENT	FACTEURS			
	pH	Température	Lumière	O ₂
Anthocyanes	-	-	+/-	+
Caroténoïdes	+	+/-	+/-	-

D'après HACCP Organoleptique, 2008

Le changement qui se produit lors de la cuisson dépend du pigment contenu dans le légume sec. Les anthocyanes vont brunir sous l'effet de la chaleur, phénomène principalement lié à la réaction de Maillard qui résulte de la dégradation des glucides (Jiménez Elizondo, 2011). Les caroténoïdes perdent de leur intensité à la cuisson suite à un changement (isomérisation) de composé (Awuah, Ramaswamy, et Economides, 2007).



D'après Aptitude technologique des légumes secs pour l'appertisation, 2012

Figure 12 : Schéma explicatif du taux de casse

Le phénomène de grains difficiles à cuire ou « hard to cook », entraînant une prolongation du temps de cuisson, est principalement dû aux conditions de stockage (humidité relative et température). Ce défaut de texture serait lié à la lignification des parois cellulaires dont une enzyme thermorésistante, la peroxydase, serait responsable en polymérisant des composés phénoliques. Ainsi des conditions de stockage à une humidité relative et des températures élevées favorisent ce défaut. Les légumes secs « hard to cook » voient leur capacité d'hydratation diminuer pendant le procédé, ce qui empêche les légumes de se ramollir suffisamment pendant le trempage et après cuisson (Pirhayati, Soltanizadeh, et Kadivar, 2011 ; Rivera et al., 1989).

Le taux de casse serait principalement lié à la capacité d'absorption de l'eau qui est en lien avec la gélatinisation de l'amidon. Une faible capacité d'absorption entraîne une faible réhydratation des légumes secs ce qui va limiter la gélatinisation de l'amidon lors de la cuisson. La gélatinisation de l'amidon étant freinée, le taux de casse sera donc faible (Figure 12) (CTCPA, 2012). De plus, le ramollissement des légumes secs est dû à un échange d'ions calcium et magnésium au profit d'ions sodium et potassium par pression osmotique. Grâce à la mesure de la conductivité il est alors possible d'anticiper la casse puisque plus la conductivité est importante et plus la casse est importante (CTCPA, 2000).

L'étude bibliographique permet de mieux comprendre comment les légumes secs peuvent interagir avec leur milieu, et que leur aptitude technologique à l'appertisation reste très dépendante des facteurs intrinsèques des grains. Toutefois il existe des moyens de pilotage du procédé de fabrication afin de tenter de réduire les écarts de qualité dans le produit fini.

Ainsi l'utilisation d'une méthode permettant la caractérisation des légumes secs dès la réception, permettrait de limiter les écarts de qualité en agissant sur différents paramètres.

III. Evaluation du test rapide de caractérisation des légumes secs à réception

A. Application du protocole du CTCPA

1. Présentation de l'étude du CTCPA

A l'origine de ce projet, une demande émise par les conserveurs afin d'améliorer la qualité de leurs conserves, puisqu'à la différence des autres productions légumières nationales, les approvisionnements ne sont pas maîtrisés. Ceux-ci sont la plupart du temps réalisés par des intermédiaires (courtiers et négociants spécialisés) qui importent les légumes secs en fonction de l'offre du marché sur des critères sanitaires (insectes) et macroscopiques (grains cassés, matières étrangères). Ce niveau d'agrégation ne permet pas de déceler d'éventuels défauts qui apparaîtraient lors de la réhydratation et pouvant conduire après cuisson et stérilisation à des conserves non conformes aux exigences qualitatives du cahier des charges de la distribution des produits finis (CTCPA, 2000). Les intervenants du projet de recherche collective étaient des industriels de la conserve et le CTCPA qui coordonnait les recherches. L'objectif de cette étude était la caractérisation rapide des lots de lentilles, de haricots rouges et de haricots blancs en :

- Sélectionnant des critères de différenciation de la matière première (taux d'humidité, taux de matière sèche, taux protéique,...)
- Caractérisant la matière première en fonction de son origine et des différentes variétés présentes sur le marché (rendement, tenue des grains à l'appertisation, pourcentage de cassés, ...)
- Déterminant une technique rapide de caractérisation de la matière première

Elle pourrait à terme permettre aux industriels soit d'optimiser la conduite des différentes opérations unitaires soit de déterminer l'acceptabilité d'un lot vis-à-vis d'un procédé standard.

Cette étude sur le comportement technologique des légumes secs a permis de montrer que certaines caractéristiques de la matière première peuvent permettre de différencier des lots (A_w , longueur de grains). Mais les caractéristiques de différenciation des lots semblent essentiellement liées aux conditions de stockage après récolte (souvent non maîtrisées et dont la traçabilité est très médiocre). L'utilisation de mesures et de tests technologiques sur les grains à l'état hydraté semble donc essentielle.

Les différents résultats de l'étude menés par le CTCPA sont les suivants. Le trempage permet l'hydratation des légumes secs et favorise l'échange d'ions avec l'eau. Au cours du blanchiment l'hydratation diminue mais la gélatinisation de l'amidon et l'absorption des ions calcium et magnésium par les légumes secs induisant le pontage des pectines, font qu'elle se poursuit pendant la stérilisation.

La casse des légumes secs n'est pas liée directement à la variété mais à de nombreux facteurs tels que les conditions de récolte et de stockage, les caractéristiques intrinsèques d'hydratation du grain, les modes de transformation industriels (manipulations, procédé d'appertisation, dureté de l'eau...) y contribuent. Le temps de cuisson entraîne une destruction progressive des grains puisqu'ils absorbent l'eau, se cassent, et perdent une partie de la matière sèche et des ions.

Tous ces résultats ont abouti à l'établissement d'un protocole de test de cuisson en autocuiseur (Annexe 1). Celui-ci doit permettre de discriminer des lots de légumes secs qui pourraient avoir une mauvaise aptitude technologique. Ce test repose sur l'évaluation du taux de casse et de la mesure de la conductivité de l'eau cuisson. Cependant son utilisation repose sur un modèle statistique reliant le taux de casse en autoclave avec le taux de casse en autocuiseur et la conductivité de l'eau de cuisson :

Taux de casse autoclave

$$= a + (b \times \text{Taux de casse en autocuiseur}) + (c \times \text{Conductivité autocuiseur})$$

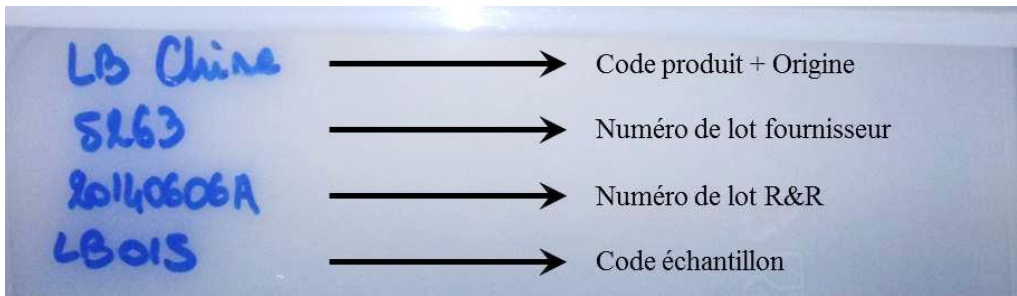
Toutefois la méthode devra être adaptée à chaque procédé de transformation afin de tenir compte de toutes les variations possibles au cours d'un cycle complet d'appertisation (CTCPA, 2013a).

De ce fait, pour appliquer cette méthode et qualifier la matière première, il y aura deux étapes : tout d'abord la réalisation d'essais en autocuiseur, puis des essais réalisés en stérilisateur. Afin de caractériser et d'éventuellement définir d'autres critères de sélection des légumes secs, différents tests/mesures viendront compléter le protocole établi par le CTCPA. De plus tout au long des diverses manipulations, des photographies permettront de suivre l'aspect visuel des légumes secs.

2. Conditions de réalisation des essais

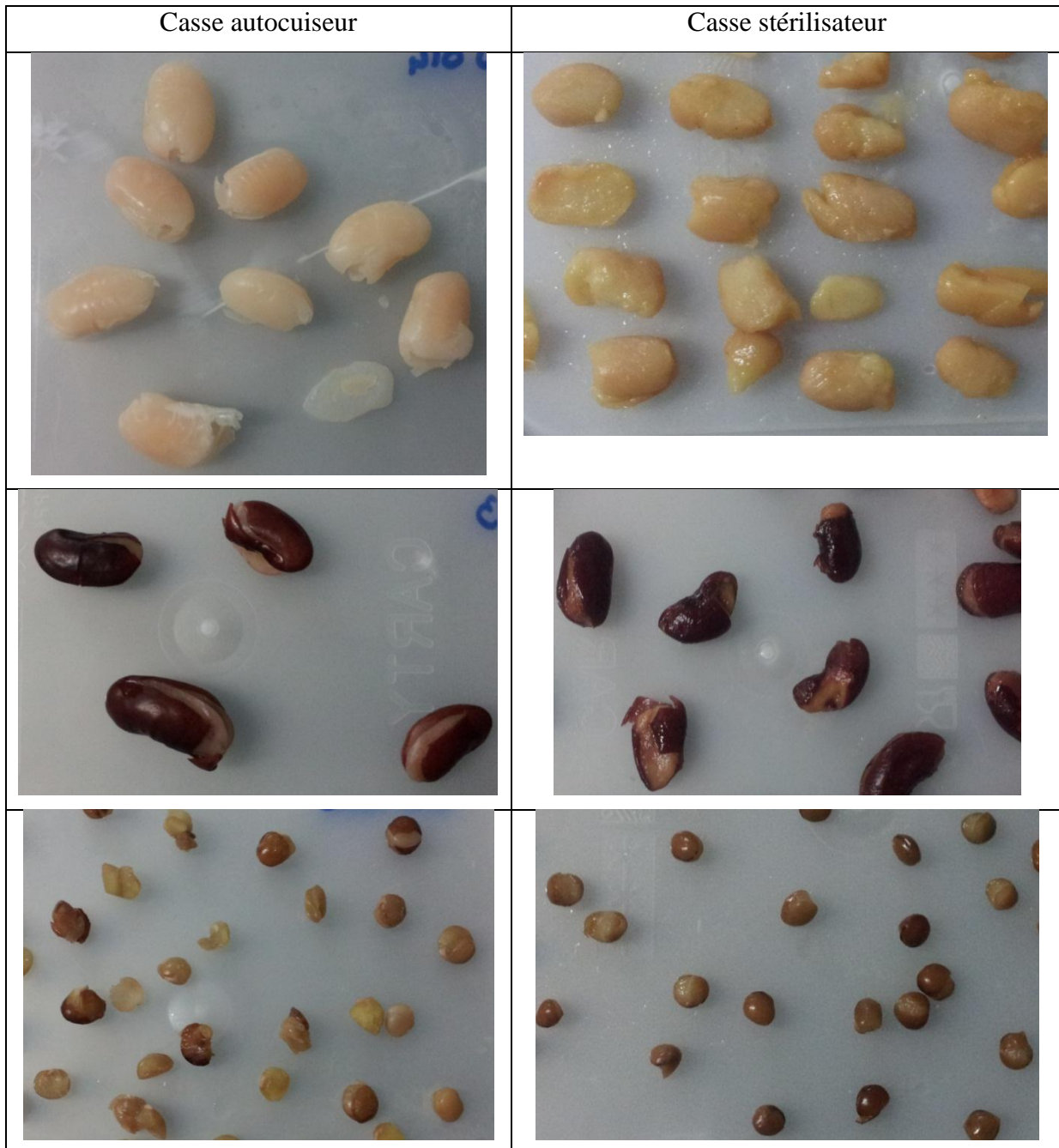
Afin de déterminer les différents coefficients a, b et c du modèle statistique, les différents essais réalisés en autocuiseur et en autoclave doivent être conduits de la même manière. Le nombre de mesures à réaliser est fixé à 20 mesures indépendantes (taux de casse et conductivité de l'eau de cuisson). Celui-ci est fixé au nombre de vingt car il s'agit du minimum de mesures à réaliser pour établir le modèle (CTCPA, 2014) et cela permet de limiter la période de manipulation afin de laisser plus de temps pour l'interprétation des résultats et la mise en œuvre de tests/mesures complémentaires.

Comme mentionné en II.A, l'étude portera sur trois catégories de légumes secs : les lentilles, les haricots rouges et les haricots blancs. R&R est amené à utiliser différentes variétés de légumes secs en fonction de ses recettes. C'est pourquoi les tests seront réalisés sur des lentilles blondes (testées dans une recette de lentilles cuisinées), sur des haricots rouges (testés dans du chili con carne) et deux variétés de haricots blancs, les GN et les lingots (testés dans des recettes de cassoulet).



Source personnelle

Figure 13 : Traçabilité des échantillons (exemple de la lentille)



Source personnelle

Figure 14 : Casse de différents lots de légumes à l'autocuiseur et à l'autoclave

3. Echantillonnage

A chaque réception de légumes secs, deux ou trois prélèvements sont effectués par lot réceptionné. Pour les légumes réceptionnés fréquemment, uniquement deux prélèvements sont effectués afin de privilégier la variabilité des légumes secs. Les matières premières testées sont issues d'une origine constante pour chaque légume (il n'a pas été possible de tester plusieurs origines). Les différents lots arrivent dans des sacs et non en vrac, un prélèvement sur un sac correspondra à un échantillon. Il a été montré qu'au sein d'un même lot il existait une certaine variabilité de la matière première (Bhatty, Nielsen, et Slinkard, 1983 ; Bishnoi et Khetarpaul, 1993 ; CTCPA, 2013b). De ce fait les prélèvements sont effectués sur des sacs choisis au hasard et de préférence sur des palettes distinctes. Chaque échantillon est identifié avec son origine, le numéro de lot du fournisseur, le numéro de lot attribué par l'entreprise ainsi que le code de l'échantillon (Figure 13).

4. Réalisation des essais en autocuiseur

a) Test en autocuiseur

Les essais en autocuiseur sont réalisés à partir du protocole standardisé établi par le CTCPA pour les différents industriels (Annexe 1).

Une masse de 200 g de légumes secs est prélevée puis placée dans le panier vapeur de l'autocuiseur (autocuiseur SEB optima classic). Les légumes sont ensuite immergés dans 2 L d'eau, cette quantité est en excès ce qui permet de prélever l'eau de cuisson par la suite pour la mesure de conductivité. La cuisson de 10 minutes débute après 8 minutes de mise sous pression de l'autocuiseur. La montée en pression de l'autocuiseur est réalisée par un fort chauffage et la cuisson est réalisée à feu doux. Après cuisson, l'autocuiseur est placé sous l'eau courante afin de le pré-refroidir et de faire retomber la pression. Les légumes secs sont égouttés pendant 10 minutes à température ambiante. Afin d'évaluer le taux de casse autocuiseur, selon le légume sec considéré, il faudra prélever 100 g de haricots ou 20 g de lentilles.

b) Evaluation du taux de casse

Dans les 100 g ou 20 g prélevés, les individus cassés et fendus sont séparés du reste de l'échantillon puis pesés (Figure 14). L'évaluation des individus cassés et fendus est réalisée grâce à des abaques photos fournies par le CTCPA.

Le taux de casse autocuiseur correspond à la masse de grains fendus et cassés pour 20 g ou 100 g, et est donc évalué de la manière suivante :

$$\text{Taux de casse autocuiseur} = \frac{\text{Masse de légumes secs fendus et cassés}}{\text{Masse prélevée après cuisson}}$$

c) Mesure de la conductivité

La conductivité correspond à l'aptitude d'une solution à faire passer le courant électrique entre deux électrodes. Le courant est transporté par les ions, c'est-à-dire que la conductivité augmente avec le nombre et la mobilité des ions présents en solution (Dalmas, 2000). Ainsi pour ce test, la mesure de la conductivité permettra d'apprécier la minéralisation de l'eau au cours de la cuisson. Elle permet aussi d'évaluer la variation de la dureté après cuisson du légume sec (Miceli et Miceli, 2012). La mesure de conductivité est réalisée selon la norme AFNOR NF EN 27888 (janvier 1994).

5. Réalisation des essais en stérilisateur

a) Test en autoclave

Afin de standardiser les essais, il a été choisi une recette pour chacun des légumes secs (la plus fréquemment produite par l'entreprise). De plus, la consigne d'emboitage sera la même pour tous les échantillons d'une même variété (consigne d'emboitage évaluée par la qualité). Pour chaque échantillon, 3 boîtes au format ½ (Ø 73 mm, hauteur 110 mm, contenance 425 ml) sont réalisées. La réalisation de 3 boîtes servira pour l'évaluation du taux de casse et la réalisation des tests complémentaires (voir III.B). Afin d'optimiser le temps, tous les ingrédients sont récupérés en production (sauces, charcuteries, légumes frais ou congelés). La réalisation des essais suit le diagramme présenté en Figure 10. L'établissement des modèles est réalisé sur une recette de lentilles cuisinées, sur deux cassoulets et une recette de chili con carne. La stérilisation est réalisée en rotation axiale (boîtes couchées) soit sur ligne de production (Hydrolock horizontal), soit sur le pilote dont dispose l'entreprise pour des couples temps-température indiqués dans le Tableau 6. Dans la partie III.B.4, l'analyse des résultats permettra de définir si l'utilisation des deux outils de stérilisation a une incidence sur les coefficients du modèle établi.

Tableau 6 : Barème de stérilisation, temps de trempage et de blanchiment des différents légumes secs

	Temps de trempage (heures)	Temps de blanchiment (minutes)	Barème de stérilisation
Lentille	5	4	23,5 minutes à 128°C
Haricot blanc GN	6	4	25 minutes à 130°C
Haricot blanc Lingot	6	4	25 minutes à 130°C
Haricot rouge	6	6	35 minutes à 133°C

D'après documents qualité internes de R&R, 2009-2010

b) Mesure du taux de casse

La mesure du taux de casse en stérilisateur s'effectue 15 jours après la réalisation des essais. En effet, il s'agit du temps nécessaire pour que les échanges entre l'aliment et le jus de couverture se stabilisent. Pour l'appréciation du taux de casse sur produit transformé la méthode est similaire à celle utilisée pour évaluer le taux de casse en autocuiseur. Toutefois les échantillons prélevés sont égouttés et rincés afin de mieux pouvoir apprécier les différents défauts qui pourraient éventuellement être dissimulés sous le jus de couverture. Le taux de casse en autoclave est donné par l'équation suivante :

$$\text{Taux de casse en autoclave} = \frac{\text{Masse de légumes secs fendus et cassés}}{\text{Masse de légumes secs emboîtée}}$$

6. Etablissement des modèles statistiques

Après réalisation de 20 mesures indépendantes, sur chaque légume sec à étudier et pour une recette donnée, le modèle statistique peut être établi. Les coefficients du modèle sont obtenus grâce à une régression multiple à l'aide du tableur Excel. Les modèles obtenus sont testés afin de pouvoir évaluer si le taux de casse prédit par le modèle permet d'anticiper le taux de casse réel. Le modèle est évalué grâce à 20 mesures réalisées sur les échantillons ayant servi pour l'établissement de ceux-ci. D'autres lots auraient pu être intégrés à l'étude cependant les résultats n'auraient pas pu apparaître dans l'étude.

B. Tests/mesures complémentaires au protocole du CTCPA

Le protocole établi par le CTCPA ne prend en compte que des taux de casse et la conductivité de l'eau de cuisson en autocuiseur, or R&R utilise certains tests pour pouvoir piloter le procédé afin d'assurer la qualité du produit fini. C'est pourquoi le suivi de ces paramètres déjà en place dans l'entreprise est intégré à l'étude de manière à voir s'il existe des corrélations entre les tests déjà mis en place et le test en autocuiseur. Les corrélations seront établies par le test de Pearson. Afin d'évaluer au mieux les corrélations qu'il pourrait exister, l'analyse des résultats ne portera pas directement sur le tableau de corrélation mais sur les p-values et les p-values corrigées (méthode de la correction de Holm). Ainsi, certains critères pourraient par la suite être utilisés dans les cahiers des charges internes ou destinés aux fournisseurs.

1. Le calibre

La mesure du calibre permet de déterminer la taille des graines. Chaque mesure de calibre est réalisée sur des légumes parfaitement intègres. Selon le légume sec considéré, il est mesuré de la manière suivante :

- Pour les lentilles : 1000 graines sont dénombrées puis pesées. Le calibre est exprimé en poids pour 1000 graines
- Pour les haricots : 100 g sont pesés puis le nombre de graines constituant ces 100 g sont comptées. Le calibre est exprimé par un nombre de graines aux 100 g.

2. Le rendement

Le rendement (utilisé chez R&R) permet d'apprécier la prise en masse du légume sec, celui-ci peut être réalisé à différentes étapes du procédé. Ils s'expriment de la manière suivante :

- Rendement après trempage

$$Rdt = \frac{\text{Masse de légumes secs égouttée après trempage}}{\text{Masse de légumes secs prélevée}}$$

- Rendement de stérilisation

$$Rdt = \frac{\text{Masse de légumes secs égouttée après stérilisation}}{\text{Masse de légumes secs emboîtée}}$$

- Rendement autocuiseur

$$Rdt = \frac{\text{Masse de légumes secs après cuisson}}{\text{Masse de légumes secs prélevée}}$$

3. La capacité d'hydratation

La capacité d'hydratation permet d'apprécier la quantité d'eau maximale que peut absorber le légume sec. Elle donne une indication de l'aptitude à la cuisson du légume sec et est corrélée positivement avec le poids des grains et leur capacité de gonflement. Pour l'évaluer, 50 graines de légume sec sont mis à tremper dans 100 ml d'eau distillée pendant 15 h à température ambiante. Généralement, au bout de 14h de trempage, les légumes secs n'absorbent plus ou très peu d'eau (Abu-Ghannam, 1998 ; Wang, Chang, et Grafton, 1988). Au bout des 15 h les légumes secs sont égouttés, mis sur du papier absorbant afin de retirer l'excédent d'eau en surface puis pesés. La capacité d'hydratation s'exprime par la relation suivante (Ibarz, González, et Barbosa-Cánovas, 2004 ; Tiwari et Singh, 2012) :

$$\text{Capacité d'hydratation} = \frac{\text{masse de légumes après trempage} - \text{masse de légumes avant trempage}}{50}$$

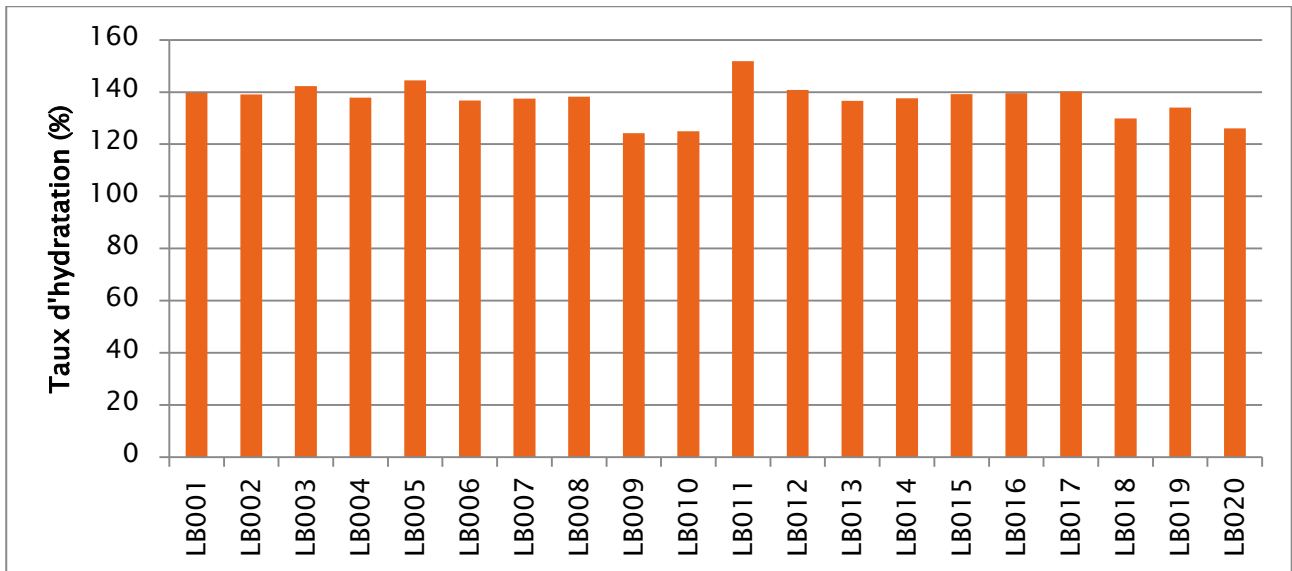


Figure 15 : Taux d'hydratation des lentilles après cuisson en autocuiseur

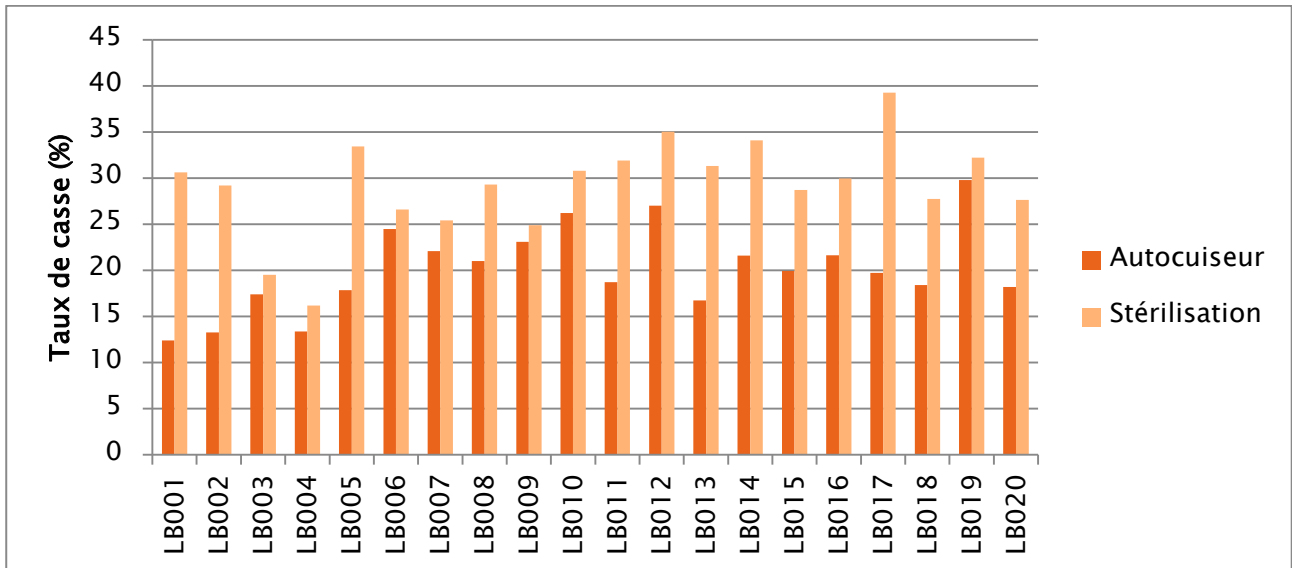


Figure 16 : Taux de casse des lentilles après cuisson en autocuiseur et appertisation

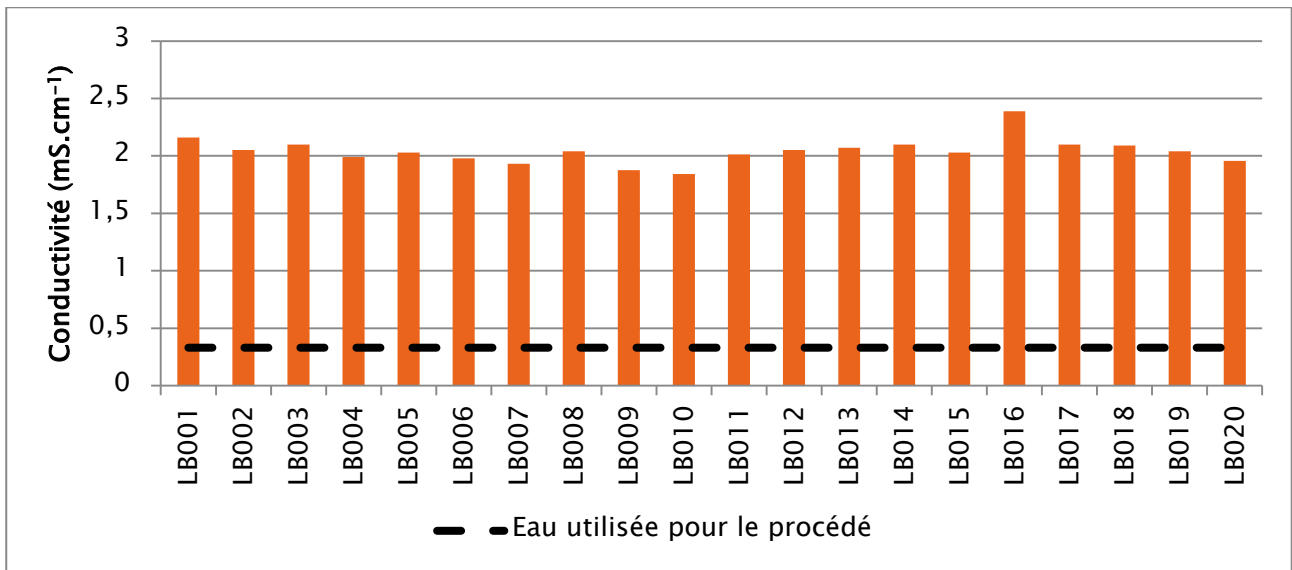


Figure 17 : Conductivité de l'eau après cuisson en autocuiseur

4. La mesure de dureté

La mesure de dureté permet d'évaluer la texture des légumes secs après cuisson. Celle-ci est évaluée à l'aide d'un pénétromètre (Koehler K19500), qui va mesurer la résistance à l'enfoncement d'un corps spécifique. Selon l'état du légume sec (cru, trempé, cuit), le type d'aiguilles utilisée sera différent (utilisation d'une aiguille fine lorsque le légume est cru ou trempé, utilisation de l'aiguille épaisse lorsque le légume est cuit). L'évaluation de la dureté s'effectue sur 15 graines de chaque échantillon, la moyenne de ces 15 mesures correspond à la dureté de l'échantillon. Elle est réalisée après le test en autocuiseur et le test en autoclave, mais uniquement sur les haricots rouges et les haricots blancs. La mesure de dureté n'est pas réalisée sur les lentilles puisqu'il y a un risque de blessure pour l'opérateur et l'épaisseur de la lentille est trop faible pour obtenir une mesure correcte.

5. Détermination du taux de casse cible acceptable

Cette appréciation visuelle doit permettre de déterminer la valeur cible du taux de casse acceptable sur produit fini. Il est ainsi créé des gammes de taux de casse. Entre chaque échantillon, un écart de 5% de casse a été choisi. Pour les lentilles elle s'étend de 16% à 39% de casse ; pour les GN, elle varie de 35% à 54% ; pour les lingots, les valeurs s'échelonnent entre 12% et 44% et pour les haricots rouges, les valeurs sont comprises entre 13% et 30%.

C. Résultats et discussions des expérimentations

1. Les lentilles

a) Caractérisation en autocuiseur et après cycle complet de fabrication

(1) En autocuiseur

- Caractéristiques après cuisson des légumes secs

Le taux d'hydratation moyen des lentilles est de 137% ($\pm 6,67$) et varie de 124% à 150% (Figure 15). Celui-ci est à peu près constant pour tous les échantillons testés. Le taux de casse en autocuiseur moyen est de 20% ($\pm 4,59$) et varie de 12% à 29% alors que le taux de casse en autoclave est de 29,19% ($\pm 5,19$) varie 16% à 39% (Figure 16). Les échantillons ayant un faible taux de casse autocuiseur ne sont pas obligatoirement ceux ayant le taux de casse autoclave le plus faible. Toutefois le taux de casse reste lié à la capacité d'hydratation puisque des échantillons comme LB012 se réhydratent fortement et présentent un taux de casse en autocuiseur élevé.

- Caractéristique de l'eau de cuisson

Au cours de la cuisson, la conductivité de l'eau augmente (Figure 17). Elle passe ainsi de $0,330 \text{ mS.cm}^{-1}$ à 2 mS.cm^{-1} . La conductivité moyenne des échantillons est autour de $2,04 \text{ mS.cm}^{-1}$ ($\pm 0,11$). Les valeurs s'étendent de $1,84 \text{ mS.cm}^{-1}$ à $2,39 \text{ mS.cm}^{-1}$. Pendant la cuisson plusieurs phénomènes se produisent, tels que la dénaturation des protéines, la gélatinisation et le gonflement de l'amidon ou encore des phénomènes de ruptures cellulaires entraînant des pertes de matières premières et ioniques dans le milieu de cuisson (Sajo Nana et Michiels, 1990). Ces dernières entraînent l'augmentation de la conductivité notamment pour les échantillons ayant un taux de casse élevé.

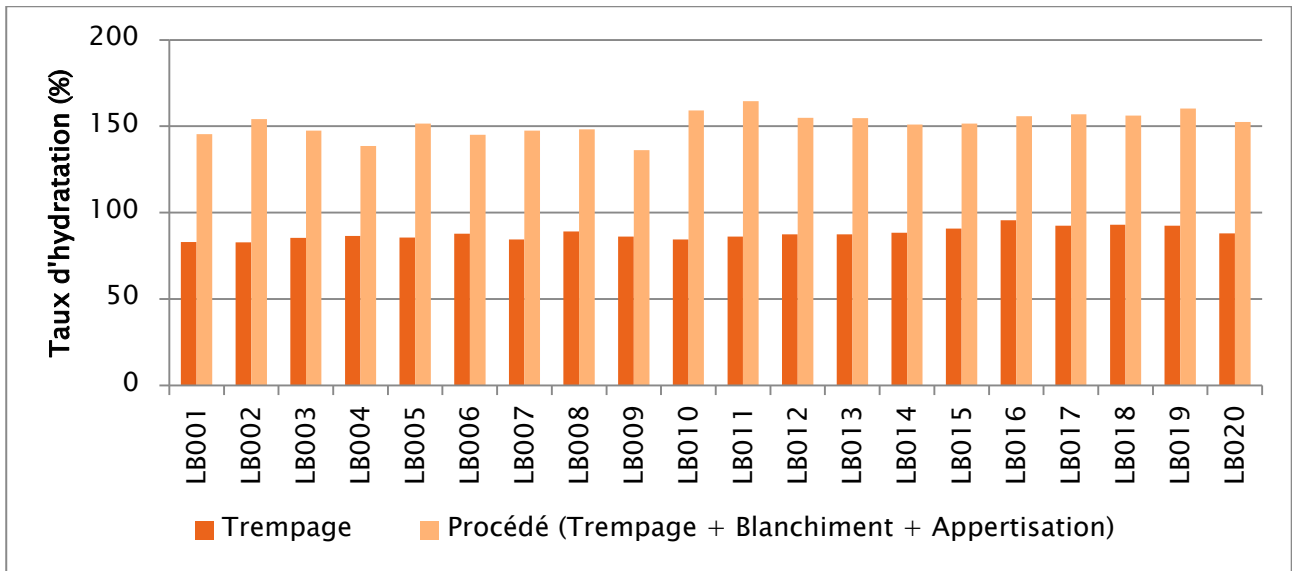


Figure 18 : Taux d'hydratation des lentilles après trempage et cycle complet de fabrication

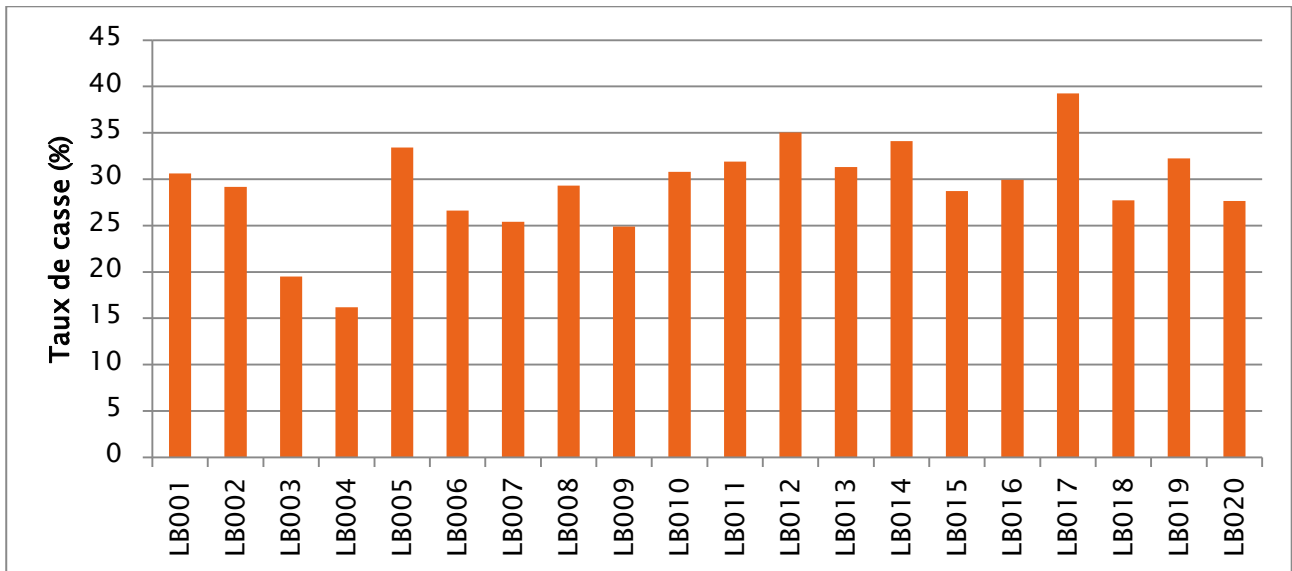


Figure 19 : Taux de casse des lentilles après appertisation

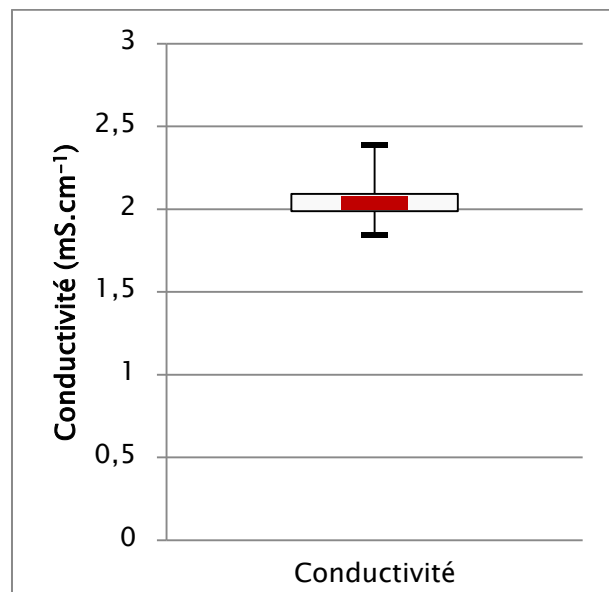
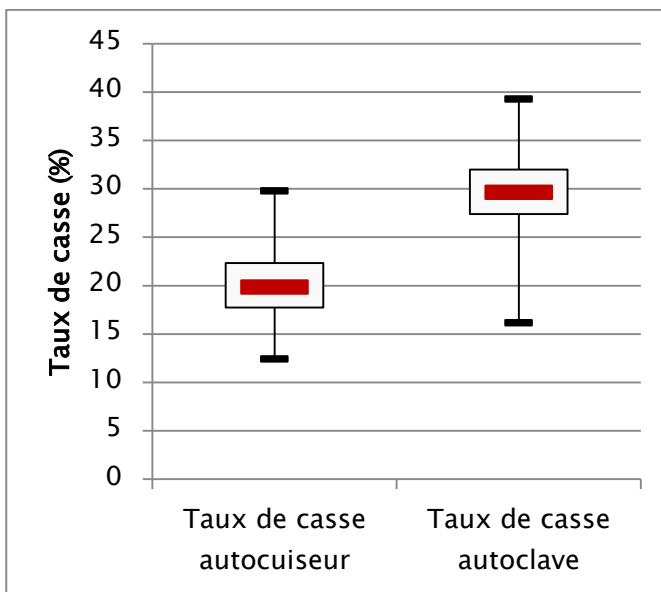


Figure 20 : Dispersion des valeurs des différents paramètres pour les lentilles

(2) Après cycle complet de fabrication

Le trempage réhydrate fortement les légumes secs, donnant des taux de réhydratation moyen de 88% ($\pm 3,47$) allant de 82% à 95% pour les lentilles (Figure 18). Le graphique met en évidence l'importance du trempage puisque c'est l'étape où les légumes secs s'hydratent le plus (Taiwo, Akanbi, et Ajibola, 1998). En effet, pour tous les échantillons l'étape de trempage représente 50% de l'hydratation totale après cycle complet de fabrication.

Au cours de l'appertisation, les lentilles poursuivent leur hydratation (Figure 18) cela est principalement dû à la hausse de température qui entraîne la gélatinisation de l'amidon et augmentant ainsi la capacité de l'amidon à fixer l'eau (Fardet, Souchon, et Dupont, 2013). Après appertisation, dans les conserves, le jus de couverture n'est pas entièrement absorbé ce qui met en évidence une saturation hydrique des grains (Joshi et al., 2010). Ainsi il est nécessaire de trouver un équilibre entre la masse de légumes blanchis à emboîter et la quantité de jus de couverture à ajouter afin d'assurer la présence résiduelle de jus après stérilisation. Le suremboitage étant considéré comme un défaut de qualité par le consommateur. Les critères de qualité industrielle recommandent un taux d'hydratation minimum de 80% (CTCPA, 2013a). Après appertisation tous les échantillons testés ont un taux d'hydratation supérieur à ce seuil.

Le taux de casse en autoclave varie du simple au double, entre 16% et 39% (Figure 19). En faisant le parallèle avec le taux d'hydratation, les échantillons de lentilles qui s'hydratent le plus au trempage ont tendance à avoir un taux de casse plus élevé. Toutefois certains échantillons tels que LB004 ou LB009 présentent un fort taux d'hydratation mais un faible taux de casse.

b) Evaluation du modèle

- Robustesse⁴ du modèle établi

La robustesse du modèle établi est évaluée grâce à l'étude de la dispersion des mesures de chacun des paramètres du modèle (taux de casse en autocuiseur, taux de casse en autoclave et conductivité). Cette étude est réalisée à l'aide de boîtes à moustaches (Figure 20 et Annexe 2) permettant d'apprécier les valeurs minimale et maximale ainsi que la répartition des mesures autour de la médiane.

Pour le taux de casse en autocuiseur, l'écart entre le minimum et le maximum montre une grande étendue des valeurs. Cependant la majorité des valeurs se situe autour de la médiane, ce qui montre qu'elles sont homogènes.

Les valeurs maximales de taux de casse en autoclave montrent une grande étendue des valeurs, cependant la majorité des valeurs se répartit autour de la médiane. Les valeurs sont donc homogènes.

L'étendue des valeurs entre le minimum et le maximum de la conductivité est peu importante. De plus toutes les valeurs sont quasiment confondues avec la médiane ce qui montre une très faible dispersion des valeurs.

La faible dispersion des valeurs de chaque paramètre du modèle montre que celui-ci est peu robuste.

⁴ **Robustesse** : mesure de la capacité d'une méthode à rester non affectée par des petites variations délibérées des conditions opératoires de la procédure (Marini Djang'Eing'A, 2006).

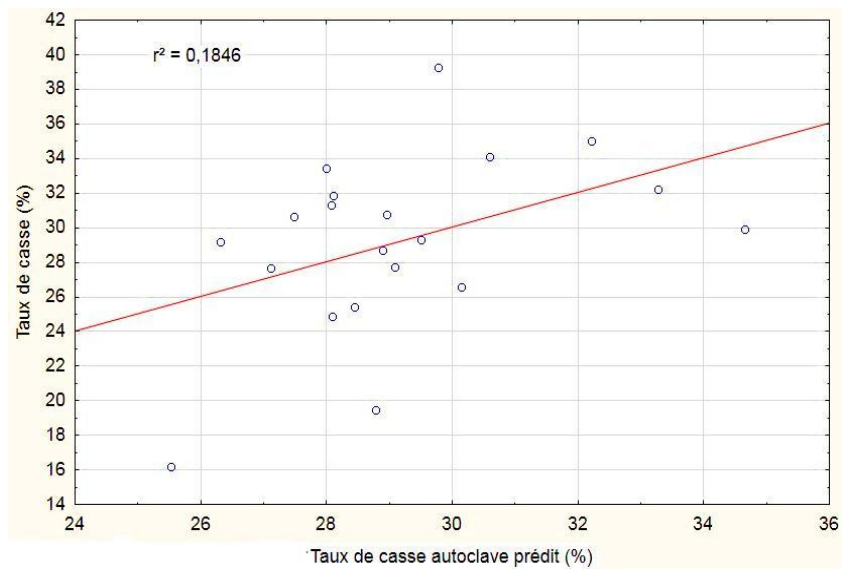


Figure 21 : Evaluation du taux de casse en fonction du taux de casse pr\u00e9dit

- Equation du modèle et justesse

La mesure des taux de casse et de la conductivité ont permis d'établir le modèle suivant :

$$\text{Taux de casse autoclave (\%)} \\ = -8,10 + 0,43 (\text{Taux de casse en autocuiseur}) + 14 (\text{Conductivité})$$

Le modèle est évalué afin de voir si le taux de casse prédit par celui-ci reflète le taux de casse réel en autoclave. Pour se faire une régression linéaire est réalisée reliant le taux de casse autoclave en fonction du taux de casse prédit. Le coefficient de corrélation R^2 est de 0,18 (Figure 21), ce qui montre une faible corrélation entre le taux de casse autoclave et le taux de casse prédit.

L'évaluation du protocole du CTCPA, adapté au procédé de R&R, ne permet pas d'anticiper l'aptitude technologique des lentilles. L'étude des corrélations permettra peut-être de déterminer d'autres relations afin de pouvoir caractériser leur aptitude technologique.

c) Etude des corrélations

Le tableau de corrélations (Annexe 3) montre les différents liens qu'il existe entre les différents paramètres mesurés au cours des essais. L'analyse des p-values permet de dire si les corrélations entre les différents paramètres sont significatives ou non au seuil de 5%. L'utilisation de cette méthode permet de limiter le risque de faire apparaître des résultats significatifs par hasard.

L'Annexe 4 fait apparaître une corrélation évidente : la capacité d'hydratation et le coefficient d'hydratation. Le tableau montre qu'il n'existe aucune corrélation entre le taux de casse autoclave et les autres mesures effectuées. Cependant le calibre et le rendement de trempage sont reliés de façon inverse (corrélation négative). Cela signifie que plus le calibre est grand (grains de grande taille) et moins ils s'hydrateront lors du trempage. Ce résultat est contradictoire avec les résultats d'études précédentes qui montraient que les grains les plus petits se réhydrataient moins bien (CTCPA, 2000). Une autre corrélation peut être établie entre la conductivité de l'eau de cuisson et le rendement de trempage. Cette corrélation montre que lors du trempage, il y a des échanges d'ions entre le milieu et les lentilles.

Après avoir évalué les p-values corrigées, il n'y a plus aucune corrélation valable. Ainsi pour les lentilles le protocole du CTCPA n'est pas adaptable dans les conditions de réalisation des essais. Celui-ci est assez fastidieux pour l'évaluation du taux de casse, notamment dû au fait que les lentilles soient des légumes de petite taille et qu'elles soient fragiles à manipuler (ce qui pourrait augmenter le taux de casse). De plus il n'existe aucune corrélation entre les paramètres mesurés pendant l'expérimentation. Pour évaluer l'aptitude technologique des lentilles, la recherche d'autres paramètres de caractérisation est nécessaire.

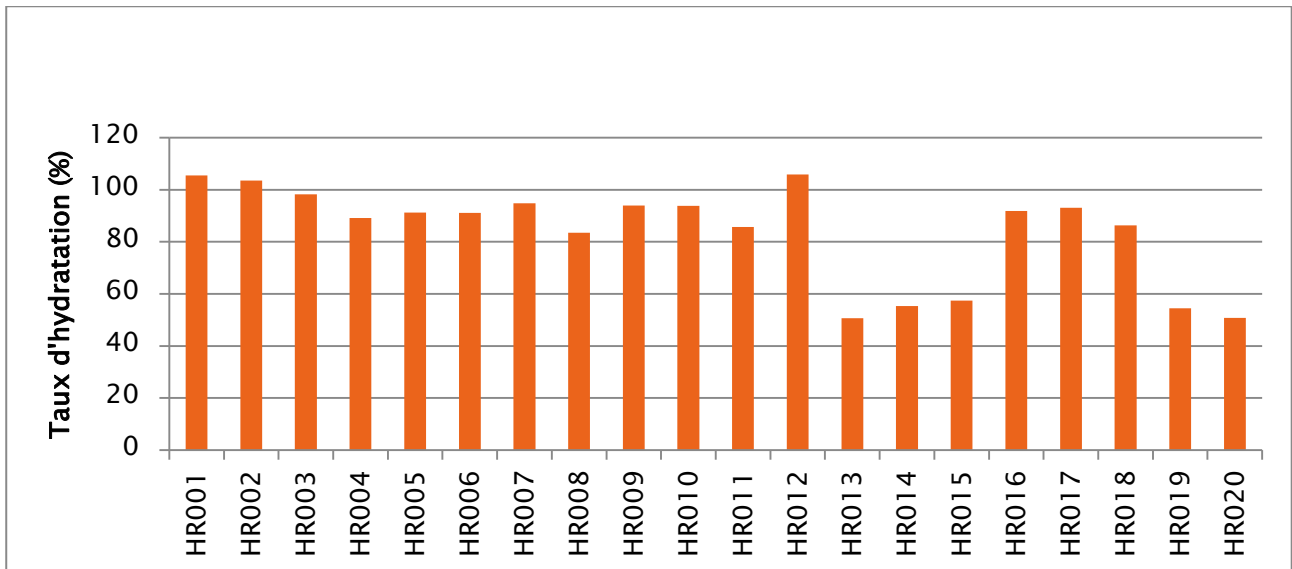


Figure 22 : Taux d'hydratation des haricots rouges en autocuiseur

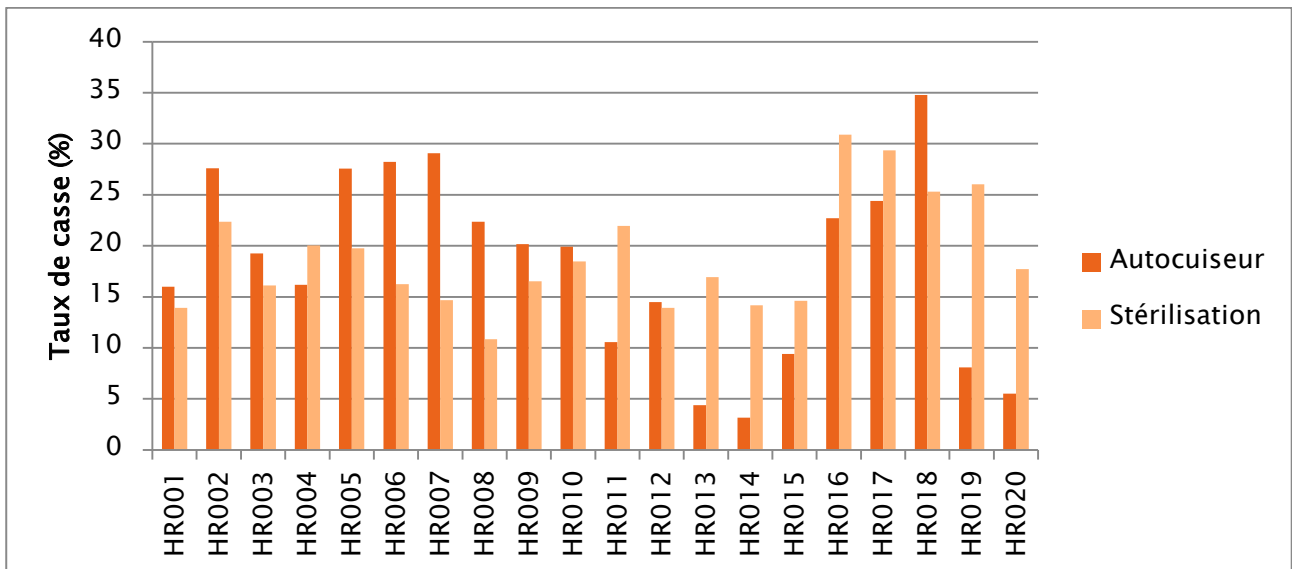


Figure 23 : Taux de casse des haricots rouges après cuisson en autocuiseur et appertisation



Lot cassé/fendu



Lot intègre

Figure 24 : Ecart de qualité à réception de deux lots de haricots rouges

Source personnelle

2. Les haricots rouges

a) Caractérisation en autocuiseur et après cycle complet de fabrication

(1) En autocuiseur

- Caractéristiques après cuisson des légumes secs

Les haricots rouges ont un taux d'hydratation moyen de 83% ($\pm 18,82$) et s'étend de 50% à 105% (Figure 22). Le taux de casse moyen en autocuiseur est de 18% ($\pm 9,16$) et il varie de 3% à 34% (Figure 23). Les échantillons dont le taux de casse en autocuiseur est le plus faible, ne sont pas obligatoirement ceux qui ont un faible taux de casse en autoclave (HR019). Pour certains échantillons le taux de casse en autocuiseur est supérieur au taux de casse après appertisation (HR002, HR006, HR018). Ce phénomène de casse plus important en autocuiseur pourrait s'expliquer par des écarts de qualité à réception (casse importante sur la matière première) (Figure 24).

- Caractéristique de l'eau de cuisson

L'augmentation de la conductivité dans l'eau de cuisson (Figure 25) s'explique par des phénomènes similaires à ceux décrits précédemment pour les lentilles, tels que la gélatinisation et le gonflement de l'amidon, la dénaturation des protéines ou encore la rupture cellulaire entraînent des pertes de matières premières et d'ions dans le milieu de cuisson (Sajo Nana et Michiels, 1990). La conductivité moyenne est de $0,990 \text{ mS.cm}^{-1}$ ($\pm 0,25$) et varie entre $0,64 \text{ mS.cm}^{-1}$ et $1,51 \text{ mS.cm}^{-1}$. En faisant le lien entre le taux de casse en autocuiseur et la mesure de la conductivité, les échantillons (HR017, HR002) qui ont une conductivité élevée ont un fort taux de casse. Cependant le lien entre la conductivité et le taux de casse en autoclave est moins évident.

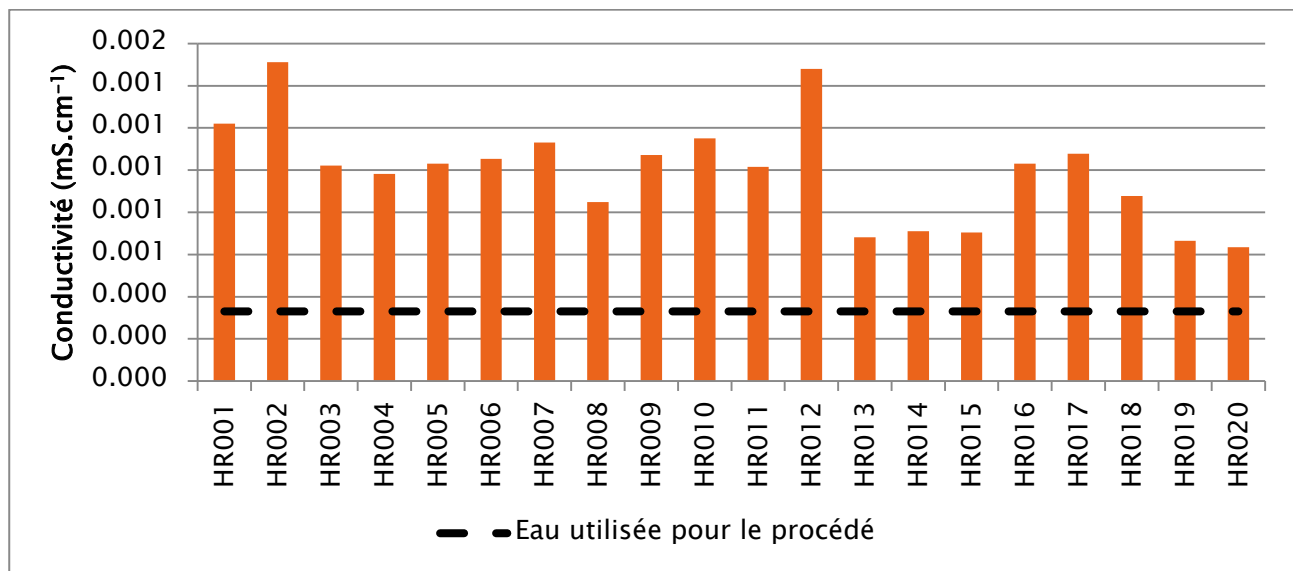


Figure 25 : Conductivité de l'eau après cuisson en autocuiseur

(2) Après cycle complet de fabrication

Les haricots rouges se réhydratent fortement pendant l'étape de trempage puisqu'ils reprennent entre 91% et 114% de leur masse initiale (Figure 26 à la page suivante). Le taux d'hydratation moyen de trempage est de 104% ($\pm 4,87$). En comparaison avec l'hydratation sur l'ensemble du procédé, l'étape de trempage permet plus de la moitié de la réhydratation après 6h de trempage.

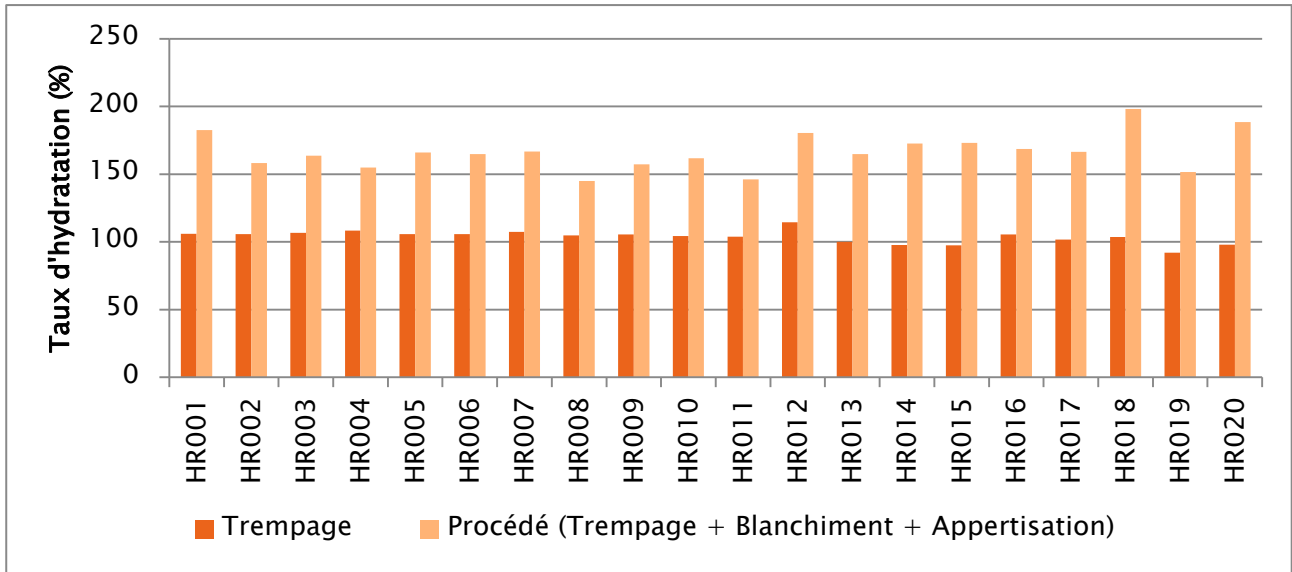


Figure 26 : Taux d'hydratation des haricots rouges après trempage et cycle complet de fabrication

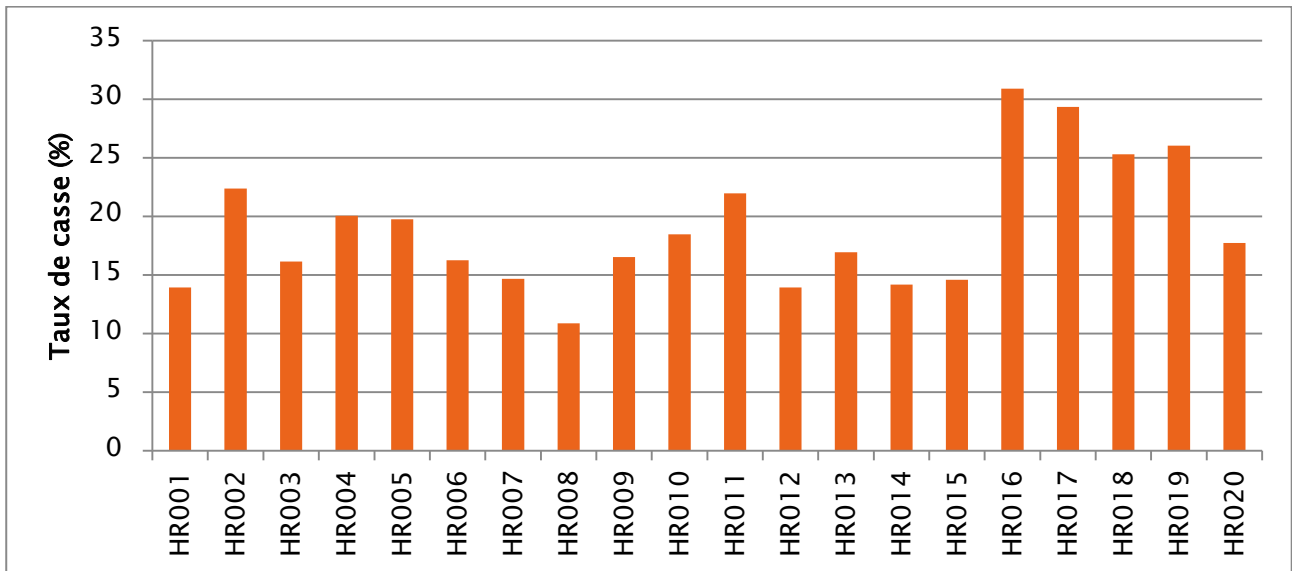


Figure 27 : Taux de casse des haricots rouges après appertisation

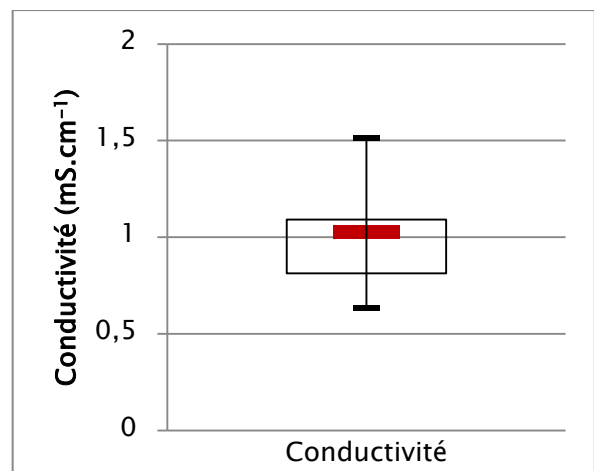
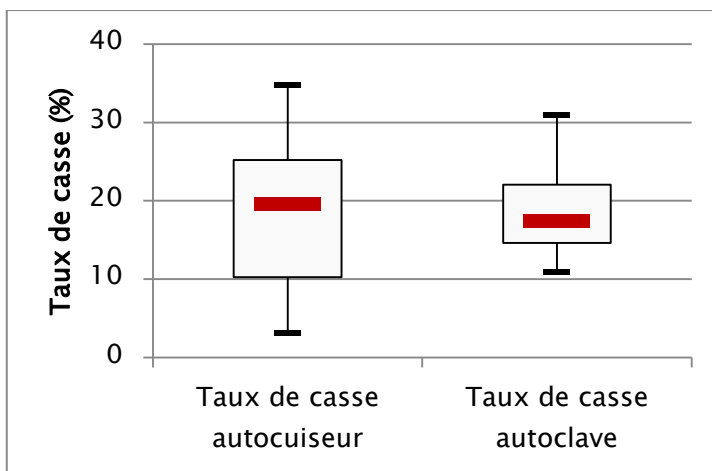


Figure 28 : Dispersion des valeurs des différents paramètres pour les haricots rouges

Toutefois la Figure 26 met en évidence que la réhydratation des haricots rouges n'est pas terminée après le trempage, puisque l'hydratation se poursuit au cours de l'appertisation. En effet sous l'action de la chaleur, l'amidon se gélatinise, ce qui accroît sa capacité à fixer l'eau (Fardet, Souchon, et Dupont, 2013). De plus, la présence de jus de couverture résiduel dans les conserves montre que les haricots rouges ne peuvent plus absorber d'eau. Ils sont arrivés à saturation hydrique (Joshi et al., 2010).

Le taux de casse moyen en autoclave des haricots rouges est de 19% ($\pm 5,46$) et varie entre 10% à 30% (Figure 27). Les échantillons ayant un taux de casse élevé ont un fort taux d'hydratation (après cycle de fabrication). Cependant certains échantillons (HR001, HR020) ont un fort taux d'hydratation mais un taux de casse assez bas. Ces différences pourraient s'expliquer par les caractéristiques intrinsèques des haricots rouges (III.C.5).

b) Evaluation du modèle

- Robustesse du modèle établi

Comme vu précédemment, la robustesse du modèle est évaluée à l'aide de boîtes à moustaches (Figure 28 et Annexe 2). Pour les haricots rouges, 2 modèles ont été établis puisque plusieurs méthodes de stérilisation ont été utilisées (pilote et hydrolock). Seule la robustesse du modèle incluant les 20 mesures est évaluée.

Les valeurs du taux de casse en autocuiseur, montre une grande étendue des valeurs entre le minimum et le maximum. La répartition des valeurs n'est pas concentrée autour de la médiane, les valeurs de taux de casse sont alors dispersées. Celles-ci tendent à se rapprocher du minimum observé.

L'étendue des valeurs du taux de casse en autoclave est importante mais elle est néanmoins, moins importante que celle du taux de casse en autocuiseur. La majorité des valeurs se répartit autour de la médiane. Les valeurs sont donc homogènes. De plus la médiane est proche de la valeur minimum de taux de casse en autoclave.

L'écart entre les valeurs maximales de la conductivité est élevé. Les valeurs sont peu dispersées par rapport à la médiane ce qui montre une très faible dispersion des valeurs. Elles se situent principalement sous la valeur médiane.

Malgré une grande dispersion des valeurs du taux de casse en autocuiseur, la faible dispersion des 2 autres paramètres du modèle montre que celui-ci est peu robuste.

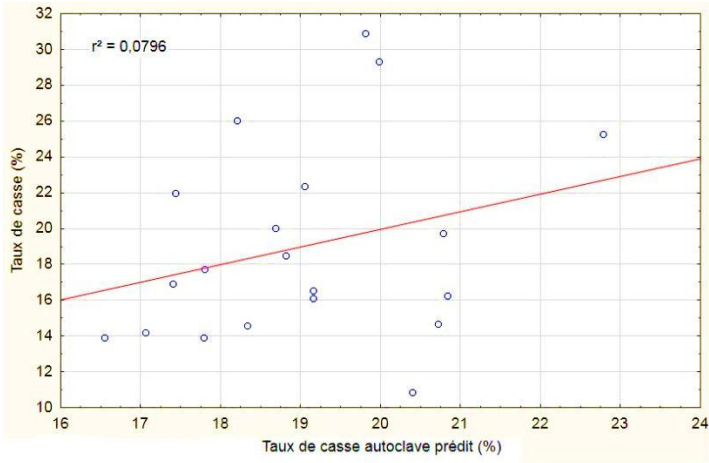
- Equations des modèles et justesse

La mesure des taux de casse et de la conductivité ont permis d'établir le modèle (1) suivant :

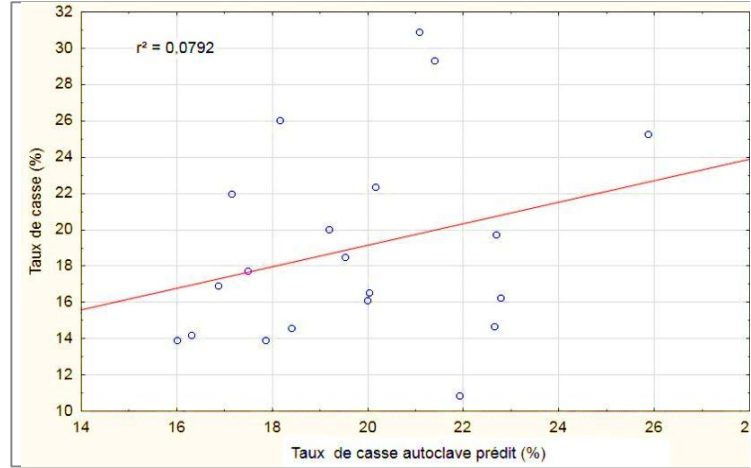
<p><i>Taux de casse autoclave (%)</i> <i>= 18,99 + 0,20 (Taux de casse en autocuiseur) – 3,61 (Conductivité)</i></p>

Un autre modèle a été établi puisque le procédé de stérilisation n'a pas été le même pour tous les échantillons. En effet sur les 20 essais menés, 6 ont été stérilisés sur la ligne de production et le reste a été stérilisé sur l'outil pilote. L'hypothèse que l'utilisation du pilote ou de l'hydrolock pour les mêmes conditions de stérilisation n'ait pas d'incidence sur les résultats peut alors être émise. Le modèle établi sur les 14 mesures en pilote (2) est le suivant :

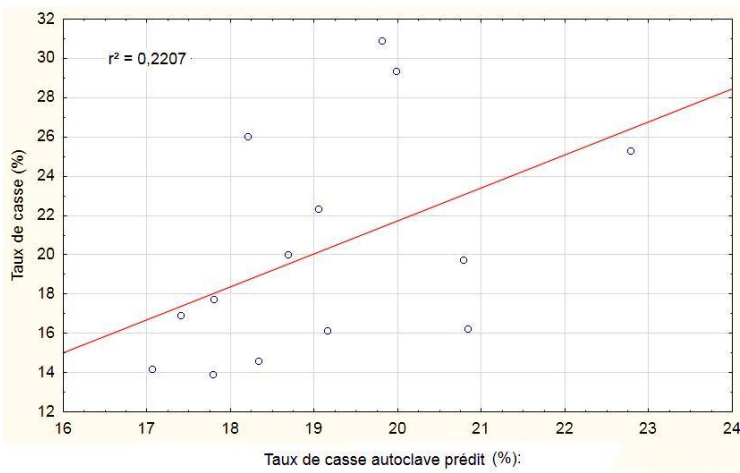
<p><i>Taux de casse autoclave (%)</i> <i>= 19,37 + 0,33 (Taux de casse en autocuiseur) – 5,25 (Conductivité)</i></p>



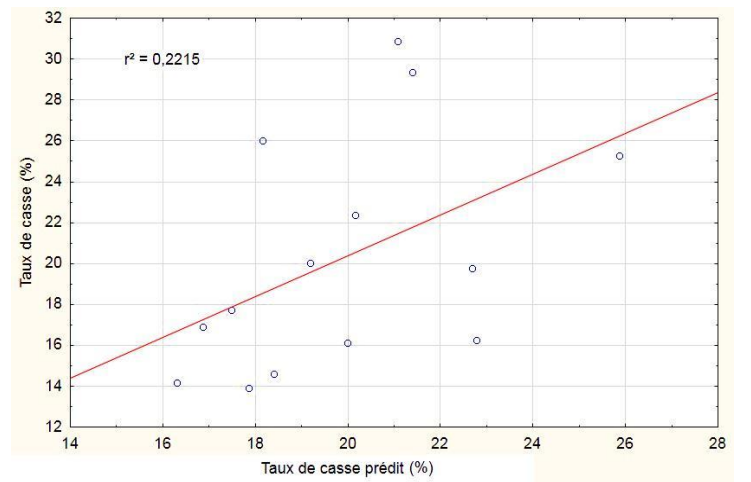
Modèle (1) évalué avec 20 mesures



Modèle (2) évalué avec 20 mesures



Modèle (1) évalué avec 14 mesures



Modèle (2) évalué avec 14 mesures

Figure 29 : Comparaison des modèles établis en fonction des outils de stérilisation

Les modèles sont évalués afin de voir si le taux de casse prédit par celui-ci reflète le taux de casse réel en autoclave. Pour se faire une régression linéaire est réalisée reliant le taux de casse autoclave en fonction du taux de casse prédit. Les 2 modèles sont testés dans 2 conditions : soit en ne prenant en compte que les mesures sur pilote, soit en prenant en compte l'ensemble des mesures.

Il n'existe pas de différences entre les 2 modèles (Figure 29) puisqu'en les évaluant avec les mêmes conditions de stérilisation (soit avec les mesures sur pilote, soit sur l'ensemble des mesures) les coefficients de corrélations diffèrent peu. Cependant le fait de prendre en compte ou non les valeurs des essais réalisés en hydrolock a une influence puisque le coefficient de corrélation R^2 passe de 0,07 à 0,22. De ce fait, l'outil pilote ne reproduit pas exactement les conditions réelles de stérilisation.

L'évaluation du protocole du CTCPA, adapté au procédé de R&R, ne permet pas d'anticiper l'aptitude technologique des haricots rouges. L'étude des corrélations permettra peut-être de déterminer d'autres relations afin de pouvoir caractériser leur aptitude technologique.

c) Etude des corrélations

Aucune corrélation n'est établie entre le taux de casse en autoclave et les autres paramètres (Annexe 5 et Annexe 6). Cependant celles qui peuvent être faites, mettent en évidence que les haricots les plus petits ont du mal à se réhydrater et qu'ils peuvent relarguer des ions dans le milieu de cuisson. Elles mettent aussi en évidence qu'une grande capacité d'absorption favorise le taux de casse. Ce dernier est d'autant plus important que les échanges d'ions sont importants dans le jus de cuisson (CTCPA, 2000).

D'autres corrélations entre la capacité d'absorption et la texture des légumes secs peuvent être établies. Cependant la texture mesurée en autocuiseur ne reflète pas la texture en autoclave, ce qui ne présente pas un réel intérêt pour l'étude.

Après correction des p-values, 2 corrélations peuvent paraître intéressantes puisqu'elles permettent de relier le rendement de trempage au rendement en autocuiseur ainsi qu'à la conductivité. Ces corrélations montrent que la réhydratation en autocuiseur est assimilable à la réhydratation au trempage. La conductivité qui met en évidence les échanges d'ions entre les haricots rouges et le milieu dans lequel ils évoluent pourrait donner une indication sur leur éclatement au trempage (CTCPA, 2000).

Le modèle établi sur les haricots rouges ne permet pas d'anticiper leur aptitude technologique. Les écarts de qualité à réception peuvent créer un biais quant à l'évaluation du taux de casse en autocuiseur. Pour mieux évaluer le protocole du CTCPA des mesures sur des lots intègres pourraient renforcer le modèle.

Les corrélations reliant le rendement de trempage avec le rendement autocuiseur et la conductivité pourrait servir à l'établissement d'un nouveau modèle, qui pourrait être plus adapté au procédé. Cette méthode pourrait être une alternative au test de réhydratation déjà mis en place sur les haricots lingots et qui permettrait de piloter le procédé.

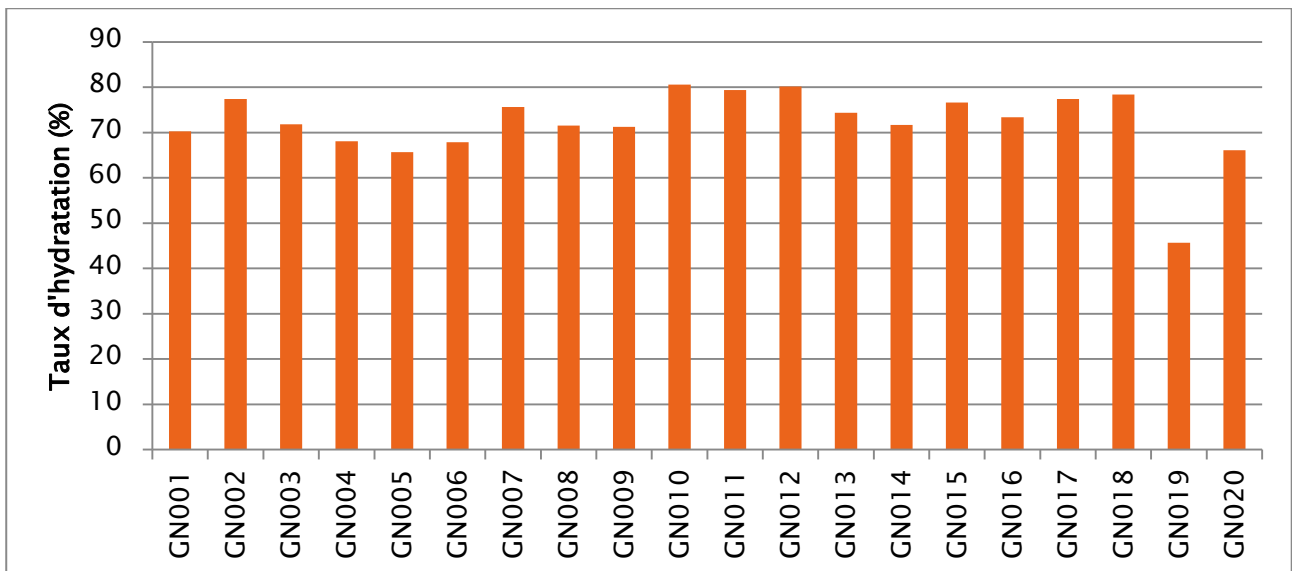


Figure 30 : Taux d'hydratation des GN en autocuiseur

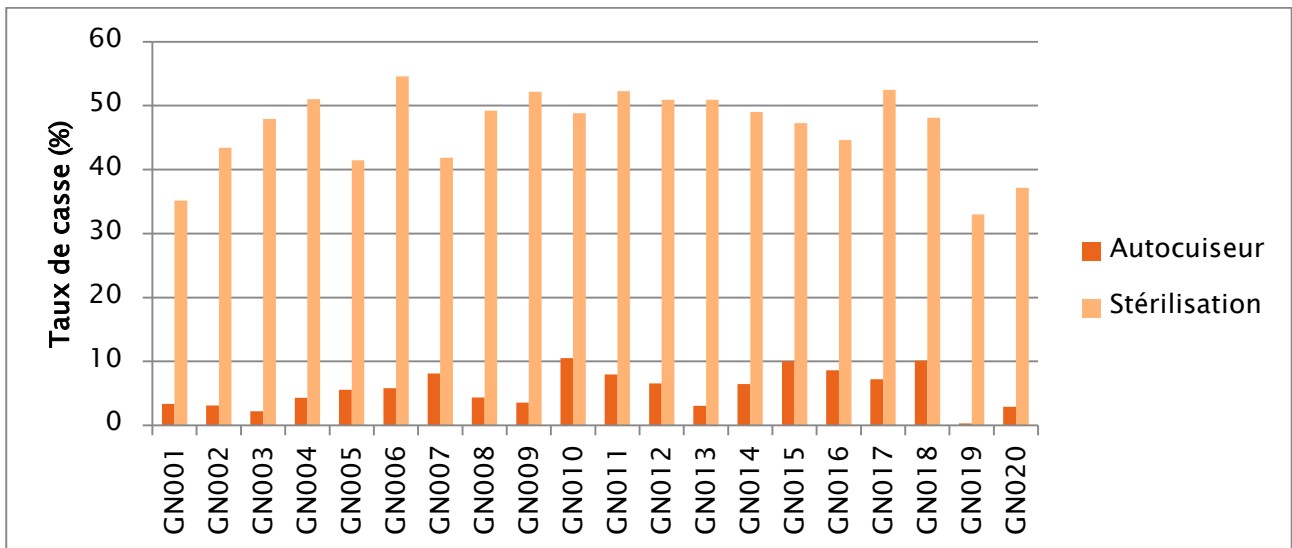


Figure 31 : Taux de casse des haricots GN après cuisson en autocuiseur et appertisation

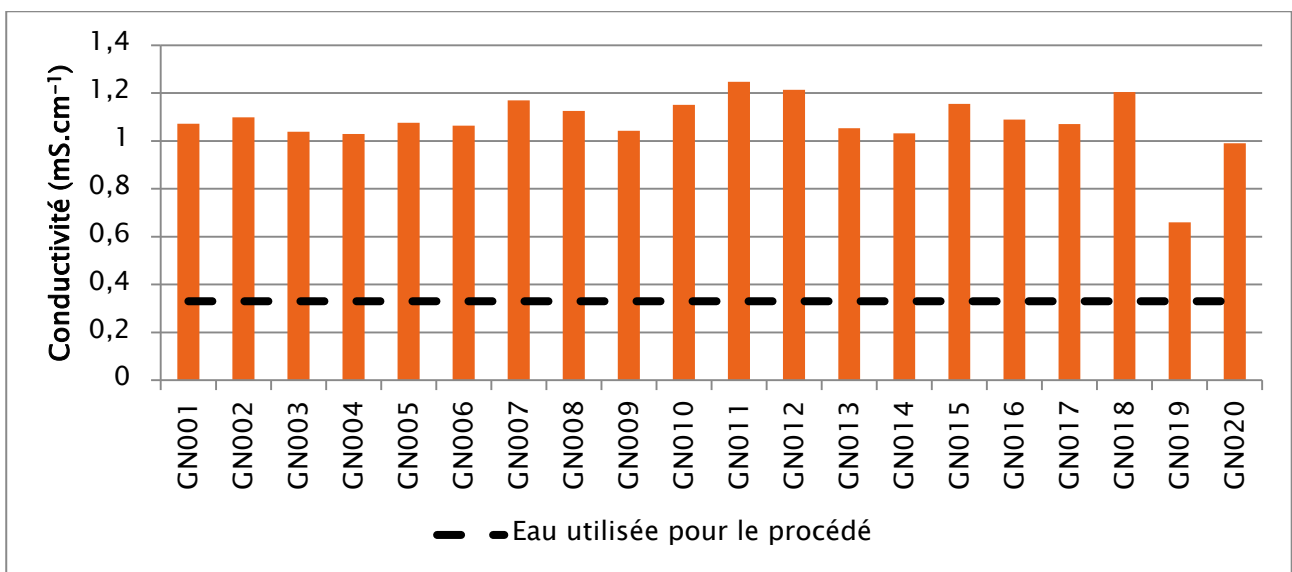


Figure 32 : Conductivité de l'eau après cuisson en autocuiseur

3. Les haricots GN

a) Caractérisation en autocuiseur et après cycle complet de fabrication

(1) En autocuiseur

- Caractéristiques après cuisson des légumes secs

Le taux d'hydratation moyen est de 72% ($\pm 7,75$) et varie de 45% à 80% (Figure 30) pour un taux de casse moyen de 5,57% ($\pm 2,31$) allant de 0,29% à 10% (Figure 31). L'échantillon GN019 se démarque du reste puisqu'il présente de faibles taux de casse et d'hydratation. Les haricots GN qui ont un taux de casse élevé sont ceux dont le taux d'hydratation en autocuiseur est le plus fort. Les taux de casse mesurés en autocuiseur sont nettement différents des taux de casses en autoclave.

- Caractéristique de l'eau de cuisson

Au cours de la cuisson, la conductivité de l'eau augmente (Figure 32). Les échanges d'ions entre les haricots et le milieu sont mis en évidence. Ceux-ci se produisent sous l'effet de la chaleur qui induit la dénaturation des protéines, la gélatinisation et le gonflement de l'amidon. Des phénomènes de ruptures cellulaires peuvent aussi avoir lieu (Sajo Nana et Michiels, 1990). La conductivité moyenne est de $1,08 \text{ mS.cm}^{-1}$ ($\pm 0,12$) et oscille entre $0,660 \text{ mS.cm}^{-1}$ et $1,25 \text{ mS.cm}^{-1}$. Les échantillons (GN010, GN012, GN018) présentant un taux de casse élevé en autocuiseur et après stérilisation ont une conductivité élevée.

(2) Après cycle complet de fabrication

Le trempage réhydrate fortement les haricots GN puisque le taux d'hydratation moyen est de 100% ($\pm 3,21$) et varie de 95% à 107% (Figure 33). Cette étape est importante puisque c'est là où les haricots vont se réhydrater le plus (Taiwo, Akanbi, et Ajibola, 1998). En effet, elle représente la moitié de l'hydratation totale après un cycle complet de fabrication.

Après trempage, l'hydratation n'est pas terminée et se poursuit lors de la stérilisation. En effet, la hausse de température va entraîner la gélatinisation de l'amidon, ce qui augmente la capacité de l'amidon à fixer l'eau (Fardet, Souchon, et Dupont, 2013). Après appertisation, le jus de couverture dans la conserve met en évidence que les GN ne peuvent plus se réhydrater, ils sont arrivés à saturation hydrique (Joshi et al., 2010).

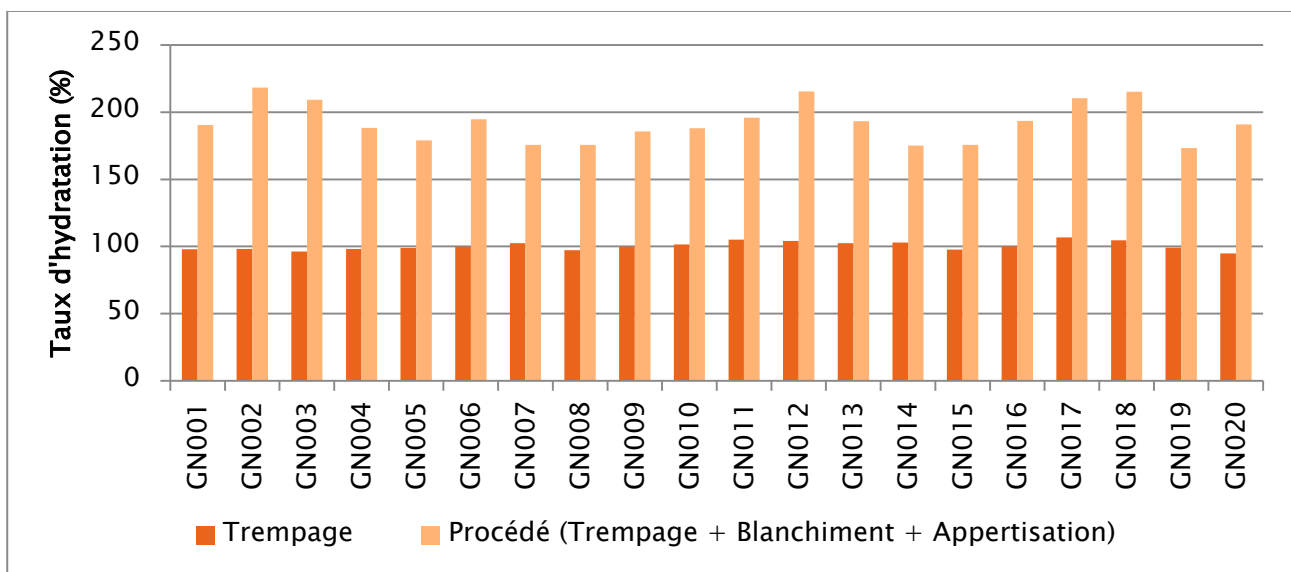


Figure 33 : Taux d'hydratation des GN après trempage et cycle complet de fabrication

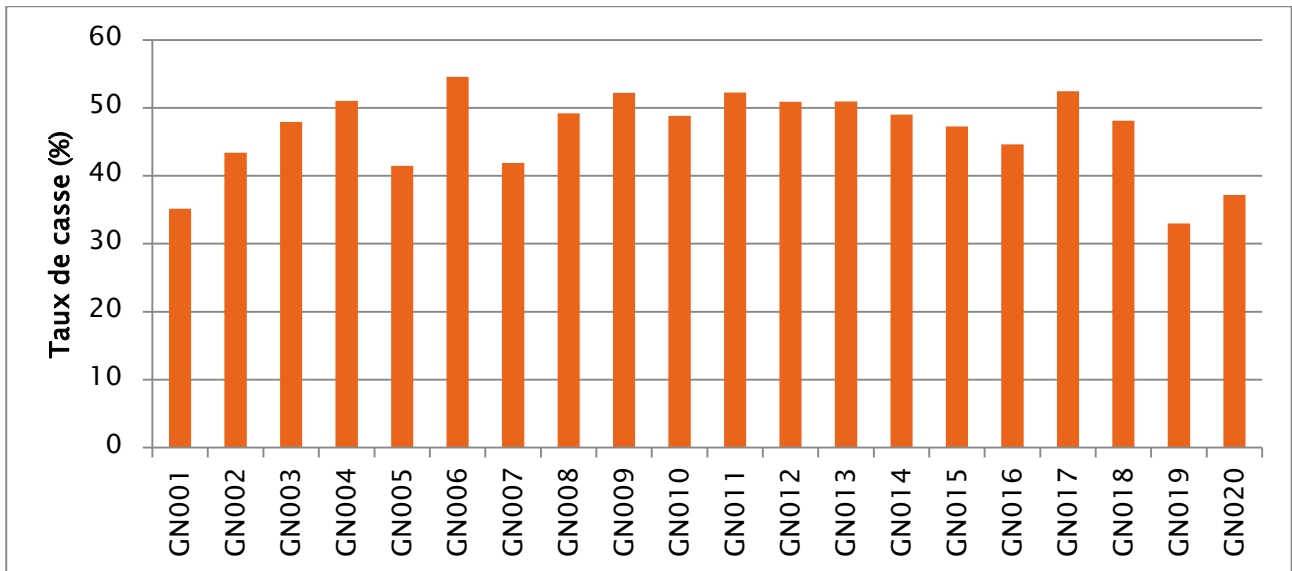


Figure 34 : Taux de casse des GN après appertisation

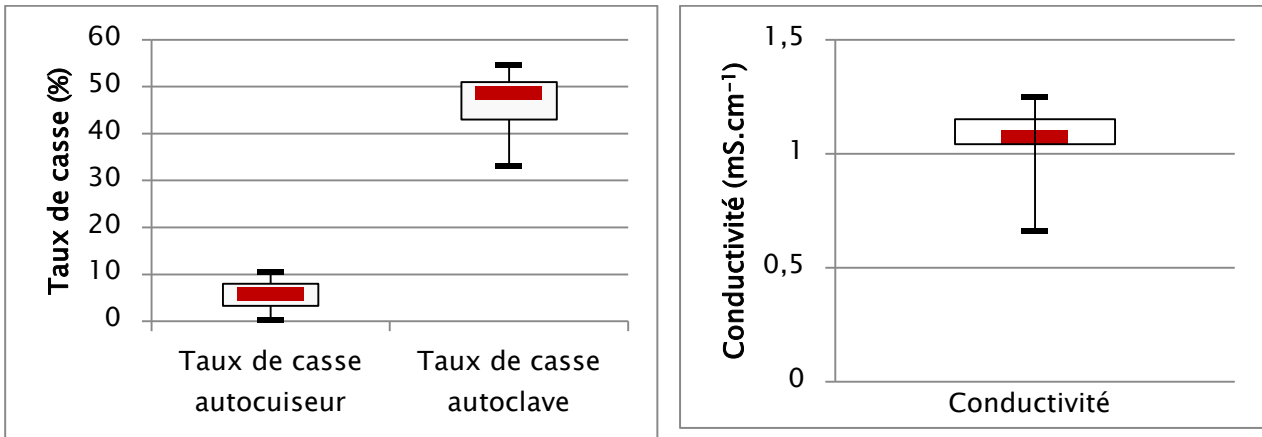


Figure 35 : Dispersion des valeurs des différents paramètres pour les GN

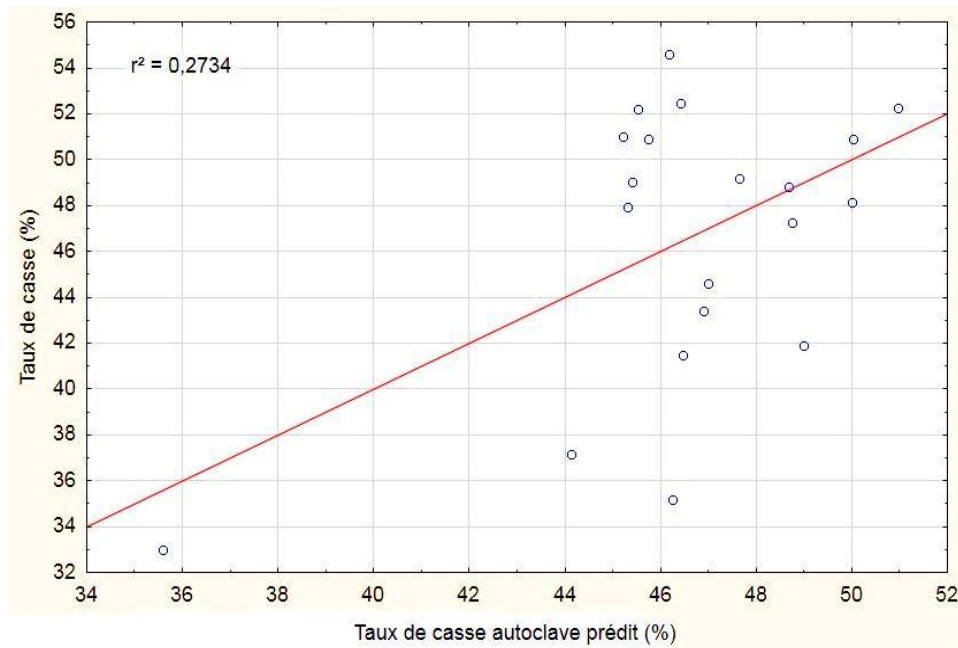


Figure 36 : Evaluation du taux de casse en fonction du taux de casse prédit des GN

Le taux de casse moyen après stérilisation est de 46,57% ($\pm 6,1$) et s'étend de 33% à 54% (Figure 34). Les échantillons (GN012, GN 006, GN017, GN018) dont le taux d'hydratation après appertisation est élevé sont les plus susceptibles à la casse.

b) Evaluation du modèle

- Robustesse du modèle établi

La robustesse du modèle établi est évaluée comme les 2 modèles précédents, grâce à l'étude de la dispersion des mesures des paramètres du modèle (taux de casse en autocuiseur, taux de casse en autoclave et conductivité) (Figure 35 et Annexe 2).

L'analyse des valeurs des taux de casse et de la conductivité, montre que l'étendue des valeurs maximales est faible, et toutes les valeurs se répartissent autour de la médiane. Les valeurs sont donc homogènes et non dispersées. Ainsi la faible dispersion des valeurs de chaque paramètre du modèle montre que celui-ci est peu robuste.

- Equation du modèle et justesse

La mesure des taux de casse et de la conductivité ont permis d'établir le modèle suivant :

$\text{Taux de casse autoclave (\%)} = 18,77 + 0,06 (\text{Taux de casse en autocuiseur}) + 25,44 (\text{Conductivité})$
--

Le modèle est évalué afin de voir si le taux de casse prédit par celui-ci reflète le taux de casse réel en autoclave. Le coefficient de corrélation R^2 est de 0,27 (Figure 36), ce qui montre une faible corrélation entre le taux de casse autoclave et le taux de casse prédit.

L'évaluation du protocole du CTCPA, ne permet pas d'anticiper l'aptitude technologique des haricots GN. L'étude des corrélations permettra peut-être de déterminer d'autres relations afin de pouvoir caractériser leur aptitude technologique.

c) Etude des corrélations

Le taux de casse autoclave est corrélé avec 4 paramètres : le calibre, la conductivité, le taux d'hydratation et le rendement autocuiseur (Annexe 7 et Annexe 8). L'étude menée par le CTCPA (2012) avait déjà mis en avant certaines relations montrant que la capacité d'hydratation des grains les plus gros était plus importante et donc plus enclin à la casse. De plus, le ramollissement de la texture des haricots est lié à un échange d'ions divalents (Ca^{2+} et Mg^{2+}) contre des ions monovalents (Na^+ et K^+), ce qui justifie la mesure de conductivité. Ce ramollissement est dû à une forte hydratation et qui, par conséquent, favorise le taux de casse (CTCPA, 2000).

Cependant il n'y a pas de corrélation entre le taux de casse en autocuiseur et le taux de casse en autoclave. Toutefois la conductivité étant fortement reliée avec ces deux taux de casse, cela montre bien qu'il y a un relargage d'ions dans le milieu de cuisson.

Après correction des p-values, les seules corrélations valables ne tiennent compte que de paramètres mesurés pendant le test autocuiseur. Cela n'apporte donc pas d'informations supplémentaires sur l'aptitude technologique des haricots GN.

Le modèle permettant de relier le taux de casse autoclave avec le taux de casse autocuiseur et la conductivité ne semble pas adapté aux GN dans les conditions d'expérimentation. De plus, aucune corrélation n'a pu être établie entre les paramètres mesurés.

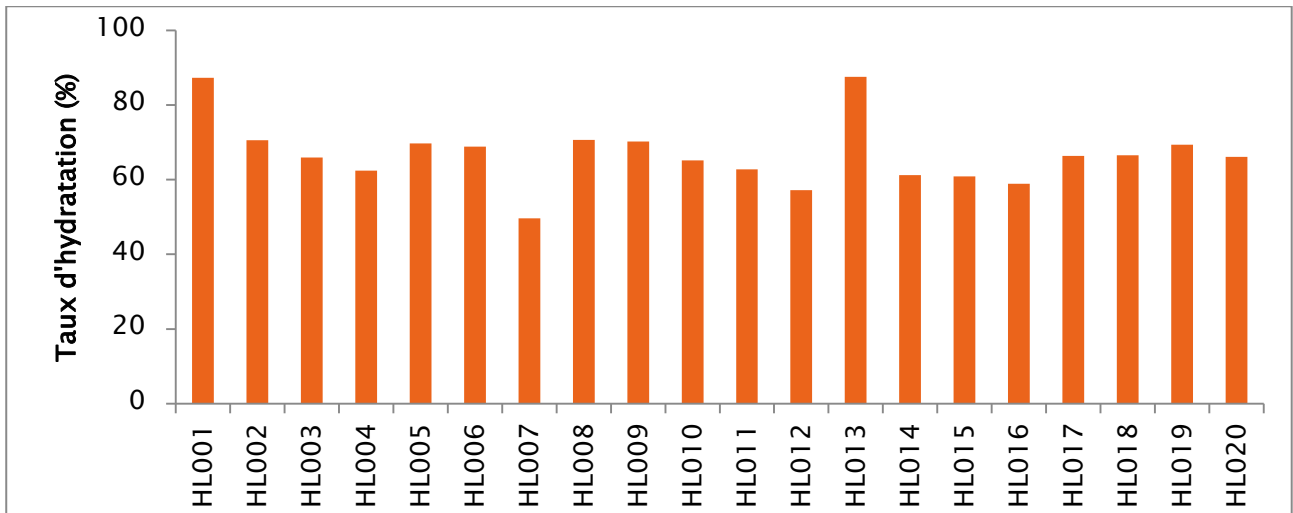


Figure 37 : Taux d'hydratation des haricots lingots en autocuiseur

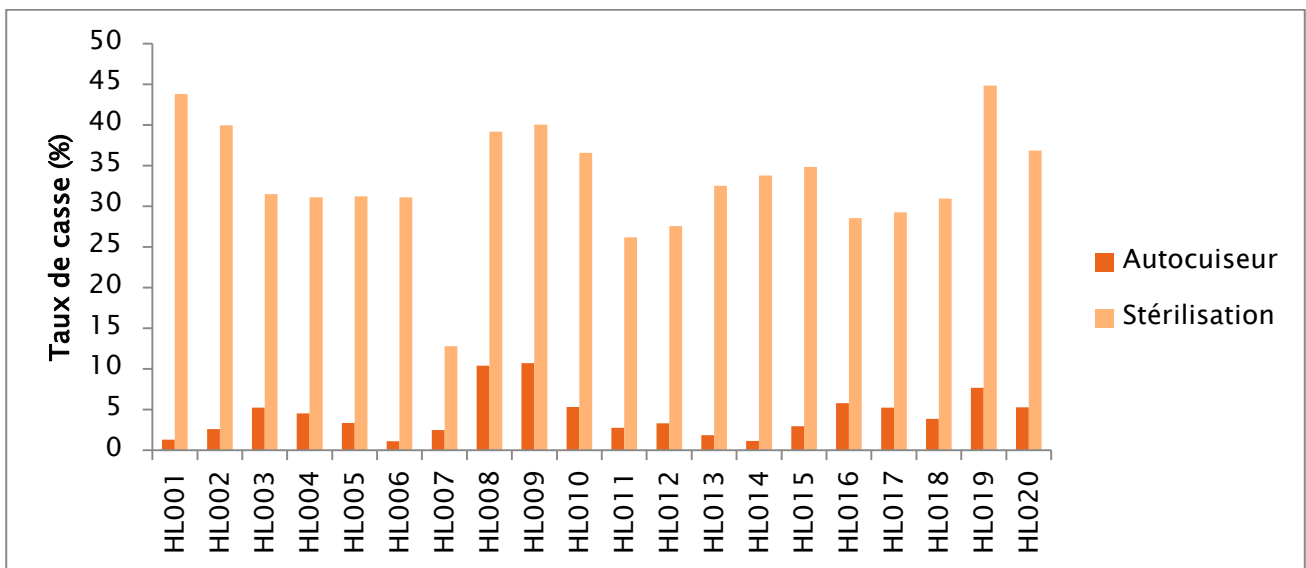


Figure 38 : Taux de casse des haricots lingots après cuisson en autocuiseur et appertisation

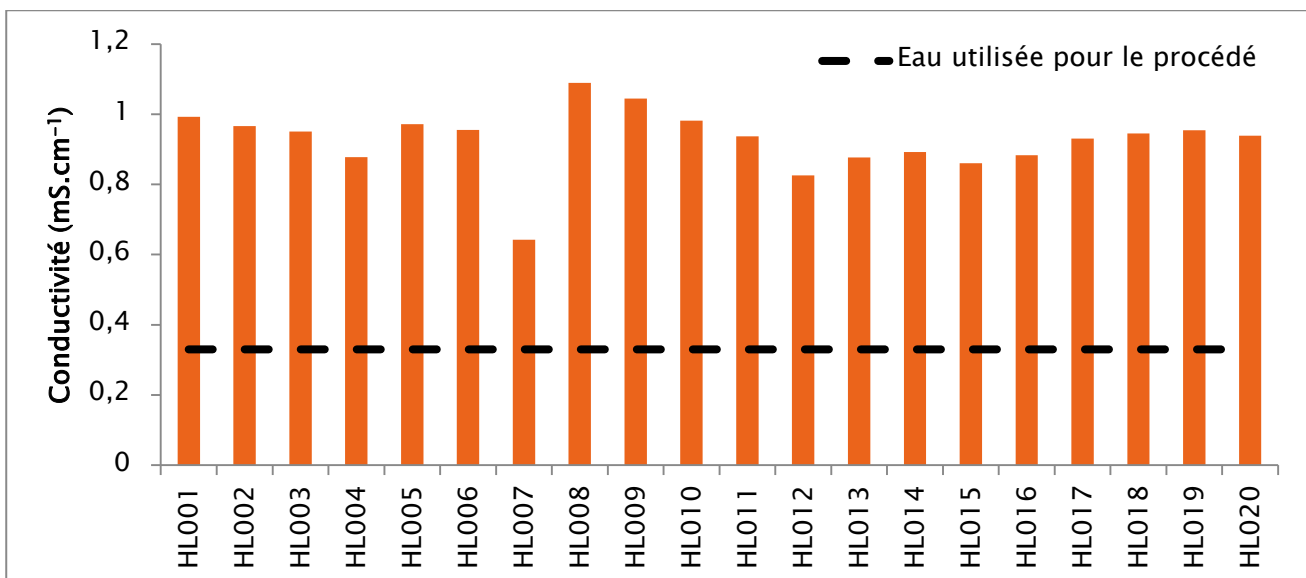


Figure 39 : Conductivité de l'eau après cuisson en autocuiseur

4. Les haricots lingots

a) Caractérisation en autocuiseur et après cycle complet de fabrication

(1) En autocuiseur

- Caractéristiques après cuisson des légumes secs

Le taux d'hydratation moyen pendant la cuisson en autocuiseur est 67% ($\pm 8,79$) et varie de 50% à 88% (Figure 37). Le taux de casse moyen est de 4,34% ($\pm 2,74$) et s'étend de 1% à 11% (Figure 38). Les échantillons ayant un taux de casse autocuiseur élevé ont aussi un fort taux de casse après appertisation. De plus, ces forts taux de casse s'accompagnent d'un taux d'hydratation élevé.

- Caractéristique de l'eau de cuisson

La conductivité moyenne est de 0,930 mS.cm⁻¹ ($\pm 0,09$) et varie de 0,640 mS.cm⁻¹ à 1,09 mS.cm⁻¹. Lors de la cuisson, la hausse de température dénature les protéines et entraîne la gélatinisation ainsi que le gonflement de l'amidon (Figure 39). Les phénomènes de rupture cellulaire sont à l'origine de perte de matières et d'ions (Sajo Nana et Michiels, 1990). Ce sont ces pertes en ions qui sont à l'origine de l'augmentation de la conductivité de l'eau de cuisson. La hausse de la conductivité s'accompagne généralement d'une hausse du taux de casse (CTCPA, 2012), cela se vérifie pour les échantillons HL008 et HL009.

(2) Après cycle complet de fabrication

Le taux d'hydratation de trempage moyen est de 100% ($\pm 9,08$) et varie de 64% à 107%. L'étape de trempage est importante puisque c'est à ce moment que les haricots se réhydratent le plus (Taiwo, Akanbi, et Ajibola, 1998). En effet, pour tous les échantillons le trempage représente la moitié de la réhydratation totale après appertisation. Toutefois, un des échantillons (HL007) se réhydrate mal (Figure 40).

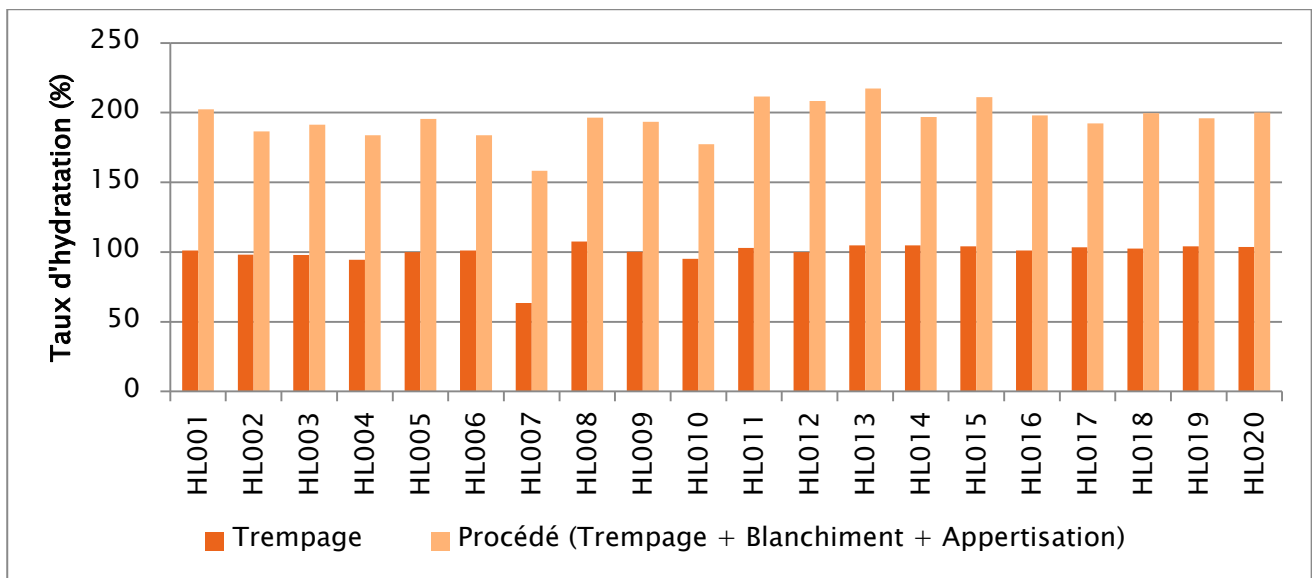


Figure 40 : Taux d'hydratation après trempage et cycle complet de fabrication

Au cours de la stérilisation, l'hydratation n'est pas terminée, puisque la Figure 40 montre une augmentation du taux d'hydratation. Sous l'effet de la température, l'amidon se gélatinise, ce qui accroît sa capacité à fixer l'eau (Fardet, Souchon, et Dupont, 2013). La présence de jus de couverture résiduel dans les conserves, met en évidence que la capacité d'absorption des haricots n'est pas illimité, et qu'il y a donc une saturation hydrique des grains (Joshi et al., 2010).

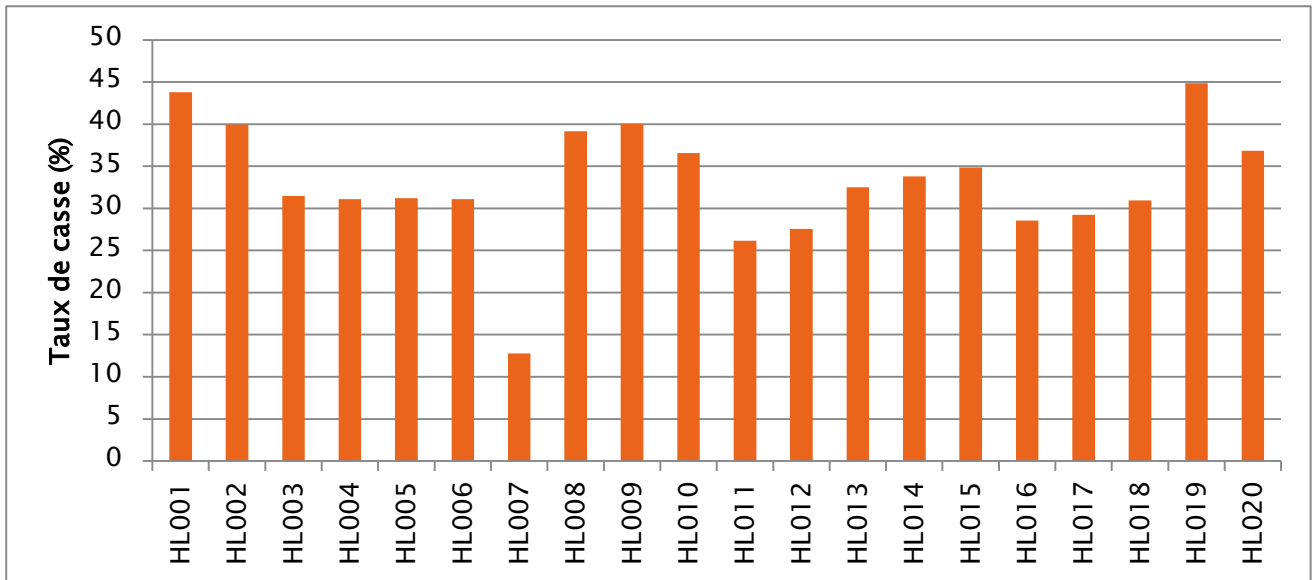


Figure 41 : Taux de casse des lingots après appertisation

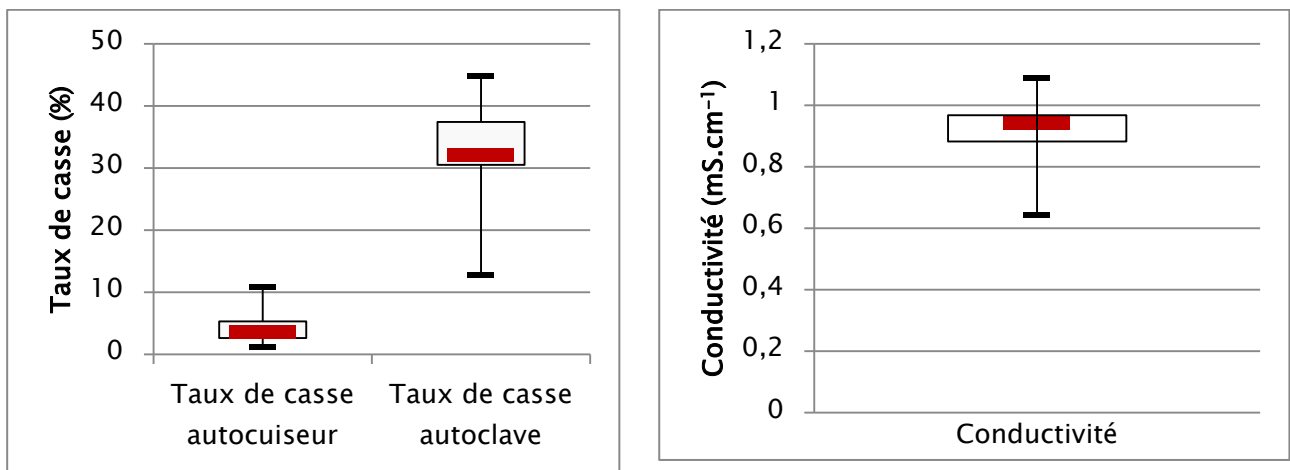


Figure 42 : Dispersion des valeurs des différents paramètres pour les lingots

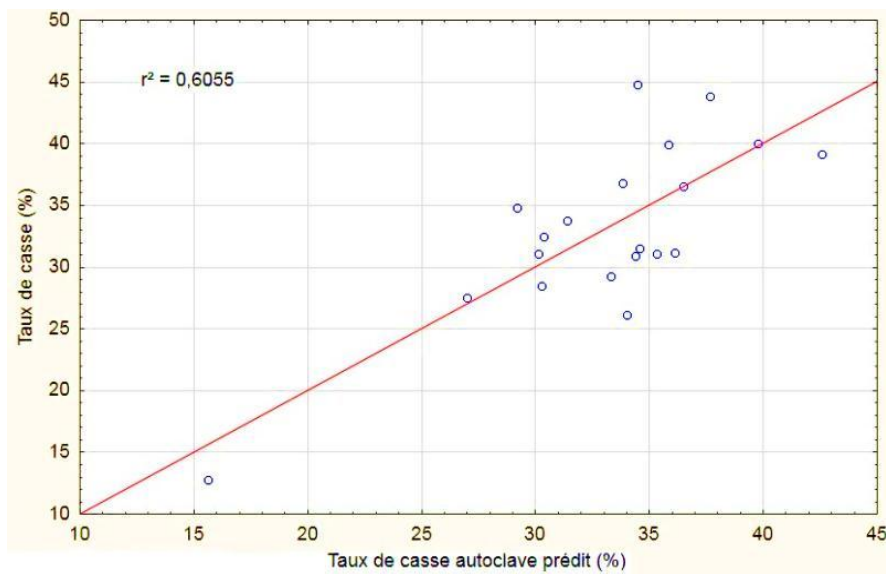


Figure 43 : Justesse du modèle établis pour chacun des légumes secs

Après appertisation le taux de casse moyen est de 33% ($\pm 7,11$) et varie de 12% à 44% (Figure 41). Certains échantillons ont des taux de casse très proches, cependant l'échantillon HL007 se différencie des autres par son faible taux de casse et son faible taux d'hydratation. En retraçant l'historique de cet échantillon, il s'est avéré que celui-ci était stocké dans un endroit où les conditions de stockage ne sont pas maîtrisées et le lot s'y trouvait depuis 2 ans. Cela met en évidence que les conditions ainsi que la durée de stockage jouent un rôle essentiel dans la casse des haricots. Des échantillons ayant un fort taux d'hydratation, sont ceux qui ont un taux de casse plus élevé.

b) Evaluation du modèle

- Robustesse du modèle établi

La robustesse du modèle est étudiée en utilisant la dispersion des valeurs grâce aux boîtes à moustaches (Figure 42).

La répartition des valeurs de taux de casse en autocuiseur est principalement autour de la médiane, et les valeurs sont presque totalement confondues avec celle-ci, elles sont donc homogènes. L'écart entre les valeurs maximales est peu important, ce qui renforce la faible dispersion des valeurs.

L'étendue entre les valeurs maximales est importante pourtant la majorité des valeurs se regroupent autour de la médiane. Elles se répartissent principalement au-dessus de la valeur médiane. Les valeurs sont donc peu dispersées.

La dispersion de valeur de conductivité est peu importante puisque l'écart entre le minimum et le maximum est faible. Une grande partie des valeurs se trouvent autour de la médiane voir confondues avec celle-ci.

La faible dispersion des valeurs du modèle montre que celui-ci est peu robuste.

- Equation et justesse du modèle

La mesure des taux de casse et de la conductivité ont permis d'établir le modèle suivant :

$\text{Taux de casse autoclave (\%)} = -24,12 - 0,12 (\text{Taux de casse en autocuiseur}) + 62,37 (\text{Conductivité})$

Le modèle est évalué par une régression linéaire entre le taux de casse prédit et le taux de casse réel en autoclave. Le coefficient de corrélation R^2 est de 0,60 (Figure 43), ce qui montre une bonne corrélation entre le taux de casse autoclave et le taux de casse prédit.

L'évaluation du protocole du CTCPA, pourrait permettre d'anticiper l'aptitude technologique des haricots lingots. L'étude des corrélations pourrait peut-être apporter d'autres relations afin de mieux caractériser leur aptitude technologique.

c) Etude des corrélations

Le taux de casse autoclave est corrélé avec le rendement de trempage et le rendement autocuiseur (Annexe 9 et Annexe 10). Ce qui implique qu'une capacité d'absorption de l'eau élevée lors du trempage ou de la cuisson en autocuiseur favorise le taux de casse des haricots (CTCPA, 2012).

Les taux de casse en autocuiseur et après stérilisation sont corrélés avec la conductivité de l'eau de cuisson. Cela met en évidence les échanges d'ions avec le milieu de cuisson entraînant un taux de casse plus ou moins important.

Le taux de casse en autocuiseur peut être relié au calibre, montrant ainsi que des grains de petites tailles se réhydrataient moins bien et étaient plus difficiles à cuire (CTCPA, 2000).

La correction de Holm ne donne par la suite que la corrélation entre la conductivité et le taux de casse autoclave, et la conductivité avec le taux d'hydratation pendant le trempage. Ces 2 relations n'apportent rien de plus à l'étude menée sur les haricots lingots.

Bien que le modèle sur les lingots soit peu robuste, il montre une bonne corrélation entre le taux de casse prédit avec l'équation et le taux de casse réel en autoclave. Il pourrait donc être mis en place dans l'entreprise afin d'évaluer l'aptitude technologique des haricots lingots.

5. Discussions sur l'ensemble des légumes secs testés

Après avoir détaillé les différents résultats pour chacun des légumes secs il est possible de faire des remarques communes à l'ensemble des légumes secs étudiés.

Au cours de l'appertisation, les différences de taux d'absorption d'eau peuvent s'expliquer par plusieurs phénomènes tels que la capacité variable de l'amidon à s'hydrater (Roudaut et Lefrancq, 2005) ou une résistance du tégument à la pression de gonflement des grains d'amidons (Tiwari et Singh, 2012).

L'appréciation des taux de casse en autocuiseur et en autoclave est dépendante de l'opérateur. Malgré la présence d'abaques photos, il paraît parfois difficile de déterminer la limite d'acceptabilité de la casse du légume sec, et cela notamment pour les lentilles qui sont assez fragiles lors des différentes manipulations. Ce qui rend l'évaluation du taux de casse difficile et par conséquent peut donner des résultats erronés.

De plus, la détermination du taux de casse cible a mis en évidence que l'évaluation seule du taux de casse comme déterminant de l'aptitude technologique n'était pas suffisante. En effet, certains échantillons présentant un taux de casse élevé étaient plus acceptables (ratio légume/jus de couverture, couleur) que des échantillons ayant un taux de casse plus faible. Une analyse sensorielle aurait pu faire ressortir ce caractère (non réalisée pendant le stage).

L'évaluation visuelle du taux de casse à l'ouverture de la boîte reste difficile, puisque les légumes secs sont immergés dans le jus de couverture. Celui-ci pouvant alors masquer les défauts de casse des légumes secs. De ce fait pour les lentilles, les haricots lingots et les haricots rouges il a été difficile d'établir une valeur cible de taux de casse. Cependant pour les haricots GN il a été possible de fixer une valeur limite à 40% de casse. Ainsi au-delà d'un taux de casse supérieur à 40%, les légumes secs se réhydratent beaucoup trop et lors du chauffage en casserole, ils pourraient avoir tendance à former une purée, ce qui rendrait le produit non conforme.

L'évaluation du protocole du CTCPA met en exergue que les modèles établis sur les lentilles, les haricots rouges et sur les GN sont peu prédictifs de leur aptitude technologique dans les conditions de réalisation des essais. Toutefois le modèle établi sur les lingots apporterait une indication sur leur aptitude technologique. Les écarts constatés avec le CTCPA (Tableau 7 à la page suivante) peuvent provenir de diverses sources, la plupart étant liés au procédé utilisé pour la réalisation des essais. Des écarts peuvent aussi provenir de l'évaluation du taux de casse. En effet, les limites d'acceptabilité pouvant être différentes entre le CTCPA et R&R. De plus, le CTCPA a bénéficié d'une plus grande variabilité dans les matières premières évaluées puisque celles-ci provenaient de différents industriels participant à l'étude.

Tableau 7 : Divergences de procédé pouvant expliquer des écarts de résultats (exemple des haricots rouges)

	Procédé du CTCPA	Procédé R&R
Matière première	2 origines testées	1 origine principalement testée
Trempage	5h / 25-30 °C en eau d'Hépar	6h / 25°C en eau de réseau Capdenac
Blanchiment	4 min / 90 °C en eau d'Hépar	6 min / 80°C
Conditionnement	Jutage avec de l'Hépar et 0,5% de sel	Sauce pour chili con carne à base de concentré de tomate
Stérilisation	16 min à 127°C en pilote	35 min à 133°C en pilote
Test en autocuiseur	Eau d'Hépar	Eau de réseau Capdenac

D'après Aptitude technologique des légumes secs (2013a), document interne R&R

La raison la plus probable pouvant expliquer les écarts de résultats est la réalisation des essais d'une part avec de l'eau d'Hépar et une saumure et d'autre part avec de l'eau de réseau et une sauce de chili con carne (exemple de divergences sur le procédé des haricots rouges). En effet, dans la littérature il a été démontré l'importance de la dureté de l'eau dans laquelle sont réalisés le trempage et le blanchiment (CTCPA, 2012 ; USA dry pea & lentil council, 2010) ainsi que l'influence du milieu de cuisson (Roudaut et Lefrancq, 2005).

L'eau d'Hépar est une eau très dure⁵ ce qui va favoriser la fermeté des légumes et par conséquent limiter la casse des légumes secs. A l'inverse l'eau de réseau de Capdenac est peu dure ce qui pourrait rendre les légumes secs mous, cassants ou encore pâteux. Le Tableau 8 permet de comparer les principales caractéristiques des eaux utilisées.

Tableau 8 : Caractéristiques des eaux utilisées par le CTCPA et R&R

	Eau d'Hépar	Eau de réseau Capdenac-gare
Dureté (°F)	187	13,6
pH	7,2	7,1
Calcium (mg.L⁻¹)	549	38
Magnésium (mg.L⁻¹)	119	11,2
Sodium (mg.L⁻¹)	14	8,04
Potassium (mg.L⁻¹)	4	1,56

D'après Résultats d'analyses du contrôle sanitaire des eaux destinées à la consommation humaine (2014) et site internet Hépar (2014)

Les couples temps-température de trempage, de blanchiment et de stérilisation sont différents. Les traitements appliqués chez R&R semblent plus contraignants que ceux du CTCPA. Un trempage plus long entraîne une hydratation plus importante et par conséquent les haricots peuvent être plus susceptibles à la casse. L'influence de la qualité de l'eau de trempage a aussi un effet (comme vu précédemment). Pour l'étape de blanchiment l'impact du couple temps-température ne peut être évalué puisque dans le cas du CTCPA le traitement dure moins longtemps mais à une température

⁵ La dureté de l'eau permet d'évaluer la teneur en minéraux tels que le calcium et le magnésium. Les eaux sont classées de la manière suivante (Agence Régionale de Santé, 2011) :

- TH ≤ 8 °F : eau très peu dure
- 8 °F < TH ≤ 20 °F : eau peu dure
- 20 °F < TH ≤ 30 °F : eau dure
- TH > 30°F : eau très dure

plus élevée. Pour la stérilisation il y a une nette différence entre les barèmes de stérilisation appliqués. Le barème utilisé par R&R est le plus à même d'endommager les haricots. Cependant ce barème plus élevé est nécessaire puisque la recette du chili con carne contient de la viande, et la valeur cuisatrice⁶ de la viande est plus importante que celle des légumes secs.

L'étude des corrélations n'a montré aucune relation entre les différents paramètres et la mesure de texture. Ainsi la méthode d'évaluation de la texture par l'utilisation du pénétromètre peut être remise en cause. Cependant il existe une méthode standardisée de la mesure de la texture en cellule de Kramer (Wang et al., 2012). L'utilisation de cette méthode (matériel non présent dans l'entreprise) aurait peut-être permis d'obtenir des résultats exploitables.

Les corrélations établies entre les différents paramètres pour chaque légume sec n'ont pas permis d'apporter d'informations complémentaires à l'étude. Sauf pour les haricots rouges où une relation a pu être établie entre le rendement de trempage avec le rendement autocuiseur et la conductivité. Peut-être qu'en reconsidérant les corrélations établies, il pourrait être possible de créer de nouveaux modèles plus adaptés à chaque légume sec.

Les modèles sont peu robustes, ce qui signifie qu'ils sont affectés par de petites variations du protocole. Afin de les rendre plus robustes, il aurait fallu effectuer un plus grand nombre de mesures et notamment faire plusieurs mesures sur un même échantillon dans le but d'obtenir une plus grande dispersion. De plus, cela peut aussi être lié au fait que pour un même lot, plusieurs échantillons ont été prélevés afin de pouvoir obtenir 20 mesures indépendantes, bien que la variabilité inter- et intra-lots ait été prouvée. Une réévaluation des modèles ne tenant compte que des différents lots pourraient peut-être améliorer les résultats obtenus par l'étude menée.

L'évaluation du protocole établi par le CTCPA n'a pas permis d'obtenir des modèles statistiques valables pour tous les légumes secs. Malgré cela, il existe des pistes de recherche afin de poursuivre et d'approfondir l'étude.

IV. Les perspectives de l'étude

A. Poursuite et approfondissement de l'étude

1. Réévaluation des modèles des différents légumes secs

Les modèles sont réévalués en ne tenant compte que des échantillons dont le lot fournisseur varie. En effet, le numéro de lot de R&R correspond à celui du jour de livraison. De ce fait, il peut y avoir des numéros de lots différents attribués par l'entreprise pour un même lot fournisseur. En prenant en compte cela, le nombre de mesures pour créer le modèle est largement réduit, et loin de la recommandation du CTCPA qui préconise 20 mesures indépendantes.

a) Modèle sur les lentilles

Lors de la période de prélèvements, 7 lots différents de lentilles ont pu être échantillonnés. Le modèle établi est donc le suivant :

$$\begin{aligned} & \text{Taux de casse autoclave} \\ & = -62,97 + 0,64 (\text{Taux de casse autocuiseur}) + 38,87 (\text{Conductivité}) \end{aligned}$$

⁶ **Valeur cuisatrice** : La valeur cuisatrice est utilisée pour quantifier les modifications organoleptiques ou nutritionnelles provoquées par la cuisson pour les critères retenus par le fabricant (Légifrance, 1991).

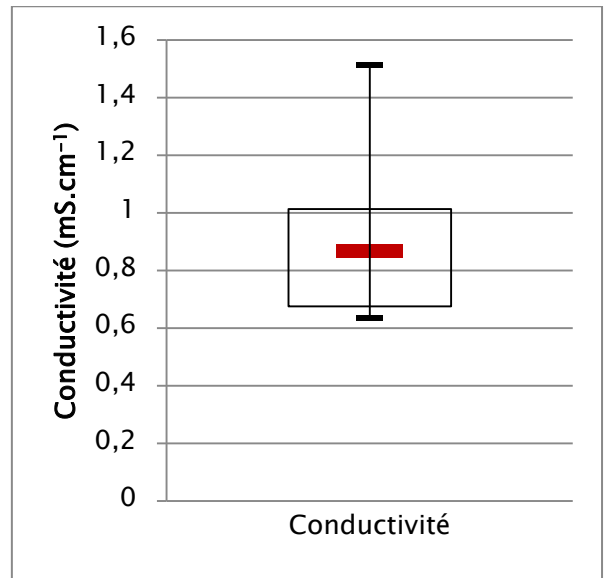
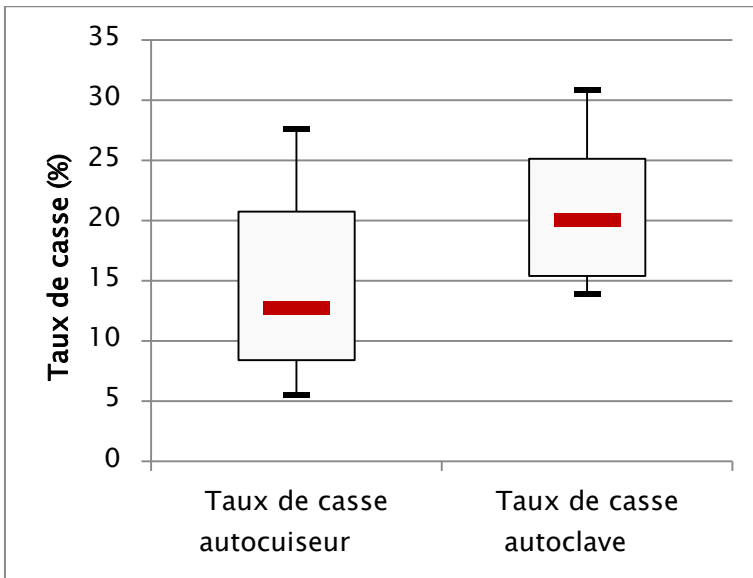


Figure 44 : Evaluation de la robustesse du modèle sur les HR

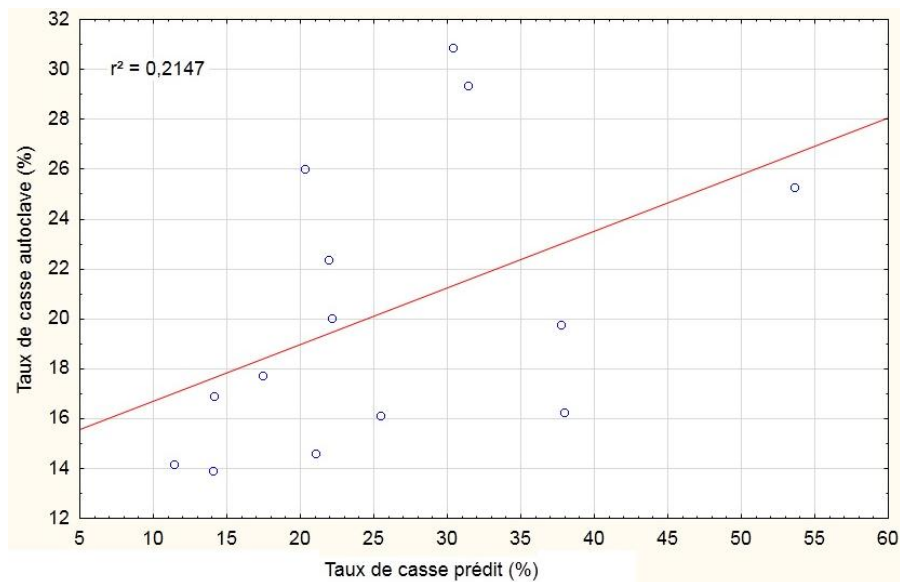


Figure 45 : Evaluation du modèle sur les haricots rouges

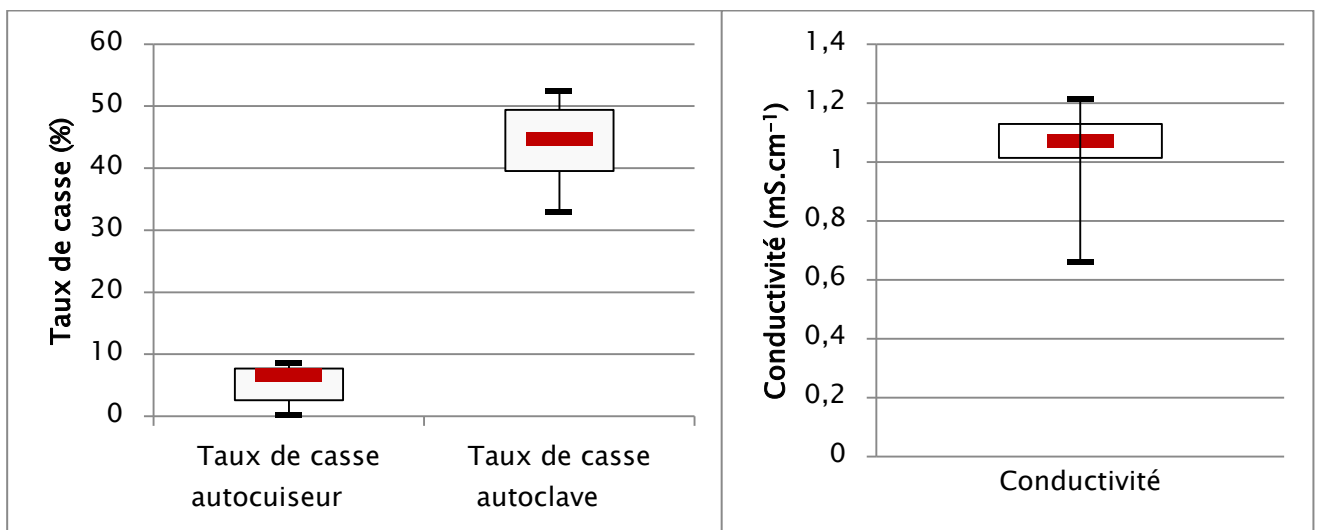


Figure 46 : Evaluation de la robustesse du modèle sur les GN

Le coefficient de corrélation R^2 (0,26) ne permet pas de conclure sur un modèle prédictif du taux de casse pour les lentilles. De plus, l'évaluation du modèle, en tenant compte des 20 mesures effectuées ($R^2 = 0,16$), confirme que pour les lentilles il n'y a pas de modèle fiable permettant d'anticiper le taux de casse en autoclave dans les conditions d'expérimentation.

b) Modèle sur les haricots rouges

Pour les haricots rouges, la réévaluation ne s'effectue que sur des lots dont la stérilisation a été réalisée sur pilote. De même que son évaluation ne se fera qu'avec les valeurs obtenues après appertisation en pilote. Ce choix se justifie par le fait qu'il existe des différences dans les résultats obtenus entre les 2 moyens de stérilisation utilisés (hydrolock et pilote). Le modèle est ainsi établi grâce à 6 lots différents, et donnent le modèle suivant :

$$\begin{aligned} \text{Taux de casse autoclave} \\ = 29,93 + 1,52 (\text{Taux de casse autocuiseur}) - 32,85 (\text{Conductivité}) \end{aligned}$$

A l'établissement de ce modèle, le coefficient de corrélation est plutôt élevé ($R^2 = 0,67$) ce qui laisse présager que le modèle pourrait être prédictif. En étudiant la dispersion des valeurs grâce aux boîtes à moustaches (Figure 44), le modèle paraît robuste. L'étendue entre les valeurs maximales et minimales est importante, et la majorité des valeurs est dispersée autour de la médiane.

Cependant lorsque le modèle est évalué, son coefficient de corrélation ($R^2 = 0,21$) diminue fortement et invalide le modèle (Figure 45). Cela pourrait être dû à une surévaluation du taux de casse en autocuiseur (lié à la casse sur matière première (III.C.2)). Cette surévaluation se répercute donc sur le taux de casse prédit. Afin de pouvoir mieux évaluer ce modèle, il faudrait refaire des essais avec des lots de haricots rouges intègres afin de confirmer la validité du modèle.

c) Modèles sur les haricots GN

Le nouveau modèle sur les GN est créé à partir de 7 lots de haricots. Le modèle obtenu est donc le suivant :

$$\begin{aligned} \text{Taux de casse autoclave} \\ = 13,02 - 0,09 (\text{Taux de casse autocuiseur}) + 30,47 (\text{Conductivité}) \end{aligned}$$

Le coefficient de corrélation du modèle ($R^2 = 0,54$) permettrait de dire que le modèle anticiperait l'aptitude technologique des GN. Cependant l'étude de la dispersion des valeurs montre qu'elles sont homogènes et se répartissent autour de la médiane. Le modèle est donc peu robuste (Figure 46).

L'évaluation du modèle donne un faible coefficient de corrélation ($R^2 = 0,16$) (Figure 47 à la page suivante). Cela pourrait être dû au fait que le modèle soit peu robuste et par conséquent qu'il soit sensible aux moindres variations de valeurs. En effectuant de nouvelles mesures sur de nouveaux lots il deviendrait plus robuste et permettrait d'être prédictif.

d) Modèle sur les haricots lingots

Bien que le modèle sur les haricots lingots établi en III.C.4 soit applicable en l'état, une réévaluation du modèle permet de privilégier la variabilité des lots. Ce nouveau modèle est créé grâce à 8 lots qui permettent d'obtenir le modèle suivant :

$$\begin{aligned} \text{Taux de casse autoclave} \\ = -32,95 - 0,57 (\text{Rendement autocuiseur}) + 73,13 (\text{Conductivité autocuiseur}) \end{aligned}$$

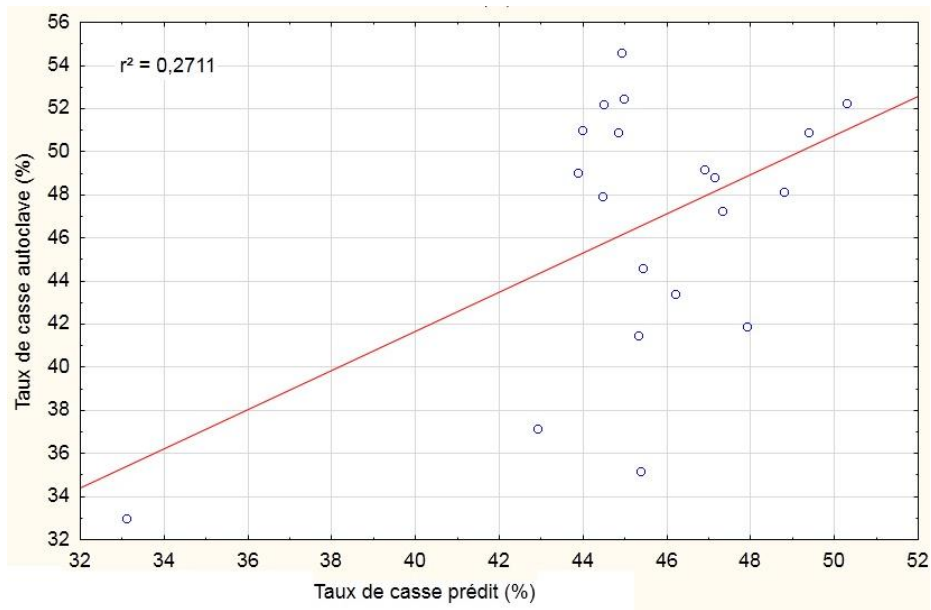


Figure 47 : Evaluation du modèle sur les GN

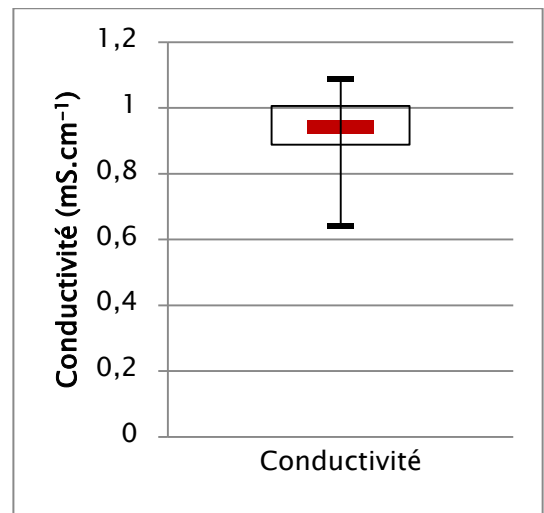
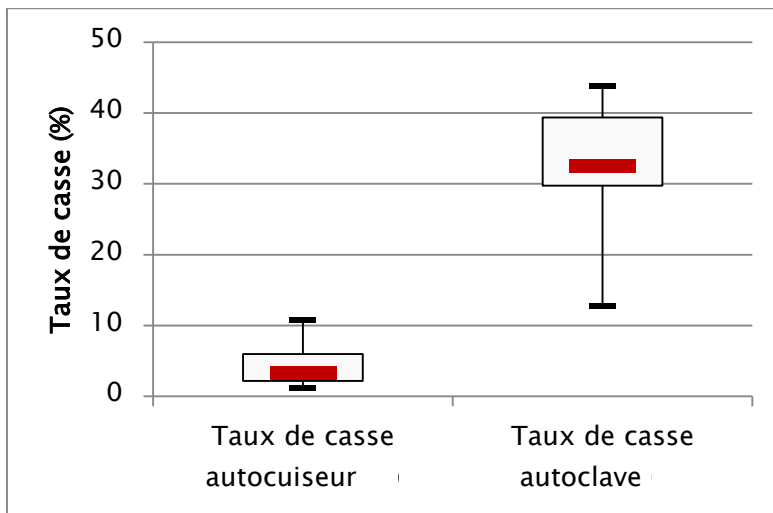


Figure 48 : Evaluation de la robustesse du modèle sur les HL

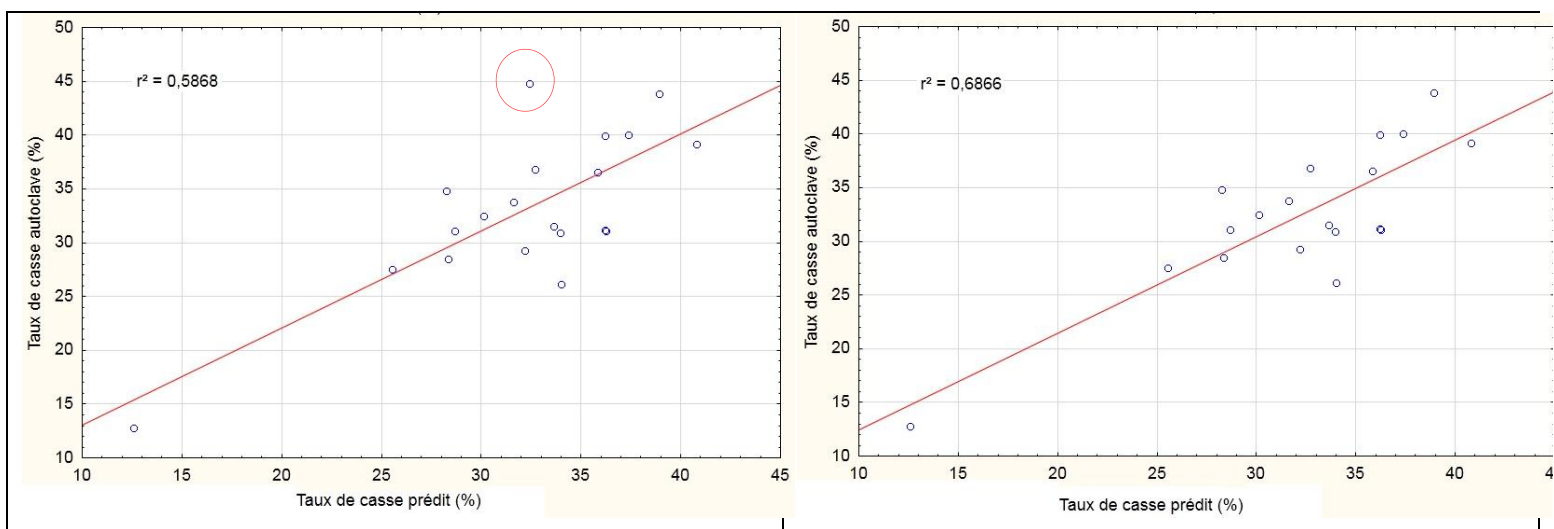


Figure 49 : Evaluation du modèle sur les HL

Le coefficient de corrélation est très élevé ($R^2 = 0,83$) ce qui montre que l'équation établie est prédictive. Toutefois pour les 3 paramètres du modèle les valeurs sont peu dispersées (Figure 48). Le modèle est par conséquent peu robuste. Bien qu'il puisse être sensible aux variations des valeurs, après évaluation, le coefficient de corrélation reste élevé ($R^2 = 0,59$) (Figure 49). De plus, en supprimant un point aberrant (sous-évaluation du taux de casse prédit) dans l'évaluation du modèle (point cerclé en rouge), le R^2 est de 0,69. La sous-estimation du taux de casse par le modèle pourrait s'expliquer par le fait que l'origine de l'échantillon soit différente des autres. D'où l'intérêt de prendre en compte diverses provenances dans l'établissement du modèle.

Ce modèle est donc plus intéressant et plus fiable que celui établi précédemment. Toutefois il serait nécessaire de le rendre plus robuste avec d'autres mesures sur de nouveaux lots.

2. Etablissement d'un autre modèle pour les GN

En reconsidérant les corrélations (sans application de la correction de Holm) sur les haricots GN, il est possible de relier le taux de casse en autoclave avec le rendement en autocuiseur et la conductivité de l'eau de cuisson. Sur la base du protocole établi par le CTCPA, il pourrait alors être mis en place un nouveau modèle statistique. Celui-ci s'exprimerait sous la forme :

Taux de casse autoclave

$$= a + (b \times \text{Rendement autocuiseur}) + (c \times \text{Conductivité autocuiseur})$$

Les coefficients du modèle sont déterminés à l'aide des échantillons ayant servi pour l'étude. Ainsi après application de la régression multiple, le modèle obtenu est le suivant :

Taux de casse autoclave

$$= 29,44 + 20,18 (\text{Rendement autocuiseur}) - 16,32 (\text{Conductivité autocuiseur})$$

Le coefficient de corrélation du modèle ($R^2 = 0,02$) ne permet pas de conclure à un modèle fiable qui permettrait de caractériser l'aptitude technologique des haricots GN à réception. Ainsi la correction de Holm paraît essentielle à appliquer afin de limiter les corrélations dues au hasard.

3. Etude de la relation mise en évidence sur les haricots rouges

La relation mise en évidence au III.C.2 reliant le rendement de trempage avec la conductivité et le rendement autocuiseur est une piste à explorer. Il serait possible d'utiliser ces relations de 2 façons différentes.

- Tout d'abord utiliser le lien entre le rendement de trempage et le rendement autocuiseur. Le rendement exprime le taux d'hydratation lors d'une étape. Le test en autocuiseur pourrait alors être utilisé comme un test rapide de réhydratation ce qui permettrait de piloter les temps de trempage et/ou de blanchiment. De plus, cela aurait un avantage puisque le test en autocuiseur est rapide à effectuer, contrairement à un test de réhydratation qui dure 2h ou à un trempage qui dure 6h. Cependant le test de réhydratation déjà en place dans l'entreprise mesure l'éclatement après hydratation. De ce fait, il faudrait évaluer le taux de casse en autocuiseur et voir s'il existe un lien avec la réhydratation.
- La 2^{ème} solution pourrait être l'établissement d'un modèle statistique qui prédirait le rendement de trempage et permettrait le pilotage du trempage et/ou du blanchiment. Cependant cette méthode pourrait s'avérer longue à mettre en place.

B. Pistes d'amélioration de la qualité par pilotage du procédé

1. Etude de l'influence du trempage sur les lentilles

L'absence d'une phase de trempage lors du procédé de fabrication a été étudiée sur des lentilles vertes. Bien que l'étude ait porté sur des lentilles blondes, il a été montré que les lentilles vertes sont plus sensibles que les lentilles blondes et sont jugées inaptes à l'appertisation par l'étude menée par le CTCPA (2013a). Les lentilles vertes étant plus sujettes à la casse il sera alors possible de transposer les résultats sur les lentilles blondes. La littérature précise également que les lentilles peuvent être cuisinées sans avoir subi de trempage préalable (Roudaut et Lefrancq, 2005). L'étude bibliographique a montré que c'était lors du trempage que l'hydratation des légumes était la plus importante, et qu'une trop forte capacité d'hydratation entraînait le plus souvent de forts taux de casse. De ce fait en supprimant cette étape, des légumes peu adaptés au procédé d'appertisation pourraient être utilisés, la majeure partie de l'absorption de l'eau se faisant pendant le blanchiment et la stérilisation.

Plusieurs origines de lentilles vertes ont été testées et présentent quelques différences, notamment au niveau de la tenue des grains (éclatement). Les lentilles vertes du Puy sont plus sujettes à la casse que les lentilles portant la dénomination lentilles vertes de France. Au niveau de la texture, il n'existe pas de réelles différences entre les lentilles ayant subi un trempage et celles n'ayant pas eu ce traitement. Il est possible de remarquer quelques différences de texture (caractère fondant et fermeté) entre 2 échantillons ayant subi le même traitement.

Au niveau de l'aspect visuel, il existe sur certains lots traités différemment, des différences telles que le rapport sauce/légumes, la couleur des lentilles et de la sauce. Sans trempage les lentilles sont plus brunes que les lentilles ayant trempé pendant 5h. Cela peut être dû à la perte de pigments pendant le trempage (Delacharlerie et al., 2008). La sauce est plus foncée pour les lentilles sans trempage, et paraît plus claire voire grise pour les lentilles avec trempage. De façon générale quel que soit le lot de lentilles considéré, il n'existe pas de réelles différences d'aspect ou de texture entre les deux traitements.

Le fait de supprimer le trempage peut représenter un certain intérêt économique pour l'entreprise et apporter plus de réactivité en production puisqu'une étape du procédé est supprimée. Cependant plusieurs éléments sont à prendre en considération puisqu'un procédé sans trempage nécessiterait des quantités plus importantes à l'emboitage, qui pourrait entraîner un surcoût en matière première. Les quantités emboitées sont plus importantes du fait que les lentilles soient moins réhydratées que les lentilles ayant subi un trempage. En effet, pour une même consigne d'emboitage il faudra une quantité de lentilles uniquement blanchies plus importante qu'une quantité de lentilles trempées et blanchies.

A ce stade de l'étude il n'est pas possible de conclure sur la faisabilité dans l'entreprise de ce procédé, puisque les essais menés ont été réalisés à l'échelle du laboratoire. Pour ce faire il faudrait réaliser une étude de faisabilité sur la ligne de production, réaliser des essais à l'échelle industrielle pour voir si la ligne de production le permet et enfin valider la stabilité du produit.

2. Essais de pilotage de la consigne d'emboitage

Avant de pouvoir tester le pilotage de la consigne d'emboitage, il faudrait que le modèle sur les lingots soit ajusté. Comme l'indique le III.C.4.b), le modèle sur les lingots permet d'anticiper la casse en autoclave. Cependant celui-ci est affecté par les variations de conditions opératoires. Pour limiter cela, il faudrait augmenter le nombre de mesures effectuées de taux de casse et de conductivité. Il faudrait aussi pouvoir intégrer différentes origines voire intégrer des légumes secs d'autres fournisseurs, ce qui permettrait d'avoir une plus grande variabilité entre les échantillons.

Après définition d'un taux de casse maximal en autoclave, le test en autocuiseur pourrait permettre le pilotage de la consigne d'emboitage. En effet, tous les essais ont été réalisés avec la même

consigne. A l'aide du modèle, les mesures de conductivité et de taux de casse en autocuiseur donneraient un taux de casse en autoclave prédit. Si celui-ci dépasse la valeur maximale fixée, la consigne d'emboitage est réévaluée.

3. Autres pistes de pilotage

Il existe d'autres moyens de piloter le procédé dans l'optique d'améliorer la qualité. La littérature scientifique et technique suggère l'amélioration de la qualité en ajoutant des additifs dans l'eau de trempage (II.B.2) et/ou de blanchiment (II.B.3) afin de raffermir les légumes secs ou de corriger une eau trop douce favorisant le ramollissement des légumes secs. Cependant par rapport à la politique de naturalité de l'entreprise cette solution paraît inappropriée.

Une alternative à cela serait d'optimiser les paramètres du procédé tels que le temps et la température des étapes de trempage et de blanchiment. Toutefois il serait aussi intéressant d'étudier les barèmes de stérilisation utilisés pour voir s'ils sont bien adaptés au procédé et à la recette pour laquelle ils sont utilisés. Mais pour le pilotage des barèmes de stérilisation il existe peu de marge de manœuvre. L'optimisation portera donc principalement sur l'optimisation des couples temps-température de trempage et de blanchiment.

L'étude du CTCPA pourrait servir de base pour la recherche d'autres modèles statistiques adaptés au procédé de chacun des légumes secs. Cela pourrait être complété par la recherche d'autres critères permettant d'évaluer l'aptitude technologique des légumes secs (caractérisation biochimique, étude des téguments,...). Ainsi des paramètres chimiques ou biochimiques (teneur en calcium, teneur en amidon) pourraient être mis en relation de manière à mieux anticiper l'aptitude technologique des légumes secs.

Un test d'éclatement est actuellement en place dans l'entreprise mais uniquement réalisé sur les lingots, il pourrait être alors intéressant de le réaliser sur les autres légumes secs. Toutefois le test étant un peu long, l'utilisation de l'autocuiseur pourrait être un bon moyen de réduire le temps du test. Cela nécessite qu'il existe une corrélation entre le taux d'éclatement réalisé après 2h de trempage et le taux d'éclatement obtenu en autocuiseur.

Il existe ainsi de nombreuses autres pistes afin d'améliorer la méthode mise en place par le CTCPA, ou pour tenter de piloter le procédé. Certaines nécessitent d'être testées (test de réhydratation, recherche de nouveaux modèles, ...) et d'autres pourraient être approfondies (réévaluation des modèles, absence de trempage dans le procédé pour les lentilles, ...).

Conclusion

L'étude menée par le CTCPA a abouti à l'établissement d'un protocole. Celui-ci repose sur un test en autocuiseur à réception des lots après avoir établi un modèle statistique. Ce test nécessite des mesures de taux de casse et de conductivité de l'eau de cuisson.

L'évaluation du protocole au sein de R&R a été réalisée sur des haricots blancs (GN et lingots), des haricots rouges et sur des lentilles. Les modèles établis sur les haricots rouges, les GN et les lentilles n'ont pas permis de créer un modèle assez fiable pour pouvoir utiliser ce protocole. Cependant le modèle créé sur les lingots est fiable mais peu robuste.

Le test en autocuiseur a permis de mettre en évidence les changements physiques et biochimiques des légumes secs lors de la cuisson. En effet, la hausse de température modifie leurs caractéristiques biochimiques, ce qui accroît l'hydratation, les échanges ioniques et le taux de casse. L'étude met aussi en évidence que la prédisposition à la casse des légumes secs étaient liée à de nombreux facteurs, notamment les conditions de récolte et de stockage ainsi que les méthodes de transformation industrielles (dureté de l'eau, procédé d'appertisation, ...).

L'évaluation visuelle sur produit fini a montré que le taux de casse n'était pas un facteur suffisant pour qualifier le niveau d'acceptabilité d'un produit. L'utilisation d'une méthode de mesure de la texture (analyse sensorielle ou cellule de Kramer) est nécessaire pour déterminer l'acceptabilité d'un produit.

Le test en autocuiseur s'est accompagné d'un suivi de différents paramètres (calibre, rendements, texture, ...) dans le but de pouvoir établir des corrélations. Mais pour chacun des légumes secs (en dehors des lingots), il n'existe aucune relation permettant la mise en place d'une méthode de caractérisation des légumes secs. Il est donc nécessaire de rechercher d'autres paramètres d'évaluation. Ceux-ci pourraient inclure des mesures de teneur en amidon ou en calcium. En effet ces deux paramètres jouent un rôle essentiel dans l'hydratation des légumes secs.

L'évaluation du protocole du CTCPA et l'étude de différents paramètres, n'ont pas permis d'aboutir à la mise en place d'une méthode fiable de caractérisation de l'aptitude technologique des légumes secs. Cependant la réévaluation des modèles en privilégiant la variabilité des lots (modèles établis uniquement sur des lots fournisseur différents), a montré que les modèles sur les GN, les haricots rouges et les haricots lingots étaient prédictifs. Cette nouvelle évaluation a aussi confirmé que le test sur les lentilles n'était pas utilisable.

Ainsi il est nécessaire de poursuivre l'étude sur les lentilles. La méthode d'évaluation par le taux de casse étant difficile à mettre en œuvre, une méthode de caractérisation plus globale (mesure par pesée, calcul de rendement,...) pourrait être étudiée. Cette nouvelle étude pourrait s'accompagner de la recherche de corrélations intégrant les caractéristiques biochimiques des lentilles.

Bibliographie

Agence Régionale de Santé. *Résultat des analyses du contrôle sanitaire des eaux destinées à la consommation humaine* [En ligne]. juin 2011. Disponible sur : < http://ars.sante.fr/fileadmin/MIDI-PYRENEES/0_INTERNET_ARS_MIP/VOTRE_SANTE/Votre_environnement/synthese_2008_2011/MP_TH.pdf >

Agence Régionale de Santé. *Résultats des analyses du contrôle sanitaire des eaux destinées à la consommation humaine* [En ligne]. juillet 2014. Disponible sur : < <http://orobnat.sante.gouv.fr/orobnat/rechercherResultatQualite.do> >

Anses. « Composition nutritionnelle des aliments ». In : *Table Ciqual - Compos. Nutr. Aliments* [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], 2013a. Disponible sur : < <https://pro.anses.fr/TableCIQUAL/index.htm> >

Anses. « Les protéines ». In : *Anses - Agence Natl. Sécurité Sanit. Aliment. Environ. Trav.* [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], 2013b. Disponible sur : < <https://www.anses.fr/fr/content/les-prot%C3%A9ines> >

Awuah G. B., Ramaswamy H. S., Economides A. « Thermal processing and quality: Principles and overview ». *Chem. Eng. Process. Process Intensif.* [En ligne]. juin 2007. Vol. 46, n°6, p. 584-602. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2006.08.004> >

Bhatty R. S., Nielsen M. A., Slinkard A. E. « Comparison of the Cooking Quality of Laird and Commercial Chilean Lentils Grown in the Canadian Prairies ». *Can. Inst. Food Sci. Technol. J.* [En ligne]. avril 1983. Vol. 16, n°2, p. 104-110. Disponible sur : < [http://dx.doi.org/10.1016/S0315-5463\(83\)72068-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0315-5463(83)72068-7) >

Bhatty R. S., Slinkard A. E. « Relationship Between Phytic Acid and Cooking Quality in Lentil ». *Can. Inst. Food Sci. Technol. J.* [En ligne]. avril 1989. Vol. 22, n°2, p. 137-142. Disponible sur : < [http://dx.doi.org/10.1016/S0315-5463\(89\)70349-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0315-5463(89)70349-7) >

Bhatty R. S. « Composition and Quality of Lentil (*Lens culinaris Medik*): A Review ». *Can. Inst. Food Sci. Technol. J.* [En ligne]. avril 1988. Vol. 21, n°2, p. 144-160. Disponible sur : < [http://dx.doi.org/10.1016/S0315-5463\(88\)70770-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0315-5463(88)70770-1) >

Bishnoi S., Khetarpaul N. « Variability in physico-chemical properties and nutrient composition of different pea cultivars ». *Food Chem.* [En ligne]. 1993. Vol. 47, n°4, p. 371-373. Disponible sur : < [http://dx.doi.org/10.1016/0308-8146\(93\)90179-J](http://dx.doi.org/10.1016/0308-8146(93)90179-J) >

Brennan J. G., Grandison A. S., Wiley InterScience (Online service). *Food processing handbook* [En ligne]. Weinheim : Wiley-VCH, 2011. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1002/9783527634361> > ISBN : 9783527634361 3527634363 9783527324682 3527324682.

Chesworth J., Guerin H. *L'alimentation des ruminants* [En ligne]. Paris : Maisonneuve et Larose, 1996. 263 p. Disponible sur : < http://publications.cirad.fr/une_notice.php?dk=306593 >

CIAT. *Développement et morphologie de la graine* [En ligne]. 1989. Disponible sur : < http://books.google.fr/books?id=oahWcho8BA0C&printsec=frontcover&hl=fr&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false >

Clark S., Jung S., Lamsal B. *Food processing: principles and applications* [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], 2014. Disponible sur : < <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=752702> > ISBN : 9781118846292 111884629X 9781118846315 1118846311.

- CTCPA. « Comportement technologique des légumes secs : Pois chiches et haricots rouges ». *Inf. Tech.* 2000. n°166,.
- CTCPA. *Aptitude technologique des légumes secs pour l'appertisation*. [s.l.] : CTCPA, 2013a.
- CTCPA. *Aptitude technologique des légumes secs pour l'appertisation : Synthèse des résultats obtenus en 2011*. [s.l.] : [s.n.], 2012.
- CTCPA. *FICHE PROTOCOLE Anticipation du comportement des légumes secs lors de leur transformation en conserve*. 2014.
- CTCPA. *Aptitude technologique des légumes secs à l'appertisation : les lentilles*. 2013b.
- Dalmas P. « Mesure de conductivité sur une eau pure ou comment appliquer la norme USP24-NF19 ». *Gaz. Lab.* [En ligne]. 2000. Disponible sur : < http://www.radiometer-analytical.com/pdf/conductivite_usp.pdf >
- Delacharlerie S., De Biourge S., Chéné C., Sindic M., Deroanne C. *HACCP organoleptique: guide pratique*. Gembloux : Presses agronomiques de Gembloux, 2008. ISBN : 9782870160848 2870160844.
- DGCIS. « La qualité : quelques notions clés ». In : *Direction Générale Compét. Ind. Serv.* [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], 2012. Disponible sur : < <http://www.entreprises.gouv.fr/politique-et-enjeux/qualite/notions-cles> >
- ElMaki H. B., AbdelRahaman S. M., Idris W. H., Hassan A. B., Babiker E. E., El Tinay A. H. « Content of antinutritional factors and HCl-extractability of minerals from white bean (*Phaseolus vulgaris*) cultivars: Influence of soaking and/or cooking ». *Food Chem.* [En ligne]. janvier 2007. Vol. 100, n°1, p. 362-368. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.09.060> >
- FAOSTAT. « Production ». In : *FOOD Agric. Organ. U. N. World Hunger* [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], 2012. Disponible sur : < <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor> >
- Fardet A., Souchon I., Dupont D. *Structure des aliments et effets nutritionnels* [En ligne]. Versailles : Éditions Quæ, 2013. Disponible sur : < <http://books.google.fr/books?id=a6RaAgAAQBAJ&pg=PA107&dq=g%C3%A9latinisation+amidon&hl=fr&sa=X&ei=nXjfU5OAL4mS0QW-yYGwDQ&ved=0CBQQ6AEwADgK#v=onepage&q=g%C3%A9latinisation%20amidon&f=false> > ISBN : 9782759220120 2759220125.
- Fellows P. *Food processing technology principles and practice* [En ligne]. Boca Raton, Fla.; Oxford : CRC Press; Woodhead Pub., 2009. Disponible sur : < <http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpFPTPPE14> > ISBN : 9781615830411 1615830413 9781845696344 1845696344.
- Fortin J. *L'encyclopédie visuelle des aliments* [En ligne]. Montréal : Québec Amérique, 1996. Disponible sur : < <http://site.ebrary.com/id/10714253> > ISBN : 978-2-7644-10-98-1.
- France AgriMer. *Crise économique et comportements de consommation alimentaire des Français* [En ligne]. 2011. Disponible sur : < http://www.franceagrimer.fr/content/download/3087/16697/file/crise_conso2011.pdf >
- Ghafoor M., Misra N. N., Mahadevan K., Tiwari B. K. « Ultrasound assisted hydration of navy beans (*Phaseolus vulgaris*) ». *Ultrason. Sonochem.* [En ligne]. janvier 2014. Vol. 21, n°1, p. 409-414. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.05.016> >
- Abu-Ghannam N. « Modelling textural changes during the hydration process of red beans ». *J. Food Eng.* [En ligne]. novembre 1998. Vol. 38, n°3, p. 341-352. Disponible sur : < [http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00127-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00127-7) > (consulté le 4 avril 2014)

Ibarz A., González C., Barbosa-Cánovas G. V. « Kinetic models for water adsorption and cooking time in chickpea soaked and treated by high pressure ». *J. Food Eng.* [En ligne]. août 2004. Vol. 63, n°4, p. 467-472. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2003.09.008> >

Jiménez Elizondo N. *Impact des opérations thermiques agroalimentaires à hautes températures sur la dégradation des anthocyanes : Caractérisation et modélisation des cinétiques réactionnelles* [En ligne]. [s.l.] : Montpellier SupAgro, 2011. 183 p. Disponible sur : < http://www.supagro.fr/theses/extranet/11-0035_JIMENEZ.pdf >

Joshi M., Adhikari B., Panozzo J., Aldred P. « Water uptake and its impact on the texture of lentils (*Lens culinaris*) ». *J. Food Eng.* [En ligne]. septembre 2010. Vol. 100, n°1, p. 61-69. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.03.028> >

Larousse. « Définitions : chélateur - Dictionnaire de français Larousse ». [s.l.] : [s.n.], 2014. Disponible sur : < <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/ch%C3%A9lateur/15059> >

Légifrance. *Arrêté du 15 juillet 1991 relatif au guide de bonnes pratiques hygiéniques des plats préparés réfrigérés élaboré par le Syndicat national des fabricants de plats préparés (Synafap)* [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], 1991. Disponible sur : < http://legifrance.gouv.fr/affichTexteArticle.do;jsessionid=6516B5B7E6CAB6FEDA4A414B0CDDDB39.tpdjo08v_2?idArticle=LEGIARTI000006604284&cidTexte=LEGITEXT000006071388&dateTexte=20100423 >

Lu W., Chang K. C. « Correlations Between Chemical Composition and Canning Quality attributes of Navy Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) ». *Cereal Chemistry*. 1996. Vol. 73, n°6, p. 785-787.

Marini Djang'Eing'A R. *Evaluation des différentes approches pour l'estimation de l'incertitude des mesures analytiques* [En ligne]. [s.l.] : Université de Liège, 2006. Disponible sur : < http://bictel.ulg.ac.be/ETD-db/collection/available/ULgetd-07032007-221300/unrestricted/10_ChapitreIV_3.pdf >

MBO Partenaires. « MBO PARTENAIRES et SOCIETE GENERALE CAPITAL PARTENAIRES investissent dans les plats cuisinés COFIGEO ». In : *Fusacq Buzz - Actual. Collab. Fusions-Acquis*. [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], 2014. Disponible sur : < <http://www.fusacq.com/buzz/mbo-partenaires-et-societe-generale-capital-partenaires-investissent-dans-les-plats-cuisines-cofigeo-a67259.html> >

Miceli A., Miceli C. « Effect of thermal treatments on vitality and physical characteristics of bean, chickpea and lentil ». *J. Stored Prod. Res.* [En ligne]. octobre 2012. Vol. 51, p. 86-91. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.jspr.2012.08.001> >

Nestlé Waters. « L'histoire d'HÉPAR : de la source à la bouteille d'eau ». In : *Hépar Un Esprit Libre Dans Un Corps Libre* [En ligne]. [s.l.] : [s.n.], 2014. Disponible sur : < <http://www.hepar.fr/decouvrez-l-eau-d-hepar/l-histoire-d-hepar> >

OEAP. *Recommandation nutrition - Groupe d'étude des marches de restauration collective et nutrition* [En ligne]. [s.l.] : Ministère de l'économie et des finances, 2013. Disponible sur : < http://www.economie.gouv.fr/files/directions_services/daj/marches_publics/oeap/gem/nutrition/nutrition.pdf >

Pirhayati M., Soltanizadeh N., Kadivar M. « Chemical and microstructural evaluation of 'hard-to-cook' phenomenon in legumes (pinto bean and small-type lentil): 'Hard-to-cook' phenomenon in bean and lentil ». *Int. J. Food Sci. Technol.* [En ligne]. septembre 2011. Vol. 46, n°9, p. 1884-1890. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02697.x> >

Powrie W. D., Adams M. W., Pflug I. J. « Chemical, Anatomical, and Histochemical Studies on the Navy Bean Seed ». *Agron. J.* [En ligne]. 1960. Vol. 52, n°3, p. 163. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.2134/agronj1960.00021962005200030013x> >

Programme mixte FAO/OMS sur les normes alimentaires, Commission du codex alimentarius, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Organisation mondiale de la santé. *Céréales, légumes secs, légumineuses et matières protéiques végétales*. Rome : Organisation mondiale de la santé : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 2007. ISBN : 1020-2560.

Rani P. R., Chelladurai V., Jayas D. S., White N. D. G., Kavitha-Abirami C. V. « Storage studies on pinto beans under different moisture contents and temperature regimes ». *J. Stored Prod. Res.* [En ligne]. janvier 2013. Vol. 52, p. 78-85. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.jspr.2012.11.003> >

Raynal et Roquelaure. « Saga de la marque ». [s.l.] : [s.n.], 2014. Disponible sur : < <http://www.raynal-roquelaure.fr/index.php/raynal/saga-de-la-marque/la-rencontre> >

RIA. « Un nouveau tour de table donne de nouvelles ambitions à Raynal et Roquelaure ». *Rev. Ind. Agroaliment.* [En ligne]. 28 mars 2014. n°519,. Disponible sur : < <http://www.ria.fr/actualites/plats-cuisines-appertises-un-nouveau-tour-de-table-donne-de-nouvelles-ambitions-a-raynal-et-roquelaure-86250.html> >

Rivera J. A., Hohlberg A. I., Aguilera J. M., Plhak L. C., Stanley D. W. « Hard-To-Cook Defect in Black Beans — Peroxidase Characterization and Effect of Heat Pretreatment and Storage Conditions on Enzyme Inactivation ». *Can. Inst. Food Sci. Technol. J.* [En ligne]. juin 1989. Vol. 22, n°3, p. 270-275. Disponible sur : < [http://dx.doi.org/10.1016/S0315-5463\(89\)70394-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0315-5463(89)70394-1) >

Roudaut H., Lefrancq E. *Alimentation théorique* [En ligne]. Bordeaux; Rueil-Malmaison : CRDP Aquitaine ; Doin, 2005. 303 p. Disponible sur : < http://books.google.fr/books?id=dsJ48sOjnmC&pg=PA151&dq=consommation+l%C3%A9gumineuse&hl=fr&sa=X&ei=N-N5U7LiKsH60gW4n4HICw&redir_esc=y#v=onepage&q=consommation%20l%C3%A9gumineuse&f=false > ISBN : 2704011923 2866174879 9782704011926 9782866174873.

Sajo Nana E. C., Michiels L. « Echanges cationiques au cours de l'appertisation des haricots secs entreposés (*Phaseolus vulgaris*) ». *Ind. Aliment. Agric.* 1990. Vol. 107, n°9, p. 773-781.

Sgarbieri V. C. « Composition and nutritive value of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) ». *World Rev. Nutr. Diet.* 1989. Vol. 60, p. 132-198.

Tacon A. G. ., Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. *Pathologie nutritionnelle des poissons: signes morphologiques des carences et intoxications alimentaires chez les poissons d'élevage* [En ligne]. Rome : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 1995. Disponible sur : < <http://www.fao.org/docrep/003/T0700F/T0700F00.htm#TOC> > ISBN : 9252032673 9789252032670.

Taiwo K. A., Akanbi C. T., Ajibola O. O. « Regression relationships for the soaking and cooking properties of two cowpea varieties ». *J. Food Eng.* [En ligne]. août 1998. Vol. 37, n°3, p. 331-344. Disponible sur : < [http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00034-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00034-X) >

Tiwari B. K., Singh N. *Pulse chemistry and technology*. Cambridge : Royal Society of Chemistry, 2012. ISBN : 9781849733311 1849733317.

USA dry pea & lentil council. *Processing information & technical manual*. [s.l.] : [s.n.], 2010.

Wang C. R., Chang K. C., Grafton K. « Canning Quality Evaluation of Pinto and Navy Beans ». *J. Food Sci.* [En ligne]. mai 1988. Vol. 53, n°3, p. 772-776. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1988.tb08953.x> >

Wang N., Panozzo J. F., Wood J., Malcolmson L. J., Arganosa G. C., Baik B.-K., Driedger D., Han J. « ACCI Approved Methods Technical Committee Report - Collaborative Study on a Method for Determining Firmness of Cooked Pulses ». *CEREAL FOOD WORLD*. 2012. Vol. 57, n°5,.

Zanella-Díaz E., Mújica-Paz H., Soto-Caballero M. C., Welti-Chanes J., Valdez-Fragoso A. « Quick hydration of tepary (*Phaseolus acutifolius* A. Gray) and pinto beans (*Phaseolus vulgaris* L.) driven by pressure gradients ». *LWT - Food Sci. Technol.* [En ligne]. mai 2014. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2014.05.042> >

Annexes

Table des annexes

Annexe 1 : Protocole établi par le CTCPA	I
Annexe 2 : Paramètres du modèle pour chaque légume sec	III
Annexe 3 : Matrice de corrélation pour les lentilles	IV
Annexe 4 : Matrice des p-values pour les lentilles	V
Annexe 5 : Matrice de corrélations des haricots rouges	VI
Annexe 6 : Matrice des p-values des haricots rouges	VII
Annexe 7 : Matrices de corrélations pour les haricots GN	VIII
Annexe 8 : Matrice des p-values des haricots GN	IX
Annexe 9 : Matrice de corrélations des haricots lingots	X
Annexe 10 : Matrice des p-values des haricots lingots	XI



FICHE PROTOCOLE

Anticipation du comportement des légumes secs lors de leur transformation en conserve

Contact CTCPA : Dr. Magali Wagner - mwagner@ctcpa.org

Objet du test rapide : évaluer le comportement technologique de réhydratation / cuisson de légumes secs, directement et sans trempage préalable, pour prédire leur tenue lors d'un procédé complet de transformation sur ligne industrielle (trempage / blanchiment / appertisation).

Applications testées au CTCPA : lentilles, haricots blancs et haricots rouges

ETAPE 1 : Préparation du matériel nécessaire

- 1 plaque de cuisson ;
- 1 autocuiseur ménager volume 6 à 8 litres, avec panier vapeur, équipé d'une soupape¹ ;
- 1 balance électronique ; précision requise : au moins 0,1 g
- 1 conductimètre ;
- 1 solution standard de calibrage pour le conductimètre de 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$;
- 1 référentiel de qualité des légumes secs édité par le CTCPA (planches photos)

ETAPE 2 : Préparation Matière Première

Recette légumes secs

Légumes secs	200 g	10 %
Eau minérale naturelle ² Hépar®	2 L	90 %

ETAPE 3 : Cuisson des légumes secs en autocuiseur

- Disposer les 200 g de légumes secs dans le panier vapeur de l'autocuiseur ;
- Déposer le panier vapeur au fond de l'autocuiseur ;
- Verser 2 L d'eau Hépar® dans l'autocuiseur de façon à ce que les légumes secs soient immergés ; la quantité est volontairement en excès afin de pouvoir prélever après cuisson
- Fermer le couvercle de l'autocuiseur et vérifier la bonne mise en place de la soupape de pression ;
- Noter le temps, mettre en chauffe l'autocuiseur jusqu'à la montée de la pression (la vapeur s'échappe de la soupape, la température est arrivée à 112°C), noter le temps, puis laisser cuire 10 min exactement³.

¹ Par exemple : autocuiseur type SEB (à soupape tournante – modèle « historique ») ou à ressort taré type Clipso® en position « légumes » ou autres modèles : la température d'équilibre doit être de 112°C

² L'eau minérale Hépar a été choisie pour sa minéralité élevée et constante (calcium et magnésium) adaptée pour faire ce test. Si vous employez une autre eau, les résultats seront différents. Dans tous les cas, la même qualité d'eau doit être utilisée pour tous les tests pour pouvoir comparer les résultats.

³ La durée de montée à 112°C peut varier en fonction de l'équipement utilisé. Les essais successifs doivent être conduits avec le même protocole : respecter exactement une durée constante de mise sous pression + dix min sous pression.

- Retirer du feu, faire retomber la pression en pré-refroidissant l'autocuiseur fermé sous l'eau courante et ôter la soupape, puis ouvrir l'autocuiseur lorsque la pression est nulle ; *NB : ne pas décompresser trop rapidement en libérant directement la soupape sans pré-refroidir sous l'eau froide courante, cela contribuerait à l'éclatement des grains.*
- Egoutter les légumes secs cuits simplement à l'air, sans les rincer, pendant 10 min exactement à température ambiante ; *NB : garder l'eau de cuisson résiduelle*
- Prélever au hasard afin de peser exactement 100,0 g de haricots, ou 20,0 g de lentilles ;
- Séparer dans cet échantillon les individus cassés ou fendus et peser ce lot de non-conformes (utiliser les planches photos du référentiel de qualité des légumes secs CTCPA) ; **Attention : Le seuil de « conformité » pour déclarer un légume sec cuit « avec défaut », est laissé à l'appréciation de chaque industriel, mais devra être gardé stable pour pouvoir établir les corrélations (donc si possible : tests réalisés par les mêmes opérateurs entraînés).**

La masse de ce lot de non-conforme donne le « taux de casse autocuiseur » :

« Taux de casse autocuiseur » = masse des grains cassés et fendus pour 100 g (ou 20 g)

Exemple :

Sur 101,7 g de haricots cuits, 25,3 g sont non-conformes soit un taux de casse autocuiseur de 0,249

ETAPE 4 : Mesure analytique de conductivité électrique de l'eau après cuisson

- Prélever une quantité suffisante d'eau de cuisson résiduelle dans un pot de prélèvement
- Refermer le pot et le stocker à température ambiante/réfrigérée (la mesure peut se faire à chaud si le conductimètre prévoit une calibration par rapport à la température mais préférer une mesure à 20°C)
- Calibrer le conductimètre avec une solution standard de 1413µS/cm ;
- Mesurer la conductivité de l'eau de cuisson, après cuisson : **Conductivité Autocuiseur (µS/cm)**

ETAPE 5 : Calcul prévisionnel : Anticipation du taux de casse autocuiseur

Le test rapide de cuisson en autocuiseur permet d'anticiper le taux de grain fendus / cassés / éclatés observé après le process industriel. **Une corrélation multiple doit être établie au cas par cas⁴** (pour chaque type de légume sec, pour chaque site industriel).

Attention : Un outil logiciel statistique de traitement de données doit être utilisé car il s'agit d'une corrélation avec deux paramètres d'entrée.

La relation entre le taux de casse dans produit après process complet et appertisation en autoclave, et les mesures faite avec le test rapide en autocuiseur, s'exprime par la relation suivante :

Taux casse autoclave = a + (b x Taux casse autocuiseur) + (c x Conductivité autocuiseur)

(Remarque : il faut au moins 20 mesures indépendantes pour déterminer les coefficients a, b et c)

⁴ Aucune corrélation « générique » fiable ne peut être proposée, car les procédés industriels sont très variables d'un site à l'autre, parfois même d'une ligne à l'autre

Annexe 2 : Paramètres du modèle pour chaque légume sec

Variables LB	Nombres d'observations	Moyenne	Ecart-type	Maximum	Minimum
Taux de casse autoclave (%)	20	29,19	5,19	39,27	16,18
Taux de casse autocuiseur (%)	20	20,15	4,59	29,8	12,41
Conductivité (mS.cm ⁻¹)	20	2,04	0,11	2,39	1,84

Variables HR	Nombres d'observations	Moyenne	Ecart-type	Maximum	Minimum
Taux de casse autoclave (%)	20	18,99	5,46	30,9	10,86
Taux de casse autocuiseur (%)	20	18,19	9,16	34,78	3,16
Conductivité (mS.cm ⁻¹)	20	0,99	0,25	1,51	0,64

Variables GN	Nombres d'observations	Moyenne	Ecart-type	Maximum	Minimum
Taux de casse autoclave (%)	20	46,57	6,1	54,59	33
Taux de casse autocuiseur (%)	20	5,57	2,91	10,52	0,29
Conductivité (mS.cm ⁻¹)	20	1,08	0,12	1,25	0,66

Variables HL	Nombres d'observations	Moyenne	Ecart-type	Maximum	Minimum
Taux de casse autoclave (%)	20	33,12	7,11	44,84	12,79
Taux de casse autocuiseur (%)	20	4,34	2,74	10,73	1,11
Conductivité (mS.cm ⁻¹)	20	0,93	0,09	1,09	0,64

Annexe 3 : Matrice de corrélation pour les lentilles

	Calibre	Capacité d'hydratation en 15h	Taux d'hydratation 15h	Taux d'hydratation 5h	Coefficient d'hydratation	Taux de casse autocuiseur	Conductivité autocuiseur	Taux de casse autoclave	Rendement autocuiseur	Rendement de trempage	Rendement de stérilisation
Calibre	1	0,3941	-0,2795	-0,4461	0,3941	0,0998	-0,3570	-0,1546	-0,1037	-0,4461	0,3524
Capacité d'hydratation en 15h	0,3941	1	0,3817	-0,1081	1,0000	0,4405	-0,1620	-0,0121	-0,4097	-0,1081	-0,1420
Taux d'hydratation 15h	-0,2795	0,3817	1	0,4606	0,3817	0,3476	0,1393	0,1206	0,0070	0,4606	-0,1790
Taux d'hydratation 5h	-0,4461	-0,1081	0,4606	1	-0,1081	0,3526	0,5254	0,2718	-0,0636	1,0000	-0,3270
Coefficient d'hydratation	0,3941	1,0000	0,3817	-0,1081	1	0,4405	-0,1620	-0,0121	-0,4097	-0,1081	-0,1420
Taux de casse autocuiseur	0,0998	0,4405	0,3476	0,3526	0,4405	1	-0,2330	0,3109	-0,2885	0,3526	0,0301
Conductivité autocuiseur	-0,3570	-0,1620	0,1393	0,5254	-0,1620	-0,2330	1	0,2160	0,4350	0,5254	-0,1287
Taux de casse autoclave	-0,1546	-0,0121	0,1206	0,2718	-0,0121	0,3109	0,2160	1	0,1896	0,2718	0,4656
Rendement autocuiseur	-0,1037	-0,4097	0,0070	-0,0636	-0,4097	-0,2885	0,4350	0,1896	1	-0,0636	0,2927
Rendement de trempage	-0,4461	-0,1081	0,4606	1,0000	-0,1081	0,3526	0,5254	0,2718	-0,0636	1	-0,3270
Rendement de stérilisation	0,3524	-0,1420	-0,1790	-0,3270	-0,1420	0,0301	-0,1287	0,4656	0,2927	-0,3270	1

Annexe 4 : Matrice des p-values pour les lentilles

	Calibre	Capacité d'hydratation en 15h	Taux d'hydratation 15h	Taux d'hydratation 5h	Coefficient d'hydratation	Taux de casse autocuiseur	Conductivité autocuiseur	Taux de casse autoclave	Rendement autocuiseur	Rendement de trempage	Rendement de stérilisation
Calibre	xxx										
Capacité d'hydratation en 15h	0,0856	xxx									
Taux d'hydratation	0,2327	0,0967	xxx								
Taux d'hydratation 5h	0,0486	0,6501	0,0410	xxx							
Coefficient d'hydratation	0,0856	0,0000	0,0967	0,6501	xxx						
Taux de casse autocuiseur	0,6753	0,0519	0,1331	0,1273	0,0519	xxx					
Conductivité autocuiseur	0,1223	0,4951	0,5581	0,0174	0,4951	0,3228	xxx				
Taux de casse autoclave	0,5152	0,9598	0,6125	0,2464	0,9598	0,1822	0,3603	xxx			
Rendement autocuiseur	0,6636	0,0729	0,9765	0,7901	0,0729	0,2174	0,0553	0,4235	xxx		
Rendement de trempage	0,0486	0,6501	0,0410	0,0000	0,6501	0,1273	0,0174	0,2464	0,7901	xxx	
Rendement de stérilisation	0,1275	0,5503	0,4502	0,1594	0,5503	0,8998	0,5888	0,0386	0,2104	0,1594	xxx

* **Corrélations après correction de Holm**

Annexe 5 : Matrice de corrélations des haricots rouges

	Calibre	Capacité d'hydratation	Taux d'hydratation	Taux de casse autocuiseur	Conductivité autocuiseur	Taux de casse autoclave	Rendement autocuiseur	Rendement de trempage	Rendement de stérilisation	Texture autocuiseur	Texture autoclave
Calibre	1	-0,5509	0,2450	0,1068	0,4593	-0,3754	0,3586	0,4869	-0,3673	0,4274	-0,2717
Capacité d'hydratation	-0,5509	1	0,4316	0,0395	0,1594	0,0907	0,2306	0,1315	0,3457	-0,0130	0,5145
Taux d'hydratation	0,2450	0,4316	1	0,1518	0,5473	-0,1900	0,4593	0,5023	0,1057	0,2429	0,1899
Taux de casse autocuiseur	0,1068	0,0395	0,1518	1	0,5248	0,2460	0,7065	0,5151	-0,1676	0,5038	0,1839
Conductivité autocuiseur	0,4593	0,1594	0,5473	0,5248	1	0,0113	0,8991	0,7972	-0,3843	0,7393	0,2222
Taux de casse autoclave	-0,3754	0,0907	-0,1900	0,2460	0,0113	1	0,0454	-0,2078	0,0823	0,0417	-0,0349
Rendement autocuiseur	0,3586	0,2306	0,4593	0,7065	0,8991	0,0454	1	0,8492	-0,4265	0,7945	0,2669
Rendement de trempage	0,4869	0,1315	0,5023	0,5151	0,7972	-0,2078	0,8492	1	-0,4121	0,7118	0,1512
Rendement de stérilisation	-0,3673	0,3457	0,1057	-0,1676	-0,3843	0,0823	-0,4265	-0,4121	1	-0,4921	-0,0760
Texture autocuiseur	0,4274	-0,0130	0,2429	0,5038	0,7393	0,0417	0,7945	0,7118	-0,4921	1	-0,1506
Texture autoclave	-0,2717	0,5145	0,1899	0,1839	0,2222	-0,0349	0,2669	0,1512	-0,0760	-0,1506	1

Annexe 6 : Matrice des p-values des haricots rouges

	Calibre	Capacité d'hydratation	Taux d'hydratation	Taux de casse autocuiseur	Conductivité autocuiseur	Taux de casse autoclave	Rendement autocuiseur	Rendement de trempage	Rendement de stérilisation	Texture autocuiseur	Texture autoclave
Calibre	xxx										
Capacité d'hydratation	0,0118	xxx									
Taux d'hydratation	0,2978	0,0574	xxx								
Taux de casse autocuiseur	0,6540	0,8687	0,5228	xxx							
Conductivité autocuiseur	0,0416	0,5019	0,0125	0,0175	xxx						
Taux de casse autoclave	0,1029	0,7038	0,4224	0,2959	0,9623	xxx					
Rendement autocuiseur	0,1205	0,3280	0,0416	0,0005	0,0000	0,8491	xxx				
Rendement de trempage	0,0295	0,5806	0,0240	0,0201	0,0000	0,3794	0,0000	xxx			
Rendement de stérilisation	0,1111	0,1354	0,6573	0,4799	0,0943	0,7302	0,0607	0,0710	xxx		
Texture autocuiseur	0,0602	0,9565	0,3022	0,0235	0,0002	0,8613	0,0000	0,0004	0,0275	xxx	
Texture autoclave	0,2466	0,0203	0,4226	0,4375	0,3463	0,8838	0,2553	0,5246	0,7503	0,5261	xxx

* Corrélations après correction de Holm

Annexe 7 : Matrices de corrélations pour les haricots GN

	Calibre	Capacité d'hydratation en 15h	Taux d'hydratation	Taux casse autocuiseur	de Conductivité autocuiseur	Taux casse autoclave	de Rendement autocuiseur	Rendement de trempage	Rendement de stérilisation	Texture autocuiseur	Texture autoclave
Calibre	1	-0,1004	0,3069	0,4709	0,5951	0,4991	0,7049	0,3104	-0,0488	0,2408	0,1083
Capacité d'hydratation en 15h	-0,1004	1	0,4645	0,1957	-0,0184	-0,0293	-0,0554	-0,0588	0,0231	-0,2698	0,2888
Taux d'hydratation	0,3069	0,4645	1	0,2714	0,2083	-0,1030	0,2337	0,1545	0,1586	0,1828	-0,0291
Taux casse autocuiseur	0,4709	0,1957	0,2714	1	0,7047	0,3827	0,6659	0,5258	-0,1312	-0,0578	0,1817
Conductivité autocuiseur	0,5951	-0,0184	0,2083	0,7047	1	0,5225	0,9198	0,3854	0,2324	0,3566	0,2271
Taux casse autoclave	0,4991	-0,0293	-0,1030	0,3827	0,5225	1	0,5820	0,4726	0,1474	-0,0351	0,3092
Rendement autocuiseur	0,7049	-0,0554	0,2337	0,6659	0,9198	0,5820	1	0,4608	0,3498	0,3706	0,2640
Rendement de trempage	0,3104	-0,0588	0,1545	0,5258	0,3854	0,4726	0,4608	1	-0,0239	0,0126	0,3721
Rendement de stérilisation	-0,0488	0,0231	0,1586	-0,1312	0,2324	0,1474	0,3498	-0,0239	1	0,4329	0,1434
Texture autocuiseur	0,2408	-0,2698	0,1828	-0,0578	0,3566	-0,0351	0,3706	0,0126	0,4329	1	0,0408
Texture autoclave	0,1083	0,2888	-0,0291	0,1817	0,2271	0,3092	0,2640	0,3721	0,1434	0,0408	1

Annexe 8 : Matrice des p-values des haricots GN

	Calibre	Capacité d'hydratation en 15h	Taux d'hydratation	Taux de casse autocuiseur	Conductivité autocuiseur	Taux de casse autoclave	Rendement autocuiseur	Rendement de trempage	Rendement de stérilisation	Texture autocuiseur	Texture autoclave
Calibre	xxx										
Capacité d'hydratation en 15h	0,6737	xxx									
Taux d'hydratation	0,1881	0,0391	xxx								
Taux de casse autocuiseur	0,0361	0,4082	0,2472	xxx							
Conductivité autocuiseur	0,0056	0,9388	0,3782	0,0005	xxx						
Taux de casse autoclave	0,0251	0,9024	0,6657	0,0958	0,0181	xxx					
Rendement autocuiseur	0,0005	0,8167	0,3214	0,0014	0,0000	0,0071	xxx				
Rendement de trempage	0,1829	0,8054	0,5155	0,0172	0,0934	0,0353	0,0409	xxx			
Rendement de stérilisation	0,8380	0,9231	0,5043	0,5814	0,3242	0,5353	0,1305	0,9204	xxx		
Texture autocuiseur	0,3065	0,2500	0,4406	0,8087	0,1228	0,8833	0,1078	0,9578	0,0566	xxx	
Texture autoclave	0,6494	0,2169	0,9031	0,4433	0,3357	0,1846	0,2607	0,1062	0,5463	0,8645	xxx

* **Corrélations après correction de Holm**

Annexe 9 : Matrice de corrélations des haricots lingots

	Calibre	Capacité d'hydratation en 15h	Taux d'hydratation	Taux de casse autocuiseur	Conductivité autocuiseur	Taux de casse autoclave	Rendement autocuiseur	Rendement de trempage	Rendement de stérilisation	Texture autocuiseur	Texture autoclave
Calibre	1										
Capacité d'hydratation en 15h	-0,4148	1									
Taux d'hydratation	0,2666	0,4073	1								
Taux de casse autocuiseur	-0,5798	0,4122	-0,0521	1							
Conductivité autocuiseur	0,1468	0,2534	0,3772	0,5001	1						
Taux de casse autoclave	0,2823	0,0346	0,1276	0,3550	0,7771	1					
Rendement autocuiseur	0,4431	-0,3181	0,0450	-0,0399	0,5646	0,6370	1				
Rendement de trempage	0,3066	-0,0819	0,3120	0,1826	0,7083	0,6590	0,4899	1			
Rendement de stérilisation	0,1782	0,1107	0,1074	-0,1276	-0,1185	0,0401	-0,0082	-0,1628	1		
Texture autocuiseur (pénétrömètre)	0,2648	0,2782	0,4458	0,0397	0,4890	0,3334	0,3237	0,2684	-0,3564	1	
Texture autoclave (pénétrömètre)	-0,1862	-0,1298	-0,3802	0,4674	0,2656	0,3109	0,0583	0,4192	-0,2183	-0,3077	1

Annexe 10 : Matrice des p-values des haricots lingots

	Calibre	Capacité d'hydratation en 15h	Taux d'hydratation	Taux de casse autocuiseur	Conductivité autocuiseur	Taux de casse autoclave	Rendement autocuiseur	Rendement de trempage	Rendement de stérilisation	Texture autocuiseur	Texture autoclave
Calibre	xxx										
Capacité d'hydratation en 15h	0,0690	xxx									
Taux d'hydratation	0,2559	0,0747	xxx								
Taux de casse autocuiseur	0,0074	0,0709	0,8275	xxx							
Conductivité autocuiseur	0,5367	0,2810	0,1011	0,0247	xxx						
Taux de casse autoclave	0,2279	0,8848	0,5918	0,1246	0,0001	xxx					
Rendement autocuiseur	0,0504	0,1717	0,8506	0,8673	0,0095	0,0025	xxx				
Rendement de trempage	0,1885	0,7313	0,1805	0,4409	0,0005	0,0016	0,0283	xxx			
Rendement de stérilisation	0,4521	0,6421	0,6521	0,5918	0,6188	0,8666	0,9728	0,4929	xxx		
Texture autocuiseur	0,2592	0,2350	0,0488	0,8682	0,0287	0,1508	0,1639	0,2525	0,1230	xxx	
Texture autoclave	0,4318	0,5853	0,0982	0,0377	0,2578	0,1822	0,8071	0,0658	0,3552	0,1870	xxx

* Corrélations après correction de Holm



VetAgro Sup

Mémoire de fin d'études

Mise en place d'un protocole caractérisant l'aptitude technologique des légumes secs (lentilles, haricots blancs, haricots rouges) et permettant l'agrégage des lots à réception. (35 pages)

AUTEUR : RUSTICI Alixia

ANNEE : 2014

LIEU DE SOUTENANCE : VetAgro Sup, Clermont-Ferrand

STRUCTURE D'ACCUEIL ET INSTITUTIONS ASSOCIEES : RAYNAL ET ROQUELAURE

ENCADRANTS :

- ♦ Maître de stage : BESSE Vincent, chargé développement produit R&R
- ♦ Tuteur pédagogique : MARDON Julie

OPTION : Aliments Innovation Management des Entreprises

RÉSUMÉ

Ce mémoire présente l'évaluation d'une méthode de caractérisation de l'aptitude technologique des légumes secs (lentilles, haricots rouges, haricots GN et lingots) à réception. La méthode, basée sur un test en autocuiseur, consistant en la création d'un modèle statistique prédictif, reliant le taux de casse en autoclave avec le taux de casse et la conductivité de l'eau de cuisson en autocuiseur. Le suivi du calibre, des rendements et du taux d'hydratation pourrait permettre de relier le test autocuiseur et les tests réalisés par R&R. Vingt mesures indépendantes ont permis de réaliser un modèle pour chaque légume sec. Sur les 4 modèles, seul celui sur les haricots lingots montre une bonne corrélation entre le taux de casse prédit par le modèle et le taux de casse réel ($R^2=0,60$). L'analyse des corrélations ne permet pas d'établir de relations entre les différents paramètres suivis. La méthode ne prédit pas l'aptitude technologique de tous les légumes secs. Elle nécessite d'être ajustée (haricots lingots), abandonnée (lentilles) ou réétudiée (haricots rouges et GN) soit en augmentant le nombre de mesures soit en construisant un modèle avec d'autres paramètres plus adaptés.

Cependant la réévaluation des modèles en privilégiant la variabilité inter-lots a permis d'obtenir des modèles fiables sur les lingots, les haricots rouges et les GN, et confirmant que la méthode n'est pas adaptée aux lentilles.

Mots clés : légumes secs, appertisation, qualité, taux de casse, conductivité, aptitude technologique