

## **Développement d'un outil d'aide au choix de variété de *Triticum aestivum* L. (blé tendre) à destination de la meunerie: analyse multicritère avec la méthode des indices de désirabilité appliquée aux critères de qualité du blé tendre**

**Auteur :** Doudet, Ariel

**Promoteur(s) :** Sindic, Marianne

**Faculté :** Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

**Diplôme :** Master en bioingénieur : sciences agronomiques, à finalité spécialisée

**Année académique :** 2017-2018

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/5037>

---

*Avertissement à l'attention des usagers :*

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---

Université de Liège  
Gembloux Agro-Bio Tech

**DEVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'AIDE AU  
CHOIX DE VARIETE DE *Triticum aestivum* L.  
(BLE TENDRE) A DESTINATION DE LA  
MEUNERIE : ANALYSE MULTICRITERE AVEC  
LA METHODE DES INDICES DE DESIRABILITE  
APPLIQUEE AUX CRITERES DE QUALITE DU  
BLE TENDRE**

**ARIEL DOUDET**

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER  
BIOINGENIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

**ANNEE ACADEMIQUE 2017-2018**

**CO-PROMOTEURS : Professeur Marianne SINDIC, Adeline STREIFF**

*Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech*

*Le présent document n'engage que son auteur*

Université de Liège  
Gembloux Agro-Bio Tech

**DEVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'AIDE AU  
CHOIX DE VARIETE DE *Triticum aestivum* L.  
(BLE TENDRE) A DESTINATION DE LA  
MEUNERIE : ANALYSE MULTICRITERE AVEC  
LA METHODE DES INDICES DE DESIRABILITE  
APPLIQUEE AUX CRITERES DE QUALITE DU  
BLE TENDRE**

**ARIEL DOUDET**

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER  
BIOINGENIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

**ANNEE ACADEMIQUE 2017-2018**

**CO-PROMOTEURS : Professeur Marianne SINDIC, Adeline STREIFF**



# ARVALIS

## Institut du végétal

ARVALIS-Institut du végétal est un institut français de recherche appliquée au service de la filière agricole. Ce mémoire a été réalisé avec le soutien financier, intellectuel et matériel de cet institut.

ARVALIS-Institut du végétal a proposé de développer un outil d'aide au choix de variété de blé tendre à destination de la meunerie afin de réduire le décalage entre l'information actuellement donnée par les méthodes d'évaluation de la valeur technologique des variétés de blé tendre et celle dont les utilisateurs ont besoin. Les méthodes directes d'appréciation de la valeur technologique (test boulanger, test biscuitier) sont par nature, et pour des raisons pragmatiques et de coût, très agrégées donc réductrices. Ainsi, les modalités de présentation de ces caractéristiques renforcent le caractère figé de l'offre de service actuelle de l'institut.

L'intérêt d'un outil de choix multicritère tient à la possibilité qu'a un utilisateur de rechercher spécifiquement les valeurs aux critères d'intérêt pour une application visée (pâte feuilletée, pain courant, biscuit sec,...). Chaque caractéristique du blé peut donc acquérir une valeur qui n'est pas toujours détectable ou visible derrière une note synthétique telle que construite aujourd'hui. Outre une plus grande sensibilité et donc une plus grande pertinence pour l'utilisateur final, cet outil remet également en valeur les propriétés individuelles de chaque variété permettant ainsi un meilleur positionnement du produit vis-à-vis d'un débouché. Il doit donc aboutir à une amélioration globale de la chaîne de valeur depuis le créateur de variétés (sélectionneur) jusqu'à l'utilisateur (meunier).

Enfin, en plus du paramétrage générique, les fonctions de l'outil pourront être ajustées entreprise par entreprise pour accroître sa sensibilité et renforcer la compétitivité des utilisateurs de l'outil.

Une attente sur la mise au point de cette application a été exprimée par l'ANMF (Association Nationale de la Meunerie Française) en la personne de Bernard Valluis à l'occasion du Comité Recherche et Développement d'Intercéréales en date du 02/06/2016.

## Remerciements

---

Je tiens à remercier avant tout Adeline STREIFF pour m'avoir apporté son expertise et ses connaissances dans le domaine de la qualité technologique du blé tendre. Je la remercie aussi d'avoir partagé sa bonne humeur qui a permis de rendre le travail plus agréable. Je la remercie enfin, pour la confiance qu'elle m'a accordé et sans laquelle je n'aurais pas pu réaliser un mémoire aussi enrichissant.

Mes remerciements vont aussi à Benoît MELEARD qui m'a accueilli dans son pôle, pris le temps de partager ses connaissances et son expérience, et qui par son implication dans ce projet a permis, notamment, le paramétrage de l'outil.

Je remercie Yves ALANOU, Bruno LAUGA et Guénolé GRIGNON pour leurs conseils relatifs au développement de l'outil et pour m'avoir fait partager leurs connaissances en développement informatique.

Des remerciements enfin, au corps académique de Gembloux Agro-Bio Tech (Marianne SINDIC, Catherine CHARLES, Benjamin DUMONT, Bernard BODSON et Yves BROSTAUX) pour m'avoir accompagné tout au long de ce mémoire de fin d'étude.

## Résumé

---

Avec des volumes moyens de l'ordre de 36 Mt sur les dix dernières années, le blé tendre est la première céréale cultivée en France. Face aux évolutions du contexte de production, les meuniers doivent adapter leurs pratiques pour répondre au mieux aux différents débouchés (boulangerie artisanale, industrielle, ...). Dans ce contexte, le progrès génétique est un levier important, avec 423 variétés inscrites au catalogue français en 2017. L'aide au choix des variétés est de ce fait stratégique. Afin d'améliorer l'accompagnement des différents membres de la filière céréalière française, ARVALIS – Institut du végétal souhaite enrichir sa gamme de support de communication et consolider son fort ancrage dans la transition numérique de l'agriculture.

Le choix d'une variété repose sur des compromis entre différents critères, souvent contradictoires. L'analyse des méthodes multicritère, des supports de communications existant et l'expertise des ingénieurs d'ARVALIS – Institut de végétal ainsi que des meuniers a permis le développement d'un outil interactif d'aide au choix de variété de blé tendre. Cet outil principalement destiné aux meuniers, mais aussi à l'industrie boulangère et aux organismes stockeurs, propose 5 fonctions :

- « Je cherche la variété la mieux adaptée à mon débouché »
- « Je cherche une variété de substitution à une variété référente »
- « Je cherche le débouché le mieux adapté à mon lot de blé tendre »
- « Je filtre le catalogue variétal sur des critères d'intérêt »
- « Je compare les fiches variétales »

Afin de gérer la complexité du choix variétal, les 5 fonctions de l'outil se basent sur la méthode des indices de désirabilité.

## Abstract

---

With an average production of 36 Mt over the last ten years, wheat is the main crop cultivated in France. Faced with the production context, the millers need to adapt their practices to respond to the requests of the output sector. Genetic progress has a major role to play with 423 varieties in the French catalog. Therefore, the making-decision about varieties is strategic.

To improve the accompaniment of members of the wheat sector, ARVALIS - Institut du végétal hopes to enrich its communication support range and to accentuate its big implication in the numeric transition of agriculture. The variety choice is based on a compromise between conflicting criteria.

The analysis of multicriteria methods, existing communication support and the ARVALIS – Institut du végétal engineers' and millers' expertise led to the development of an interactive decision-making tool to help millers to make a more efficiently variety choice.

This tool is mainly for millers but also for baking industries or stock organisms. This tool has 5 functions called :

- « I'm searching for a variety for my output »
- « I'm searching for a substitution variety »
- « I'm searching for an output for my wheat batch »
- « I want to filter the catalogue »
- « I want to compare the varieties »

These functions are based on a multicriteria analysis : desirability index method. This method allows to formalizing problematics with lots of objectives.

## Liste des abréviations

---

**AACC** : American Association of Cereal Chemists  
**AFNOR** : Association Française de Normalisation  
**AHDB** : Agriculture and Horticulture Development Board  
**AHP** : Analytic Hierarchy Process  
**ANMF** : Association Nationale de la Meunerie Française  
**BAF** : Blé Améliorant ou de Force  
**BIPEA** : Bureau Interprofessionnel d'Etudes Analytiques  
**BPS** : Blé Panifiable Supérieur  
**BP** : Blé Panifiable  
**BPMF** : Blé Pour la Meunerie Française  
**CNERNA** : Centre National d'Etudes et de Recommandations sur la Nutrition et l'Alimentation  
**COFRAC** : Comité Français d'Accréditation  
**CTCPA** : Centre Technique de la Conservation des Produits Agricoles  
**CTPS** : Comité Technique Permanent de la Sélection  
**CVO** : Cotisation Volontaire Obligatoire  
**DHS** : Distinction Homogénéité Stabilité  
**DON** : Déoxynivalénol  
**FAO** : Food and Agriculture Organization  
**GEVES** : Groupe d'étude et de contrôle des variétés et des semences  
**GIS** : Geographic Information System  
**GPD** : Grain Protein Deviation  
**INSEE** : Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques  
**ITB** : Institut Technique de la Betterave  
**ITCF** : Institut Technique des Céréales et des Fourrages  
**LSL** : Low Spec Limits  
**MASC** : Multi-attribute Assessment of the Sustainability of Cropping systems)  
**MAUT** : Multi-Attribute Utility Theory  
**NABIM** : National Association of British and Irish flour Millers  
**NTP** : Note Totale de Panification  
**OAD** : Outil d'Aide à la Décision  
**OCDE** : Organisation de la Coopération et de Développement Economique  
**OWA** : Ordered Weighted Averaging  
**PLM** : Programmation Linéaire Multicritère  
**PQTSC** : Pôle Qualités Technologiques et Sanitaires des Céréales  
**PS** : Poids Spécifique  
**QTL** : Quantitative Trait Loci  
**SG-FPM** : Sous-unités Gluténines de Faible Poids Moléculaire  
**SG-HPM** : Sous-unités Gluténines de Haut Poids Moléculaire  
**SMART** : Simple Multi-Attribute Rating Technique  
**SQV** : Service Qualités et Valorisations  
**UE** : Union Européenne  
**UF** : Unités Farinographes  
**USDA** : United States Department of Agriculture  
**USL** : Upper Spec Limits  
**VATE** : Valeur Agronomique Technologique et Environnementale



**VRM** : Variétés Recommandées par la Meunerie

**VO** : Variété en Observation

**WQA** : Wheat Quality Australia

# Table des matières

---

## REMERCIEMENTS

---

## RÉSUMÉ

---

## ABSTRACT

---

## Liste des abréviations

---

## Table des matières

---

## Table des illustrations

---

## Liste des figures

## Liste des tableaux

## INTRODUCTION

1

## BIBLIOGRAPHIE

3

### 1.1 LA FILIÈRE BLÉ TENDRE

3

#### 1.1.1 LE PROGRÈS GÉNÉTIQUE

3

#### 1.1.2 INSCRIPTION ET ÉVALUATION DES VARIÉTÉS DE BLÉ TENDRE EN FRANCE

4

#### 1.1.3 PRÉSENTATION ÉCONOMIQUE DE LA FILIÈRE

5

#### 1.1.4 LA MEUNERIE

9

### 1.2 LES CRITÈRES DE QUALITÉ

11

#### 1.2.1 LES PROTÉINES DU GRAIN DE BLÉ

12

#### 1.2.2 L'AMIDON DU GRAIN DE BLÉ

14

#### 1.2.3 LA DURETÉ

15

#### 1.2.4 L'ALVÉOGRAPHE DE CHOPIN

16

#### 1.2.5 LE FARINOGRAPHE BRABENDER

17

#### 1.2.6 LES TESTS DE PANIFICATION ET BISCUITIERS

18

#### 1.2.7 AUTRES CRITÈRES

21

#### 1.2.8 CONCLUSION

22

### 1.3 CHOIX D'UNE MÉTHODE D'ANALYSE MULTICRITÈRE

23

#### 1.3.1 CLASSIFICATION DES DIFFÉRENTES MÉTHODES D'ANALYSE MULTICRITÈRE

23

#### 1.3.2 DESCRIPTION DES DIFFÉRENTES MÉTHODES D'AGRÉGATION

23

#### 1.3.3 PRÉSENTATION DES MÉTHODES D'AGRÉGATION COMPLÈTE

26

#### 1.3.4 LES INDICES DE DÉsirABILITÉ

29

#### 1.3.5 APPLICATIONS DES MÉTHODES D'ANALYSE MULTICRITÈRES EN AGRICULTURE

32

#### 1.3.6 CHOIX DE LA MÉTHODE

32

<b>CONTEXTE DE L'ÉTUDE</b>	<b>33</b>
<b>2.1 PRÉSENTATION DE L'ENTREPRISE</b>	<b>33</b>
<b>2.2 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DU STAGE</b>	<b>33</b>
<b>2.3 ANALYSE DE LA CONCURRENCE</b>	<b>34</b>
<b>MATÉRIEL ET MÉTHODES</b>	<b>36</b>
<b>3.1 LES OBJECTIFS DE L'OUTIL D'AIDE AU CHOIX DES VARIÉTÉS DE BLÉ TENDRE</b>	<b>36</b>
<b>3.2 MATÉRIEL</b>	<b>36</b>
<b>3.3 PARAMÉTRAGE</b>	<b>36</b>
<b>RÉSULTATS</b>	<b>40</b>
<b>4.1 IDENTIFICATION DES DÉBOUCHÉS ET DES CRITÈRES</b>	<b>40</b>
<b>4.2 FONCTION « JE FILTRE LE CATALOGUE »</b>	<b>41</b>
<b>4.3 FONCTION « JE CHERCHE LA VARIÉTÉ LA MIEUX ADAPTÉE À MON DÉBOUCHÉ »</b>	<b>43</b>
4.3.1 PRINCIPE GÉNÉRAL	43
4.3.2 COMPARAISON ENTRE LES CLASSEMENTS OBTENUS ET L'EXPERTISE	48
4.3.3 EVALUATION DE LA SENSIBILITÉ DE L'OUTIL	51
<b>4.4 FONCTION « JE CHERCHE UNE VARIÉTÉ DE SUBSTITUTION »</b>	<b>54</b>
<b>4.5 FONCTION « JE COMPARE DES FICHES VARIÉTALES »</b>	<b>57</b>
<b>4.6 FONCTION « JE CHERCHE LE DÉBOUCHÉ LE MIEUX ADAPTÉ À MON LOT DE BLÉ TENDRE »</b>	<b>58</b>
<b>DISCUSSION</b>	<b>60</b>
<b>5.1 VOIES D'AMÉLIORATION</b>	<b>60</b>
LE PARAMÉTRAGE	60
LES BASES DE DONNÉES	61
<b>5.2 PERSPECTIVES D'UTILISATION</b>	<b>63</b>
<b>CONCLUSION</b>	<b>67</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>68</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>71</b>

# Table des illustrations

---

## Liste des figures

Figure 1: Evolution du nombre de variétés de blé tendre ( <i>Triticum aestivum</i> L.) inscrites pour la première fois au catalogue CTPS (Comité Technique Permanent de la Sélection des plantes cultivées) de 1986 à 2016 (Statistique ARVALIS - Institut du végétal).....	1
Figure 2 : Répartition de la sole française en blé tendre en fonction de la classe de qualité ARVALIS – Institut du végétal de 2008 à 2016 (Source : FranceAgriMer / Enquête répartition variétale des céréales).....	4
Figure 3 : Détermination des classes technologiques des variétés lors de l'inscription et en post-inscription.....	5
Figure 4: Evolution des rendements de blé tendre sur la période de 2000-2016 (Source des données de base: Eurostat, USDA) .....	6
Figure 5: Répartition de la production de blé tendre dans le monde sur la récolte 2016 (Source des données de base : USDA).....	7
Figure 6: Représentation des principaux pays exportateurs en 2016 (Source des données de base: USDA).....	8
Figure 7: Utilisations du blé tendre en France (Source: Bilan prévisionnel Blé tendre du 10/05/2017 France AgriMer) en Europe et dans le monde (Source: Perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO 2016).....	9
Figure 8: Evolution des prix de la farine et du blé tendre sur la période de juillet 2009 à juillet 2015 (Source: FranceAgriMer, INSEE) .....	10
Figure 9: Débouchés des farines françaises sur le marché intérieur hors farine française exportée (Source : ANMF, Douanes, FranceAgrimer) .....	11
Figure 10 : Détermination du gluten index (GI).....	14
Figure 11 : Représentation graphique des classes de dureté des blés collectés en 2016 (Source : FranceAgriMer/Enquête qualité collecteurs 2016) .....	16
Figure 12: Alvéographe de Chopin et les critères de qualité issus de celui-ci (source : ARVALIS – Institut du végétal).....	16
Figure 13 : Farinogramme de Brabender. Détermination du temps de développement, de la stabilité et du degré d'affaiblissement (Source : Meunerie Milanaise) .....	18
Figure 14 : Système de notation du test de panification de type pain courant français et règle de linéarisation de la notation .....	19
Figure 15: Représentation des seuils permettant de calculer les indices de concordance et discordance pour les variétés a et b .....	25
Figure 16: Schéma général de l'agrégation complète .....	26
Figure 17: Fonction de minimisation de Derringer et Suich .....	30
Figure 18: Fonction valeur cible de Derringer et Suich .....	30
Figure 19: Fonction de maximisation de Derringer et Suich.....	30
Figure 20: Fonction de type two sided Harrington (Source: ARVALIS – Institut du végétal).....	31
Figure 21: Fonction de type one sided Harrington (Source : ARVALIS – Institut du végétal) .....	31
Figure 22 : Fonction <i>derringerSuich</i> (Package « <i>Desir</i> » du logiciel R) utilisée dans la fonction "Je filtre le catalogue". La valeur du critère est en abscisse et la désirabilité en ordonnée.....	42
Figure 23 : Interface de la fonction "Je cherche la variété la mieux adaptée à mon débouché". Le bouton « Paramétrage » permet de consulter et/ou modifier le paramétrage des fonctions de désirabilité. Le bouton « Pondération » permet de consulter et/ou modifier la pondération. Le bouton	

« Sélectionner un autre débouché » permet de modifier le débouché sélectionné précédemment. Le bouton « Aide » permet d'afficher un texte expliquant le rôle de chaque boutons. Le bouton « Calculer le classement des variétés les mieux adaptées au débouché ci-dessus » permet de lancer le calcul. ....	44
Figure 24 : Boite de dialogue permettant le paramétrage personnalisé (données effacées par soucis de confidentialité).....	45
Figure 25 : Fonction d'optimisation définie pour le critère "Allongement de la pâte au façonnage" pour le débouché "Pain courant" .....	45
Figure 26 : Fonction de maximisation définie pour le critère "NTP" pour le débouché "Pain courant"	46
Figure 27 : Boite de dialogue permettant à l'utilisateur de visualiser la pondération par défaut et de modifier le paramétrage s'il le souhaite. Dans cet exemple, la pondération par défaut est la suivante : 25% PL, 25% Taux de protéines, 25% Dureté, 25% W. L'utilisateur a choisi d'autres critères à pondérer : W, PL, Ie, NTP, couleur de la mie .....	46
Figure 28 : Boite de dialogue permettant à l'utilisateur d'encoder la pondération qu'il souhaite. Les critères sélectionnés dans la boite de dialogue précédente (figure 27) sont proposés à l'utilisateur dans un ordre aléatoire. Ici, l'utilisateur a déjà pondéré 4 des 5 critères qu'il a sélectionnés. L'outil lui indique qu'il reste 30% de pondération à attribuer.....	47
Figure 29 : Diagramme circulaire permettant de visualiser la pondération que l'utilisateur vient de réaliser. Les 5 critères sélectionnés dans la Figure 27 ont tous été pondérés.....	47
Figure 30 : Représentation de la corrélation entre les notes des variétés obtenues avec la pondération X et celles obtenues avec la pondération Y.....	52
Figure 31 : Illustration de l'absence de corrélation linéaire entre les notes obtenues via la moyenne géométrique et celles obtenues via la moyenne arithmétique. Mise en évidence de la dépendance aux données manquantes (marqués en rouge sur le graphique) de la moyenne arithmétique.....	53
Figure 32 : Fonction Derringer & Suich (Package « <i>Desir</i> » du logiciel R) utilisée pour la fonction "Recherche de variété de substitution".....	55
Figure 33 : Fonction de désirabilité si le choix de la borne maximale et minimale est fixe et si la variété référente a une valeur proche de la borne minimale pour ce critère.....	56
Figure 34 : Résultat de la fonction " Je cherche le débouché le mieux adapté à mon lot de blé tendre ". Les pourcentages représentent la désirabilité de la variété ou d'un lot de blé (dans cet exemple, la variété est "APACHE") pour chaque débouché .....	59
Figure 35 : Réflexion politique, économique et méthodologique nécessaire avant la commercialisation de l'outil .....	64

## Liste des tableaux

Tableau 1: Variation des surfaces cultivées (Source des données : USDA), de la production et des rendements de blé tendre en France (Source : Eurostat), en Belgique (Source : Eurostat), en Europe et dans le monde (Source : USDA) sur la période allant des années 2000 à 2016.....	7
Tableau 2 : Alvéographe de Chopin et débouché du blé (Source : ARVALIS – Institut du végétal) ...	17
Tableau 3: Classes technologiques: BPS (Blé panifiable supérieur), BP (Blé panifiable), BAU (blé à autre usage).....	19
Tableau 4: Comparaison des méthodes de transformation sur une échelle continue. Description des méthodes MAUT et indices de désirabilité (Lairez, 2016) .....	27
Tableau 5: Tableau récapitulatif des avantages et inconvénients des différentes méthodes d'agrégation (Lairez, 2016).....	28
Tableau 6: description et liste des avantages et des inconvénients des différentes méthodes de pondération.....	29

Tableau 7 : Illustration de la soustraction de l'effet environnemental dans le calcul du rendement d'une variété .....	38
Tableau 8 : Quatorze débouchés des blés meuniers identifiés par les meuniers français volontaires (Axiane meunerie, Moulins Soufflet, Minoterie Girardeau, Gers farine, Banette) .....	40
Tableau 9 : Trente critères de qualité impliqués dans le choix de variété de blé tendre par le meunier. Critères définis par les meuniers français volontaires (Axiane meunerie, Moulins Soufflet, Minoterie Girardeau, Gers farine, Banette).....	40
Tableau 10 : Cinq critères consultés lors du choix de la variété de blé tendre à destination de la meunerie. Critères définis par les principaux meuniers français (Axiane meunerie, Moulins Soufflet, Minoterie Girardeau, Gers farine, Banette) .....	41
Tableau 11 : Code couleur appliqué au Taux de protéines, PS, W et P/L.....	48
Tableau 12 : Classement de sortie de l'outil pour le débouché "Biscuit sec". Les blés biscuitiers pour la meunerie française sont notés en vert. Les variétés recommandées par la meunerie française pour le débouché biscuitier sont notées avec un astérisque. Les variétés grisées ne sont pas reprises dans le <i>Memento 2017</i> .....	49
Tableau 13 : Pourcentage de variétés identifiées par la meunerie (VRMp + BPMFp + VOp) parmi les 205 variétés de la base de données, parmi les 141 variétés sorties par l'outil pour le débouché <i>pain courant</i> , parmi les 100 premières variétés sorties par l'outil pour le débouché <i>pain courant</i> .....	50
Tableau 14 : Analyse statistique de l'effet de la modification de la pondération sur les classements obtenus .....	52
Tableau 15 : Analyse statistique de l'effet de la modification de la méthode d'agrégation sur les classements obtenus .....	53
Tableau 16 : Classement des variétés sur base de leur pourcentage de ressemblance avec APACHE comme variété référente et sur les critères "Allongement de la pâte au façonnage" et "couleur de la mie" .....	57
Tableau 17 : Identification du choix de la base de données et du paramétrage en fonction de la fonctionnalité de l'outil et de l'utilisateur de celle-ci .....	64

## Introduction

Le blé (*Triticum aestivum* L. et *Triticum durum* Desf.) est cultivé par l'homme depuis le néolithique (Bonjean, 2001). Originnaire du croissant fertile, cette culture occupe actuellement une place centrale dans l'agriculture mondiale. Elle est d'un intérêt économique majeur en France depuis plusieurs décennies (Bergez et al., 2009).

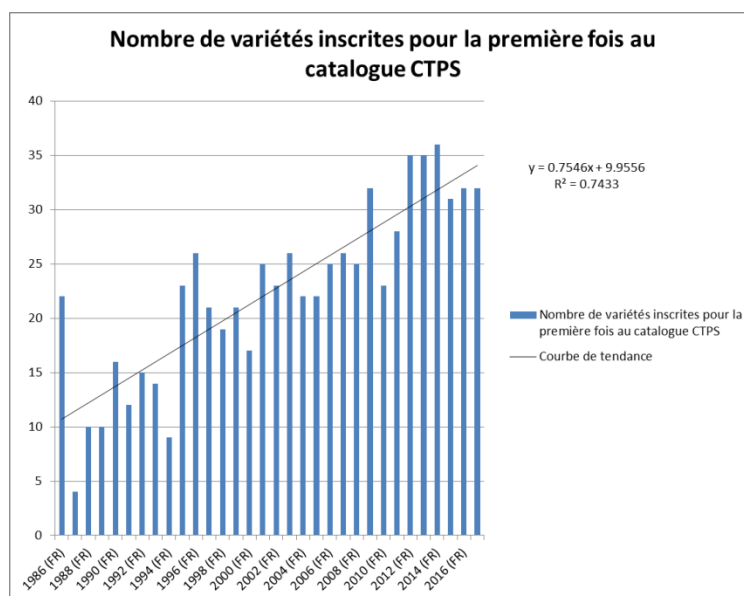


Figure 1: Evolution du nombre de variétés de blé tendre (*Triticum aestivum* L.) inscrites pour la première fois au catalogue CTPS (Comité Technique Permanent de la Sélection des plantes cultivées) de 1986 à 2016 (Statistique ARVALIS - Institut du végétal)

En France, on compte 423 variétés de blé tendre (*Triticum aestivum* L.) inscrites au catalogue officiel français pour la campagne 2017. Actuellement, une trentaine de nouvelles variétés sont inscrites chaque année. Ce nombre a doublé en 20 ans (Figure 1). Dans les années 90, les 10 premières variétés couvraient 70 % de la sole en blé tendre, elles ne couvrent plus que 47 % actuellement (FranceAgriMer : Enquête répartition variétale des céréales). Cette diversification variétale est principalement liée à l'évolution de la filière et notamment des débouchés (Peronne et al., 2017). Par ailleurs, à l'échelle nationale, la réglementation et l'organisation de la filière semencière pourraient jouer un rôle important dans la diversité des variétés cultivées (Bonneuil et al., 2009; Silhol, 2010; Filippi et al., 2012; Boulineau et al., 2013; Peronne et al., 2017).

Dans ce contexte, le choix variétal réalisé par les différents acteurs de la filière du blé tendre n'est pas aisé. Du point de vue de l'agriculteur, d'abord, le choix de la variété doit répondre au mieux aux contraintes pédoclimatiques, phytopathologiques, agronomiques et économiques. Cette problématique a fait l'objet de deux mémoires de fin d'études à ARVALIS – Institut du végétal (Streiff, 2014; Richard, 2016). Du point de vue du meunier, ensuite, le choix des variétés doit satisfaire au mieux les contraintes liées aux débouchés et à la demande du consommateur. Ce choix se base sur des critères de plus en plus nombreux (plus de 30 critères identifiés (cf. 4.1)) et des débouchés de plus en plus variés (14 débouchés identifiés dans ce mémoire). La répartition des débouchés peut se faire en fonction du produit fini (biscuit, cake, pains courant, pâte feuilleté, etc.) mais aussi en fonction du process de fabrication (artisanal ou industriel). Bien que les critères de qualité des variétés soient décrits dans des fiches de synthèse par variété, il n'existe aucun outil d'aide au choix de variétés de blé

tendre à destination de la meunerie en France. En tant qu'acteur majeur de la filière blé tendre, et de l'agriculture française, ARVALIS – Institut du végétal a initié un projet visant à développer un outil d'aide au choix de variétés de blé tendre principalement destiné à la meunerie, mais aussi à l'industrie boulangère et aux organismes stockeurs. Ce mémoire présente le développement et le fonctionnement de cet outil basé sur l'analyse multicritère avec la méthode des indices de désirabilité. Développé en lien direct avec les principaux meuniers français via l'Association Nationale de la Meunerie Française (ANMF), l'outil se présente comme une véritable innovation pour la filière et répond à une demande formulée par les meuniers.



# Bibliographie

---

## 1.1 La filière blé tendre

Le blé (*Triticum aestivum* L. et *Triticum durum* Desf.) est la première culture mondiale en terme de surface cultivée avec 220 millions d'hectares en 2014 contre 180 millions d'hectares pour le maïs (Statistiques FAO, Annexe 1). En revanche, le blé est la cinquième culture mondiale en terme de production avec 729 millions de tonnes produites en 2014 contre 1,88 milliards de tonnes pour la canne à sucre ou encore 1,03 milliards de tonnes produites pour le maïs (Statistiques FAO, Annexe 2). La France a produit 27,56 millions de tonnes de blé tendre en 2016 (40,91 millions de tonnes en 2015) sur 5,13 millions d'hectares (Source : Bilan prévisionnel 2015-2016 FranceAgrimer (Annexe 3)). Cela fait du blé tendre la première culture française en termes de quantité produite et de surfaces cultivées.

### 1.1.1 Le progrès génétique

Les progrès génétiques sur le blé tendre en France ont une longue histoire. Au XIX<sup>ème</sup> siècle le terme « population régionale de blé tendre » était plus adapté que celui de « variété », la sélection étant réalisée par les agriculteurs eux même. Ce n'est qu'au XX<sup>ème</sup> siècle que la sélection s'est véritablement organisée. Parallèlement, la filière meunière s'est développée et la demande de blé de qualité s'est alors amplifiée (recherche de pâtes non collantes, élastiques, et de caractéristiques régulières dans le temps) (Branlard et al., 1986)).

Depuis l'après-guerre, la productivité de l'agriculture s'est fortement accrue (Bergez et al., 2009). Outre l'évolution des pratiques et l'utilisation d'intrants, le progrès génétique est l'un des principaux moteurs de cet accroissement (Calderini et al., 1998). Pour la culture de blé tendre, le progrès génétique peut s'illustrer par le turnover variétal qui s'est considérablement accéléré ces dernières années. En 2010, il était évalué à 6 ans (Silhol, 2010; Gallais, 2013). L'évolution des rendements en France (0.34q/ha/an) ces 20 dernières années est aussi un indicateur du progrès génétique (Source : base de données FAOstat rendements entre 1994 et 2014). On note toutefois un plafonnement des rendements dans certaines régions de France (Michel et al., 2013), et cela malgré un maintien du progrès génétique (Brisson et al., 2010; Oury et al., 2012; Peronne et al., 2017). Celui-ci s'illustre aussi par la sélection de lignées contenant des gènes de résistance aux maladies, aux stressés abiotiques ou pour des lignées ayant une phénologie minimisant les risques climatiques (date de floraison). Côté qualité, la sélection s'oriente vers des blés de qualité supérieure qui puissent répondre aux exigences des débouchés finaux quel qu'ils soient (Exportation, alimentation humaine et animale, amidonnerie...). En témoigne, l'évolution de la répartition de la sole française : en 2016, 95 % des surfaces étaient cultivées avec des blés panifiables dont 67 % avec des blés panifiables de qualité supérieure<sup>1</sup> (Blé Panifiable Supérieur et Blé Améliorant ou de force) (Figure 2).

---

<sup>1</sup> Les blés de force (BAF) et les blés panifiables supérieurs (BPS) sont plus représentés dans les régions du sud de la France (94% des surfaces de blé sont couvertes par des BAF ou BPS) que dans les régions du nord (52% des surfaces de blé sont couvertes par des BAF ou BPS) (FranceAgriMer : Enquête répartition variétale des céréales)

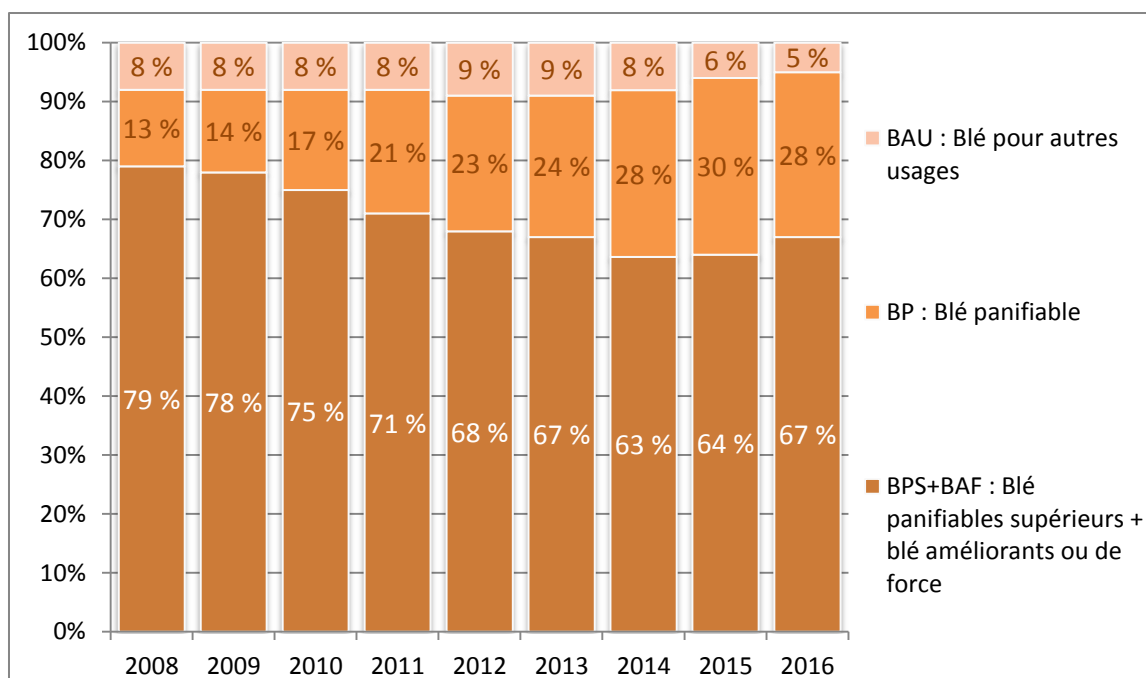


Figure 2 : Répartition de la sole française en blé tendre en fonction de la classe de qualité ARVALIS – Institut du végétal de 2008 à 2016 (Source : FranceAgriMer / Enquête répartition variétale des céréales)

La qualité d'un blé ou d'une farine est en fait la résultante d'un nombre important de caractéristiques. Il apparaît évident que cette diversité de critères est gouvernée par un nombre important de gènes (détermination polygénique). Selon Branlard et al., 1986, la faible diversité génétique des blés français serait la cause de leur qualité moyenne par rapport à leurs concurrents. En effet, diversité variétale ne rime pas nécessairement avec diversité génétique. Une étude menée par la *Fondation pour la recherche sur la biodiversité* a montré que malgré une augmentation du nombre de variété depuis 1970, la diversité génétique inter variété (indice H de Nei) n'a pas augmenté et la diversité inter et intra variété (indice Ht) a même diminué sur cette même période. Cette étude a aussi montré que l'homogénéisation génétique était d'autant plus marquée dans les grands bassins céréaliers français (Goffaux et al., 2011). Dès lors, les méthodes de sélection permettant de conserver la diversité génétique de l'espèce (sélection récurrente), seraient les mieux adaptées pour l'amélioration de la qualité de celles-ci (Gallais, 2015). La détermination des QTLs (Quantitative Trait Loci) responsables de la qualité technologique du blé tendre se fait à l'aide de marqueurs moléculaires. Ainsi, plusieurs études ont permis d'identifier les régions chromosomiques responsables de la valeur meunière du blé (Ishikawa et al., 2014) ou de la rhéologie de la pâte (Simons et al., 2012). La sélection génomique pour des QTLs d'intérêt à l'aide de marqueurs moléculaires devrait donc prendre une place de plus en plus importante dans les programmes de sélection.

Enfin, les règles d'inscription au catalogue CTPS sont favorables à une amélioration de la qualité des blés tendres. Pour être inscrite, une variété doit atteindre un niveau de rendement qui dépend de sa classe qualité.

### 1.1.2 Inscription et évaluation des variétés de blé tendre en France

L'inscription d'une variété en France se fait en plusieurs étapes. Tout d'abord, les obtenteurs proposent leurs nouvelles variétés au Comité Technique Permanent de la Sélection (CTPS). Le CTPS propose ensuite au Ministère chargé de l'Agriculture d'inscrire au journal officiel les nouvelles variétés sur base des résultats des études DHS (Distinction Homogénéité Stabilité) et VATE (Valeur

Agronomique Technologique et Environnementale) après deux ans d'épreuves. Les études DHS visent à évaluer si la variété est différente de celles déjà inscrites (Distinction), si au sein d'une même génération chaque individu de la population est identique (Homogénéité) et si d'une génération à l'autre les individus d'une population conservent leur caractéristiques (Stabilité). Ces études se basent sur des critères phénologiques et notamment colorimétriques. Les études VATE visent quant à elles à évaluer la performance de la lignée proposée à l'inscription. Cette performance est mesurée sur les critères de résistance aux maladies, le rendement ou encore des critères de qualité technologique. Les deux années d'essais sont menées par le GEVES pour le compte du CTPS, la première année correspond au réseau CTPS 1 et la seconde au réseau CTPS 2. La qualité technologique des variétés à l'inscription est évaluée uniquement sur la base du réseau CTPS 1 (Figure 3).

Après l'inscription au catalogue officiel, les variétés continuent à être caractérisées et évaluées en post-inscription par ARVALIS - Institut du végétal pendant au moins deux ans pour la partie agronomique. Pour l'évaluation de la qualité technologique en post-inscription, ARVALIS - Institut du végétal et l'Association Nationale de la Meunerie Française (ANMF) valorisent les données acquises par le GEVES sur la base du Réseau CTPS 1 et analysent les échantillons fournis par le GEVES issus de réseau CTPS 2 (Figure 3).

L'objectif de l'évaluation en post-inscription est de confirmer et compléter les caractéristiques agronomiques et technologiques de ces variétés en augmentant la diversité des environnements testés.

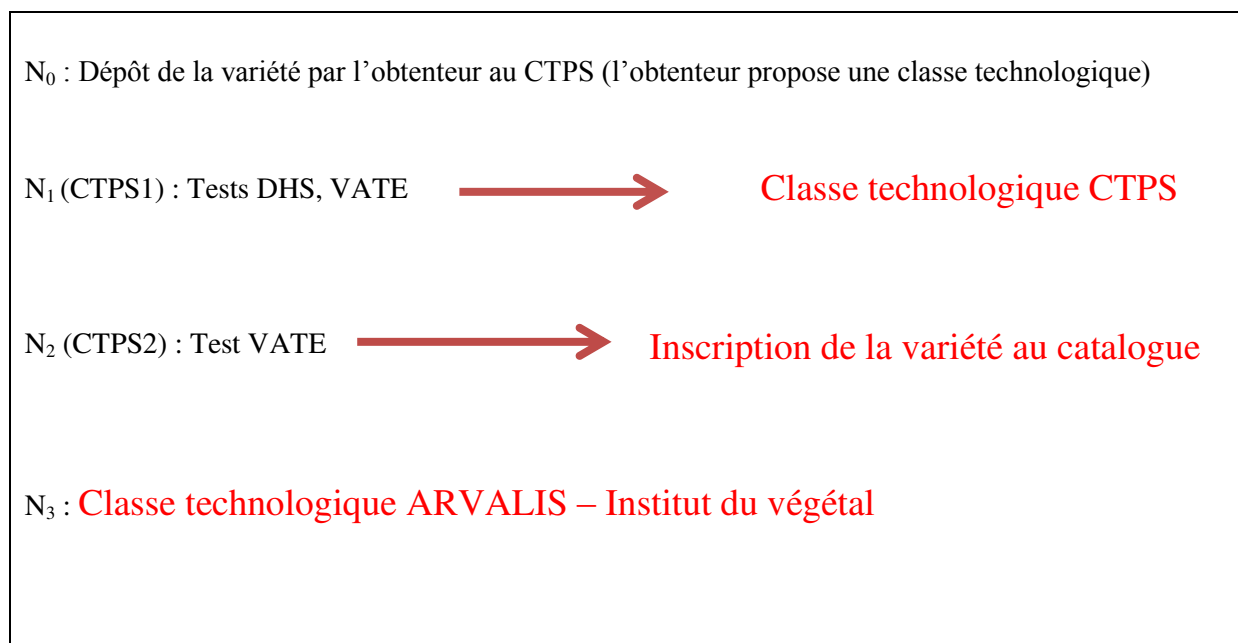


Figure 3 : Détermination des classes technologiques des variétés lors de l'inscription et en post-inscription

### 1.1.3 Présentation économique de la filière

#### *Les surfaces cultivées*

Avec plus de 5 millions d'hectares, le blé est la première culture française en termes de surface cultivée (Annexe 1). Sur la période allant de l'année 2000 à l'année 2016, la surface de blé cultivée dans le monde a augmenté de 3,1 %. Cette progression est plus marquée en France qu'en Europe et dans le monde sur cette période (Tableau 1). Notons tout de même qu'en France les surfaces cultivées ont diminué de 0,5 % de l'année 2016 à l'année 2017 (Annexe 3). Cela est certainement une

conséquence de la mauvaise récolte de 2016. En Belgique, de 2000 à 2016, la surface cultivée de blé a diminué de 4 % (Tableau 1).

### Les rendements

Les rendements en blé tendre européens sont supérieurs à la moyenne mondiale. Ceci est d'autant plus vrai pour la France et la Belgique (Figure 4). L'augmentation des rendements belges (34,5 %) entre les années 2000 et 2015 est plus marquée qu'en France, en Europe et dans le monde. Cette tendance ne s'observe pas si les rendements historiquement bas de l'année 2016 sont pris en compte (Tableau 1).

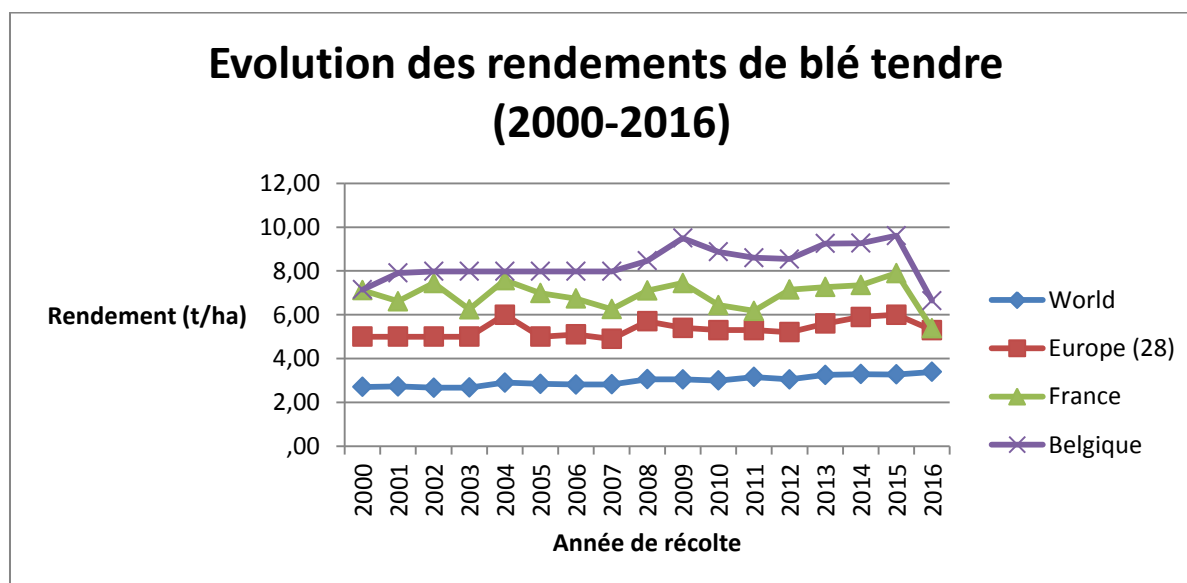


Figure 4: Evolution des rendements de blé tendre sur la période de 2000-2016 (Source des données de base: Eurostat, USDA)

En France, les rendements sont très hétérogènes sur l'ensemble du territoire. Ainsi, l'écart type du rendement moyen national est de 9,4 quintaux en 2016 (18,0 quintaux en 2015). En 2015, les rendements moyens dans la moitié nord du pays<sup>2</sup> sont de 96,5 q/ha (47,0 q/ha en 2016) et de 49,0 q/ha (47,0 q/ha en 2016) dans la moitié sud<sup>3</sup> (Source des données de base : base de donnée Agreste). L'hétérogénéité des rendements en France explique les différences variétales de la sole française. Les blés de force (BAF) et les blés panifiables supérieurs (BPS) sont plus représentés dans les régions du sud de la France (94 % des surfaces de blé sont couvertes par des BAF ou BPS) que dans les régions du nord (52 % des surfaces de blé sont couvertes par des BAF ou BPS) (FranceAgriMer : Enquête répartition variétale des céréales). En Belgique, les rendements varient également en fonction de la zone de culture. En 2010, les rendements en région limoneuse belge étaient de 90 q/ha contre 49 q/ha en Haute Ardenne (Delcour et al., 2014).

### La production

De 1960 à 2015, l'augmentation de la production est davantage due à l'augmentation des rendements qu'à l'augmentation des surfaces cultivées (Terrones Gavira et al., 2012) (Tableau 1). Ce

<sup>2</sup> Nord-Pas-de-Calais, Picardie, Haute-Normandie

<sup>3</sup> Aquitaine, Midi-Pyrénées, Languedoc-Roussillon, Provence-Alpes-Côte-d'Azur

constat est d'autant plus vrai pour la Belgique qui, des années 2000 à 2015, a augmenté sa production (+ 23,1 %) tout en diminuant les surfaces cultivées (- 4 % sur cette période).

L'année 2016 a été bonne à l'échelle mondiale avec une production de 753,09 Mt (figure 5). Malgré, des rendements et une production exceptionnellement bas en Europe de l'ouest (France et Belgique), l'Union Européenne reste le premier producteur mondial en 2016 avec une production de 145,47 Mt (figure 5). Les agriculteurs français ont donc dû faire face à une mauvaise récolte qui n'a pas été compensée par un prix élevé. Cela aurait été le cas si la production mondiale avait été elle aussi plus faible.

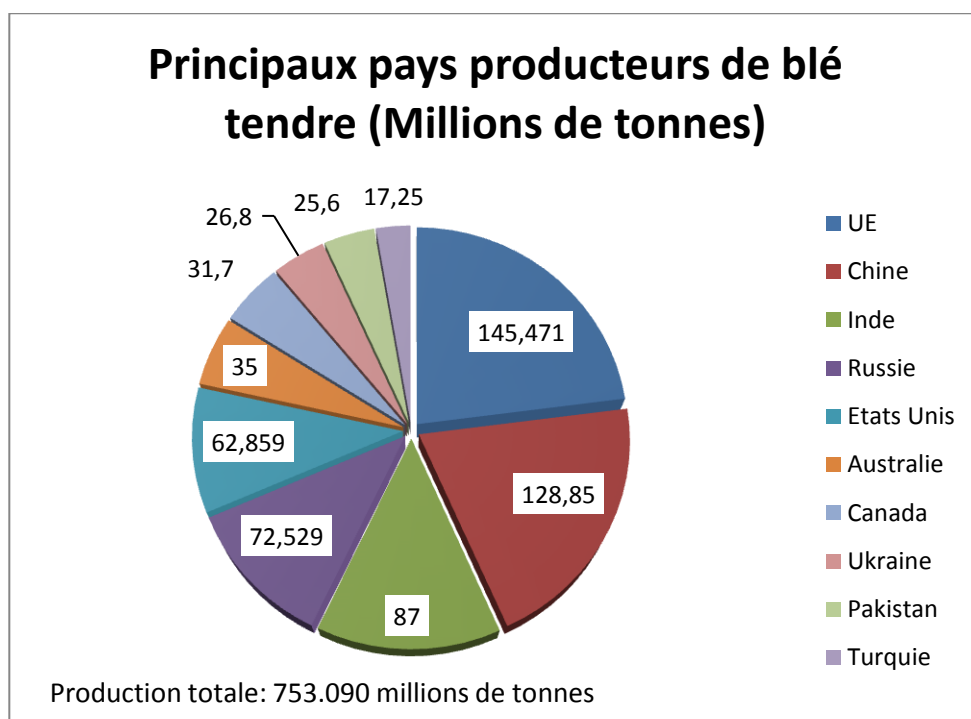


Figure 5: Répartition de la production de blé tendre dans le monde sur la récolte 2016 (Source des données de base : USDA)

Si on constate une augmentation des surfaces cultivées, des rendements et de la production de blé sur la période allant des années 2000 à 2016 en Europe et dans le monde cette augmentation est plus modérée sur cette même période en France (Tableau 1).

Tableau 1: Variation des surfaces cultivées (Source des données : USDA), de la production et des rendements de blé tendre en France (Source : Eurostat), en Belgique (Source : Eurostat), en Europe et dans le monde (Source : USDA) sur la période allant des années 2000 à 2016

Pays ou régions	Surfaces cultivées	Production (avec année 2016)	Production (sans année 2016)	Rendements (avec année 2016)	Rendements (sans année 2016)
France	+ 5,9 %	- 21,1 %	+ 14,4 %	- 24,4 %	+ 11 %
Belgique	- 4,0 %	- 15,2 %	+ 23,1 %	- 7,1 %	+ 34,5 %
Europe	+ 1,8 %	+ 9,6 %	+ 20,9 %	+ 6 %	+ 20 %
World	+ 3,1 %	+ 29,2 %	+ 26,5 %	+ 25,3 %	+ 21 %

Ces chiffres montrent qu'en 2016 les rendements et la production ont été exceptionnellement bas en Europe de l'ouest (France et Belgique) ce qui a fortement impacté les moyennes européennes de ces deux indicateurs (mais l'Union Européenne reste le premier producteur mondial en 2016). En revanche, l'année 2016 a été bonne à l'échelle mondiale. Les agriculteurs français ont donc dû faire face à une mauvaise récolte qui n'a pas été compensée par un prix élevé. Cela aurait été le cas si la production mondiale avait été elle aussi plus faible.

### Les échanges

Le prix du blé est fonction des exportations et des importations (l'offre et de la demande) qui régissent les échanges de celui-ci. Ces derniers peuvent être illustrés par les exportations. Par ailleurs, les échanges peuvent être influencés par la parité euro/dollars ou par des contextes climatiques ou politiques. Au vu des exportations, les principaux acteurs économiques qui influent le prix du blé sont donc les Etats Unis, la Russie, l'Union Européenne, l'Australie, le Canada et l'Ukraine (Figure 6). En 2015, l'Union Européenne était le premier exportateur mondial et représentait 20,10 % des volumes exportés (contre 15,02 % en 2016). La Chine, est le deuxième plus gros producteur de blé tendre au monde mais son importante consommation intérieure ne lui permet pas d'exporter. Dès lors, la Chine a actuellement très peu d'influence sur le marché mondial.

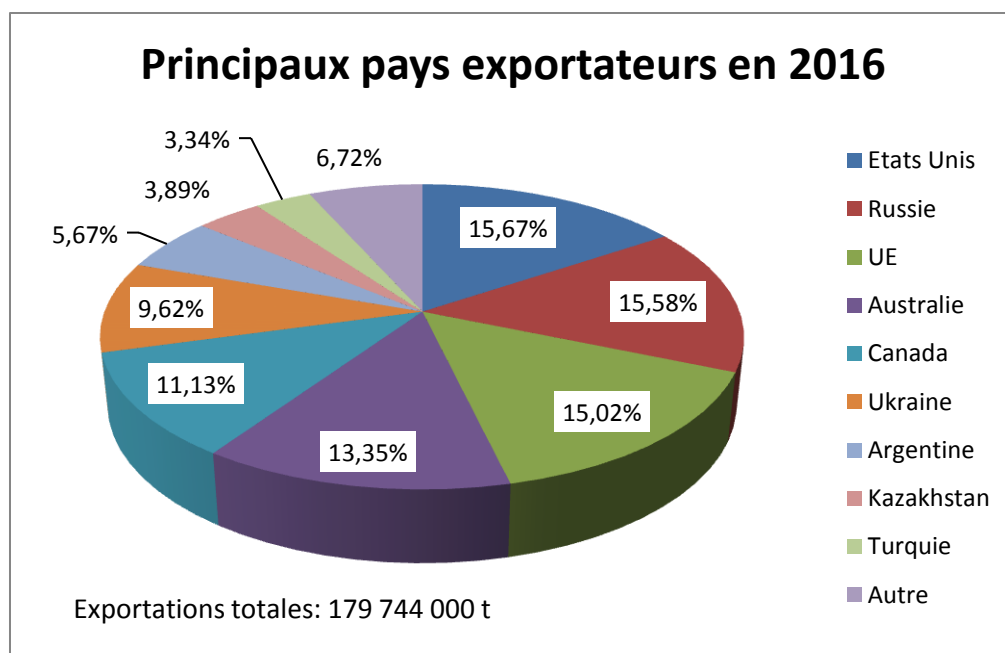


Figure 6: Représentation des principaux pays exportateurs en 2016 (Source des données de base: USDA)

En Europe, la mauvaise récolte de 2016 se traduit principalement par une diminution des exportations. C'est particulièrement le cas en France où les exportations représentaient 50,9 % de la production en 2015 et ne représentent plus que 36,9 % en 2016 (20 553 tonnes en 2015 contre 11 228 tonnes en 2016). Plus précisément, ce sont les exportations vers les pays tiers qui ont diminué de -60,4 %, alors que les exportations vers les pays de l'Union Européenne n'ont diminué que de 24,5 % (Source : Bilan prévisionnel 2015-2016 France AgriMer (Annexe 4)).

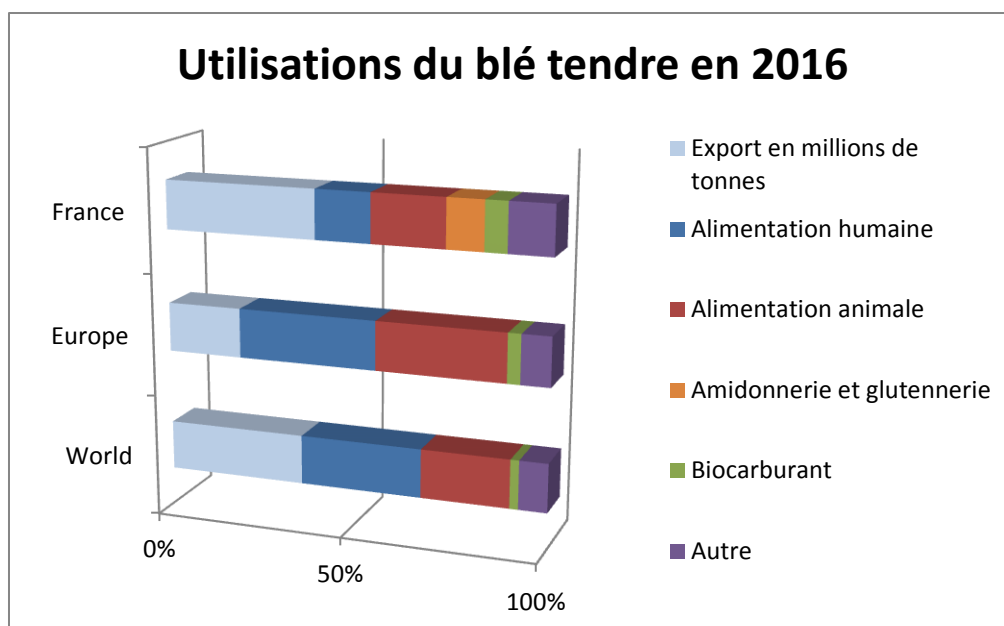


Figure 7: Utilisations du blé tendre en France (Source: Bilan prévisionnel Blé tendre du 10/05/2017 France AgriMer) en Europe et dans le monde (Source: Perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO 2016)

Malgré cela, l'exportation reste le principal débouché du blé tendre français. Sur le marché intérieur l'alimentation animale est le principal débouché. L'alimentation humaine (principalement la panification et la biscotterie), et donc la meunerie, est aussi un débouché important. En Europe et dans le monde, l'amidonnerie n'est pas un débouché significatif. L'alimentation humaine est en revanche plus importante qu'en France (Figure 7).

#### 1.1.4 La meunerie

Depuis l'antiquité, l'homme moule le grain pour en faire de la farine. Les moulins ont, à travers le temps, pris différentes formes. En Egypte, les moulins étaient actionnés par des esclaves, puis sont apparus les moulins à eau, à vent, jusqu'aux moulins automatisés et électriques de nos jours (Histoire de la meunerie française, par l'Association nationale de la meunerie française (ANMF)).

La meunerie française est le troisième débouché pour le blé tendre, après l'export (42,3 %) et l'alimentation animale (19,6 %), et représente 15,3 % des utilisations en 2017 (Bilan prévisionnel blé tendre du 07/2017 France Agrimer) (Annexe 4). Elle comprend 359 entreprises, 416 moulins et écrase 5,32 Mt de blé par an, soit une production de 4,12 Mt de farine (Fiche statistique ANMF 2016). Le marché intérieur est le principal débouché de la farine française (90,5 %) (ANMF/FranceAgriMer). En 2016, la France a exporté 393 481 t de farine soit 8,5 % de sa production.

En Belgique, seulement 9 % des blés produits sont utilisés en alimentation humaine. La meunerie belge utilise principalement des blés importés, seulement 15 % des blés utilisés par celle-ci sont produits en Belgique (Delcour et al., 2014). Le blé est principalement importé de France et d'Allemagne (respectivement 54 % et 30 % du volume total de blé importé en 2016) (Information SoCoPro). D'après les chiffres issus des enquêtes PRODCOM<sup>4</sup>, en 2016 la production de farine en

<sup>4</sup> L'enquête PRODCOM est une enquête statistique communautaire portant sur la production industrielle commercialisée en volume par produit. La production est définie par une liste de produits dont les rubriques sont constituées d'articles ou regroupements d'articles de la nomenclature combinée (NC) et reliée aux autres nomenclatures de produits. (Définition : Institut National de la Statistique et des Etudes économiques (INSEE))

Belgique était de 1,05 Mt dont 458 295 t a été exporté, soit environ 44 %. La meunerie belge moule donc principalement du grain importé et exporte une grande partie de la farine qu'elle produit.

Le marché de la farine est relativement stable. Son prix est finalement assez peu sensible aux fluctuations du prix du blé, comme le montre la Figure 8. Un élément d'explication de ce phénomène peut venir du fait que la production de farine dépend de la production de blé tendre de qualité meunière et non de la production de blé tendre toute qualité confondue.

Comme pour tous les produits, les prix du blé et de la farine sont déterminés par les exportations respectives de ces produits. Plus précisément, c'est le rapport « stock/consommation mondiale » qui explique l'évolution des prix du blé (Delcour et al., 2014).

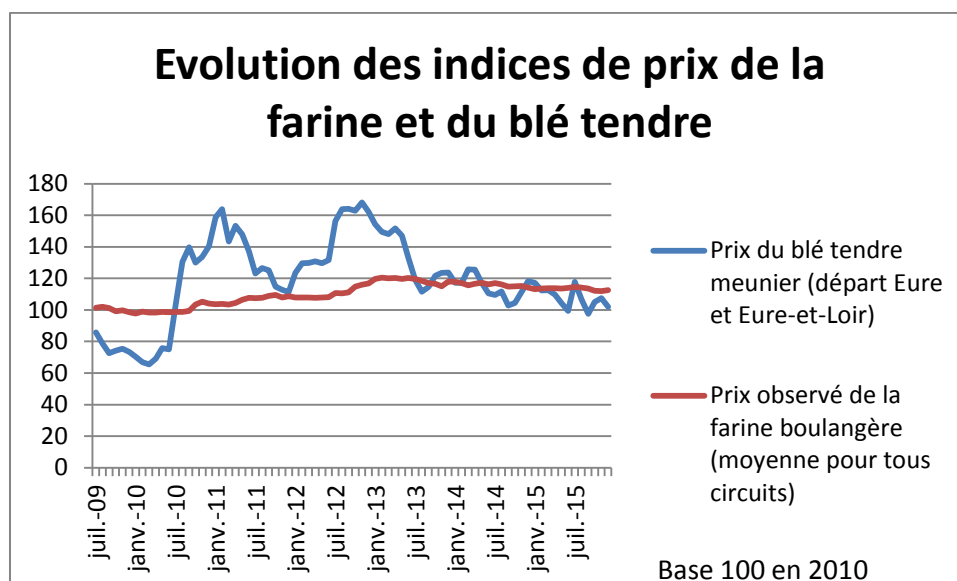


Figure 8: Evolution des prix de la farine et du blé tendre sur la période de juillet 2009 à juillet 2015 (Source: FranceAgriMer, INSEE)

En France, la panification et la biscuiterie/biscotterie sont de loin les principaux débouchés de la farine sur le marché intérieur (Figure 9). Il est à noter que la panification est principalement représentée par les boulangeries et pâtisseries artisanales (56,9 %) et industrielles (33,7 %) (Annexe 5).



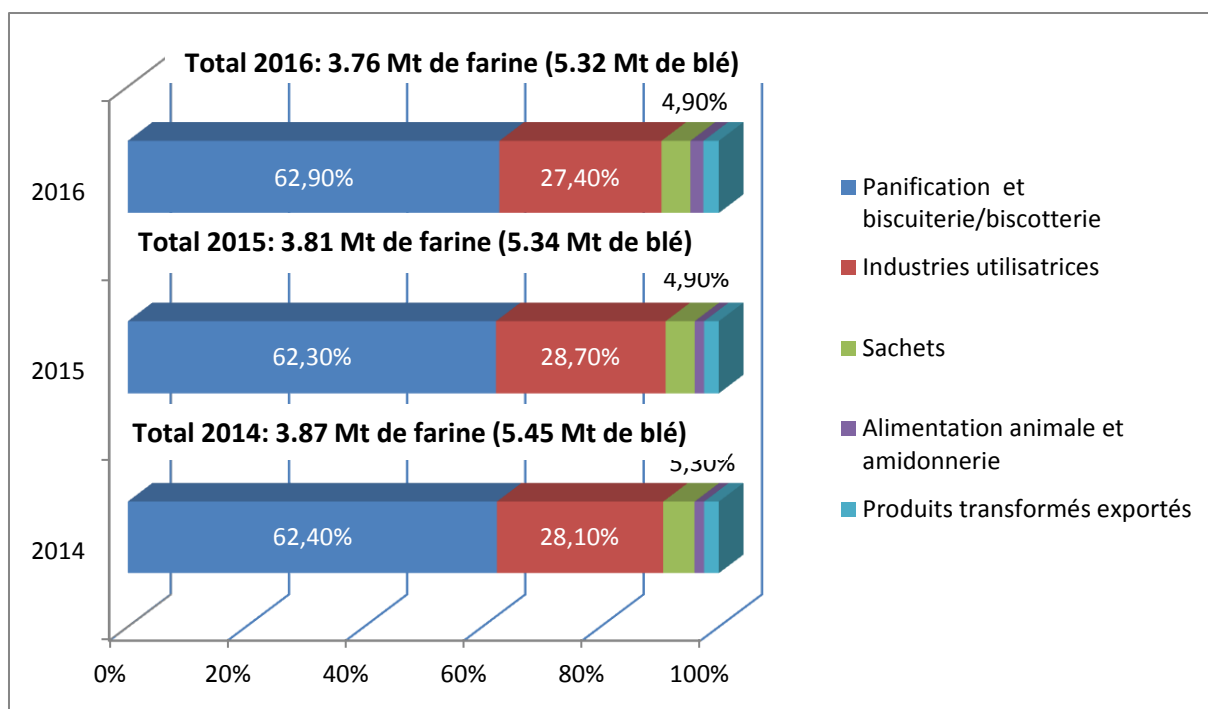


Figure 9: Débouchés des farines françaises sur le marché intérieur hors farine française exportée (Source : ANMF, Douanes, FranceAgrimer)

En Wallonie les farines sont destinées à 50 % aux boulangeries artisanales, à 30 % aux boulangeries industrielles et à 20 % à l'industrie alimentaire. Mais seulement 6 % de la farine utilisée par les boulangeries artisanales wallonnes est belge (Delcour et al., 2014). En revanche, la Belgique est exportatrice nette de produits de deuxième transformation issus des céréales (Source : International trade center).

La farine est principalement vendue sous forme de mixes, c'est-à-dire des farines issus de mélanges de variétés auxquelles sont ajoutés des adjuvants facilitant la panification (farine de fèves, farine de soja, malt, gluten de blé, etc). La qualité du pain est donc liée au mélange réalisé. C'est toute la difficulté du métier de meunier, et cela dépasse le cadre de ce mémoire. L'outil d'aide au choix de variété ne sera pas destiné à l'établissement d'un mélange. Cependant, il laissera la possibilité au meunier de renseigner les caractéristiques qu'il considère intéressantes dans la mise en œuvre de son mélange.

## 1.2 Les critères de qualité

La recherche de blé de qualité est un objectif de longue date qui a débuté dans les années 1930. Selon Branlard en 1986, l'évolution de la qualité des blés est parallèle à l'évolution des pratiques en meunerie. Ainsi, l'évolution exponentielle de la force boulangère (cf. 1.2.4) des blés au vingtième siècle coïncide avec la révolution industrielle suivie de l'industrialisation de la meunerie. De même, les techniques d'évaluation de la qualité ont fortement progressé. La démocratisation récente des méthodes d'analyse non destructrices a permis leur réalisation en routine et à faible coût. Cela présente un avantage considérable pour les sélectionneurs qui peuvent évaluer la qualité de leurs lignées à partir d'une petite quantité de grain.

Aussi, l'industrialisation de la boulangerie et l'automatisation des systèmes a entraîné de nouvelles contraintes. Par exemple, les boulangeries industrielles sont peu adaptées à l'hétérogénéité des lots de farines car le process est fixe, contrairement aux boulangeries artisanales qui adaptent leur recette en

fonction de la qualité de la farine. Ces nouvelles contraintes impliquent des exigences de plus en plus élevées en termes de qualité.

Les critères de qualité du blé ont donc évolué en fonction des débouchés. Une caractérisation systématique des variétés s'est mise en place au fil du temps, et les méthodes de détermination des critères se sont normalisées. Cette partie a pour but de présenter les principaux critères de qualités utilisés dans la filière meunière, ainsi que leur méthode de détermination.

### 1.2.1 Les protéines du grain de blé

La quantification et la qualification des protéines du grain de blé représentent un ensemble de critères d'appréciation de la qualité important tant pour l'alimentation humaine qu'animale (Bar L'Helgouac'h, 1995). En alimentation animale, la quantité de protéines du blé a une incidence économique car elle permet de diminuer les coûts liés aux tourteaux ou autres produits permettant de corriger la teneur en protéines de l'aliment. C'est aussi le cas en alimentation humaine où les produits céréaliers sont à la base de l'alimentation pour certains clients à l'exportation. En boulangerie, c'est davantage la qualité des protéines et notamment de la fraction insoluble (le gluten) qui est importante pour emprisonner les bulles de gaz lors de la fermentation et permettre ainsi la levée du pain (Bar L'Helgouac'h, 2016).

#### 1.2.1.1 Composition protéique du grain

En 1907, Osborne (Osborne, 1907) a proposé une première classification des protéines du grain de blé reposant sur leur solubilité. Les protéines solubles, dites « métaboliques » ou « fonctionnelles », sont composées d'albumines (15 %) et de globulines (5 %). Les protéines insolubles, dites « de réserve » sont formées de gliadines (30 à 40 %) et de gluténines (40 à 50 %). En 1986, Shewry (Shewry et al., 1986) a complété la classification d'Osborne, en distinguant les protéines insolubles dans l'eau en fonction de leur degré de polymérisation.

Les travaux sur la génétique des protéines du blé tendre étant basés sur la classification d'Osborne, nous nous tiendrons à cette dernière dans la suite de ce paragraphe. Les propriétés viscoélastiques de la pâte sont attribuées au gluten, un réseau protéique majoritairement composé de gliadines et de gluténines mais aussi d'amidon ou de sucres réducteurs. Plus précisément, ce sont les ponts disulfures formés par les protéines et les liaisons hydrogènes des SG-HPM (Sous-unités gluténines de haut poids moléculaire) qui confèrent les propriétés rhéologiques de la pâte (Feillet, 2000). La qualité des protéines est très bien caractérisée. Depuis 20 ans, on considère que ce sont les gliadines ( $\omega$ -gliadines,  $\beta$ -gliadines,  $\alpha$ -gliadines,  $\gamma$ -gliadines) et les sous-unités gluténines de haut poids moléculaire (SG-HPM) qui déterminent la rhéologie de la pâte. Les gliadines confèrent plutôt de l'élasticité à la pâte et les SG-HPM plutôt de la ténacité (Payne et al., 1979; Burnouf et al., 1980). Dès lors, le rapport entre ces deux classes de protéines est une donnée essentielle pour prédire le comportement de la pâte. Le rapport gliadines/SG-HPM recherché en panification française est de 3. Mais ce ratio augmente, de manière plus ou moins significative en fonction des variétés, avec la teneur en protéines (Bar L'Helgouac'h et al., 2004). Depuis quelques années, des travaux menés par ARVALIS – Institut du végétal semblent montrer que la rhéologie de la pâte est déterminée par un seul gène, le GluD1, qui code pour les sous-unités gluténines de haut poids moléculaire (SG-HPM). On peut distinguer deux catégories de SG-HPM en fonction de leur poids moléculaire grâce à leur migration sur un gel d'électrophorèse : celles à forte migration (poids moléculaire élevé) et celles à faible migration (poids moléculaire plus faible). Toutes celles à forte migration sont codées par l'allèle 5+10 du gène GluD1 et celles à migration moins élevée sont codées par différents allèles du gène GluD1, comme l'allèle

2/3/4+12 par exemple. L'allèle 5+10 confère de la ténacité à la pâte alors que l'allèle 2/3/4+12 confère de l'élasticité (témoignage Benoît Méléard). Une étude publiée en 2016 a mis en évidence que, depuis l'introduction dans les années 1980 de l'allèle 5+10 dans les profils génétiques des variétés, le gluten index (Figure 10) moyen des blés récoltés a progressé (Méléard et al., 2016).

### *1.2.1.2 Mesure de la quantité de protéines*

Pour déterminer la teneur en protéines du grain, on admet que l'ensemble de l'azote contenu dans celui-ci est d'origine protéique. La quantité d'azote est déterminée par la méthode Kjeldahl (méthode chimique) ou par la méthode Dumas (méthode physique). La teneur en protéine est alors déterminée via un facteur de conversion (égal à 5,7 pour le blé tendre à destination de l'alimentation humaine). Ce sont les deux méthodes de référence. La méthode de mesure par spectrométrie dans le proche infrarouge est plus rapide et donc plus répandue. Cependant, l'appareil nécessite un étalonnage régulier qui ne peut se faire qu'à partir des méthodes de référence. La teneur en protéines d'un blé s'explique principalement par le climat, la fertilisation azotée et la variété. Le paramètre variétal serait responsable de 15 à 25 % (Lorgeou et al., 2014) des variations de taux de protéines. Le taux de protéines se « dilue » dans le rendement, plus la variété a un rendement élevé plus son taux de protéines est faible. Cependant, certaines variétés maintiennent un fort taux de protéines malgré une augmentation du rendement. On dit que ces variétés s'écartent de la « courbe de dilution protéines/rendement ». Cet écart est appelé le GPD (grain protein deviation) (Lorgeou et al., 2014). L'intérêt du taux de protéines pour l'évaluation de la qualité d'un blé est fortement discuté par les utilisateurs (meuniers, amidonnier). La rapidité de mesure de ce critère en fait l'un des plus mesuré en laboratoire mais beaucoup d'utilisateurs souhaitent compléter ce critère avec l'appréciation de la qualité des protéines contenues dans le blé. En effet, la quantité de protéine peut avoir un intérêt dans le calcul de la valeur nutritionnelle d'un blé mais l'intérêt est moins évident lorsque l'on souhaite connaître le comportement de ce grain à la panification.

### *1.2.1.3 Mesure de la qualité des protéines*

Le gluten humide est un indicateur de la quantité de gluten dans une pâte. Le gluten est extrait par malaxage d'un mélange de mouture et d'eau salée à 2 %. Le gluten humide s'exprime en pourcentage de la matière (il peut être ramené à une farine de 14 % d'humidité). Le gluten humide est positivement corrélé avec la teneur en protéines.

Le Gluten Index est une mesure de la qualité du gluten. Le gluten extrait est placé sur un tamis (Figure 10), et on mesure la proportion de gluten retenue sur cette grille perforée après centrifugation. Cette méthode fait l'objet d'une norme : ICC 155. Plus le gluten est tenace et élastique, plus la quantité de gluten passant au travers du tamis est faible et plus le Gluten Index est élevé (Figure 10 (a)). A l'inverse, s'il est extensible, une grande partie du gluten passe à travers le tamis, le gluten index est alors faible (Figure 10 (c)). Si son comportement est intermédiaire, il est alors qualifié d'équilibré (Figure 10 (b)). Ce critère fournit donc une indication sur l'élasticité et la ténacité de la pâte qui serait obtenue à partir d'un blé. Enfin, le gluten index est fortement dépendant de la variété (Bar L'Helgouac'h, 1995). Il fournit donc une appréciation intéressante de la qualité des variétés.

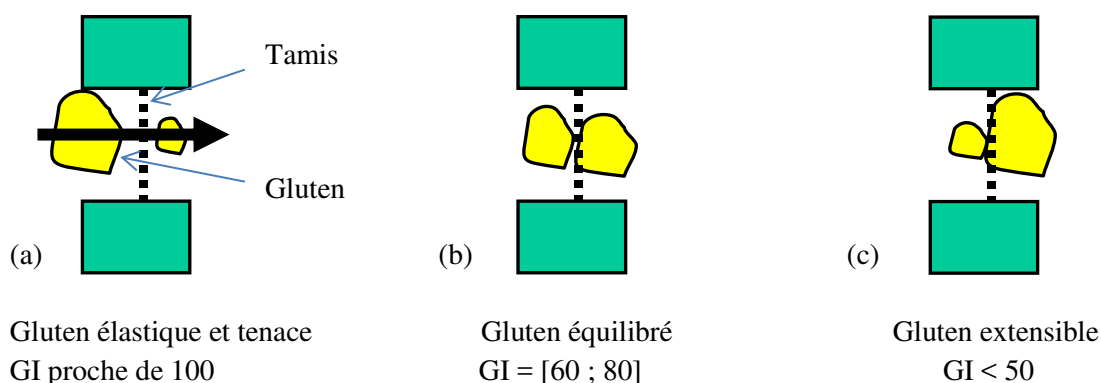


Figure 10 : Détermination du gluten index (GI)

Le gluten index recherché par les meuniers va dépendre de l'utilisation de la farine. Pour un débouché biscuitier, on recherche des farines ayant des protéines capables de former des réseaux extensibles et non élastiques pour limiter la rétraction du biscuit<sup>5</sup>. Le gluten index recherché sera donc faible. En revanche, pour un débouché de panification, on recherche des farines ayant la capacité de former un complexe viscoélastique conférant à la pâte des propriétés de ténacité, d'élasticité, et d'extensibilité ainsi que la capacité à retenir les gaz lors de la fermentation. Pour cela, un gluten index équilibré à élevé sera recherché.

### 1.2.2 L'amidon du grain de blé

L'amidon est un polymère de glucose formant des liaisons  $\alpha$  1-4, et  $\alpha$  1-6 au niveau des ramifications. On trouve deux formes d'amidon, l'amylose (26 à 28 % de l'amidon dans le blé tendre) qui contient essentiellement des liaisons  $\alpha$  1-4 et l'amylopectine (72 à 74 % de l'amidon dans le blé tendre) qui contient davantage de liaisons  $\alpha$  1-6 et qui apparaît donc plus ramifiée (Feillet, 2000). Les proportions de ces deux composés (amylose et amylopectine) varient en fonction de l'origine botanique des espèces (Sindic et al., 2010). L'amidon est présent dans la cellule sous forme de deux types de granules. Ceux dont la taille est comprise entre 10  $\mu\text{m}$  et 35  $\mu\text{m}$ , de forme lenticulaire et ceux de taille plus petite (1-10  $\mu\text{m}$ ), de forme sphérique. La proportion entre ces deux formes de granules influence les propriétés fonctionnelles de l'amidon (Raeker et al., 1998; Peng et al., 1999; Parker et al., 2001). Les propriétés rhéologiques de la pâte formée à partir d'une farine sont fonction des propriétés fonctionnelles de l'amidon et donc de la proportion de ces deux types de granules. Plus la proportion de granules de petites tailles est élevée, plus la pâte est extensible (Soulaka et al., 1985). Les proportions de ces granules sont directement liées au rapport amylose/amylopectine (Sindic et al., 2010).

En meunerie, c'est davantage l'activité  $\alpha$ -amylasique que l'amidon qui est considérée. Cette enzyme ainsi que la  $\beta$ -amylase va cliver l'amidon et ainsi produire du maltose et du glucose. Ces deux sucres constituent les principaux apports énergétiques pour les levures intervenant dans le processus de panification. Les amylases permettent donc, indirectement, de stimuler le développement et la multiplication des levures utilisées en panification et donc la production de  $\text{CO}_2$ . Mais si la teneur en  $\alpha$ -amylase est trop élevée, l'amylose et l'amylopectine se liquéfient, la pâte devient collante et caoutchouteuse et le pain formé devient rouge à la cuisson.

La germination est la principale cause de l'augmentation de la quantité de ces enzymes (Feillet, 2000). La mesure du temps de chute de Hagberg est la méthode la plus utilisée pour évaluer l'activité

<sup>5</sup> La rétraction du biscuit est un critère important du test biscuitier

amylasique. Elle consiste à mesurer le temps de chute d'un agitateur dans un empois formé à partir d'une farine ou d'une mouture complète mélangée à de l'eau à 100°C (Bar L'Helgouac'h, 1995). Cette méthode fait l'objet d'une norme : NF EN ISO 3093. Plus l'activité de l'enzyme est élevée, plus l'empois est liquéfié et plus le temps de chute de l'agitateur est court.

L'utilisation de cette méthode indirecte de mesure de l'activité  $\alpha$ -amylasique peut être contestée. D'abord, le germe et les sons contiennent 50 à 60 % des  $\alpha$  amylases. Dès lors, l'indice de chute de Hagberg mesuré sur une mouture intégrale ne traduit pas forcément l'activité amylasique de la farine correspondante. Par ailleurs, dans cette méthode, le temps de chute est fonction de l'activité de l'enzyme mais aussi de l'amidon. Résumer le temps de chute à l'activité  $\alpha$ -amylasique revient donc à considérer la composante amidon constante (Sindic et al., 2010). Des travaux menés à Gembloux Agro-Bio-Tech ont montré qu'un temps de chute de Hagberg pouvait correspondre à plusieurs activités  $\alpha$ -amylasiques et inversement. Comme décrit au paragraphe précédent, la forme de l'amidon est fonction du rapport amylose/amylopectine, et est donc très liée à la génétique (Sindic et al., 2010). Le comportement à la panification de l'amidon influence les propriétés rhéologiques de la pâte (collant de la pâte) et donc la qualité du produit fini. Le comportement de l'amidon est fonction à la fois de la structure de celui-ci (rapport amylose/amylopectine et rapport granules lenticulaires/sphériques) et de l'activité  $\alpha$ -amylasique. Les composantes amidon et amylase ont toutes deux un déterminisme génétique (effet variété) mais aussi environnemental (climat, itinéraire technique) (Sindic et al., 2010). Dans ce cadre, prédire le comportement à la panification d'une variété uniquement sur base de l'indice de chute de Hagberg mesuré à partir d'une mouture complète peut ne pas être justifié. Il est d'ailleurs couramment observé au laboratoire d'ARVALIS – Institut du végétal, des blés dont l'indice de chute de Hagberg est extrêmement bas mais dont la farine est tout à fait panifiable.

### 1.2.3 La dureté

La dureté est un critère qui définit la capacité de l'amande du grain à se casser. On parle aussi de friabilité du grain de blé. Plus le grain est friable moins il est dur et inversement. Les blés friables (type soft) se caractérisent par des fractures à travers les cellules de l'albumen lorsqu'ils sont moulus. Les blés de type hard vont se casser, lorsque les blés soft vont se désagréger. La mesure de cette caractéristique se fait par spectrométrie dans le proche infrarouge sur une mouture. La dureté est exprimée sur une échelle de 1 à 100. Les blés de type soft ont une dureté moyenne de 25 et ceux de type hard de 75. C'est d'ailleurs souvent les classes de dureté (extra-soft, soft, medium-hard, hard, extra-hard) qui sont fournies aux utilisateurs et non les valeurs exactes de celles-ci.

Historiquement, ce critère est fortement utilisé aux Etats-Unis. C'est le principal critère de classification des blés dans ce pays. La France utilise donc la méthode américaine de mesure de la dureté (AACC 39-70.02) de manière à pouvoir comparer ses blés avec le concurrent américain sur le marché mondial. Les blés français sont de type medium-hard (Figure 11).

Ce critère est rédhibitoire pour le débouché biscuitier où le caractère soft d'un blé est indispensable pour qu'il puisse être valorisé. En effet, les blés de type soft ont souvent un taux de protéines faible et un endommagement de l'amidon plus faible que les blés de type hard. Ces caractéristiques confèrent une faible capacité d'absorption d'eau à la pâte qui est recherchée en biscuiterie.

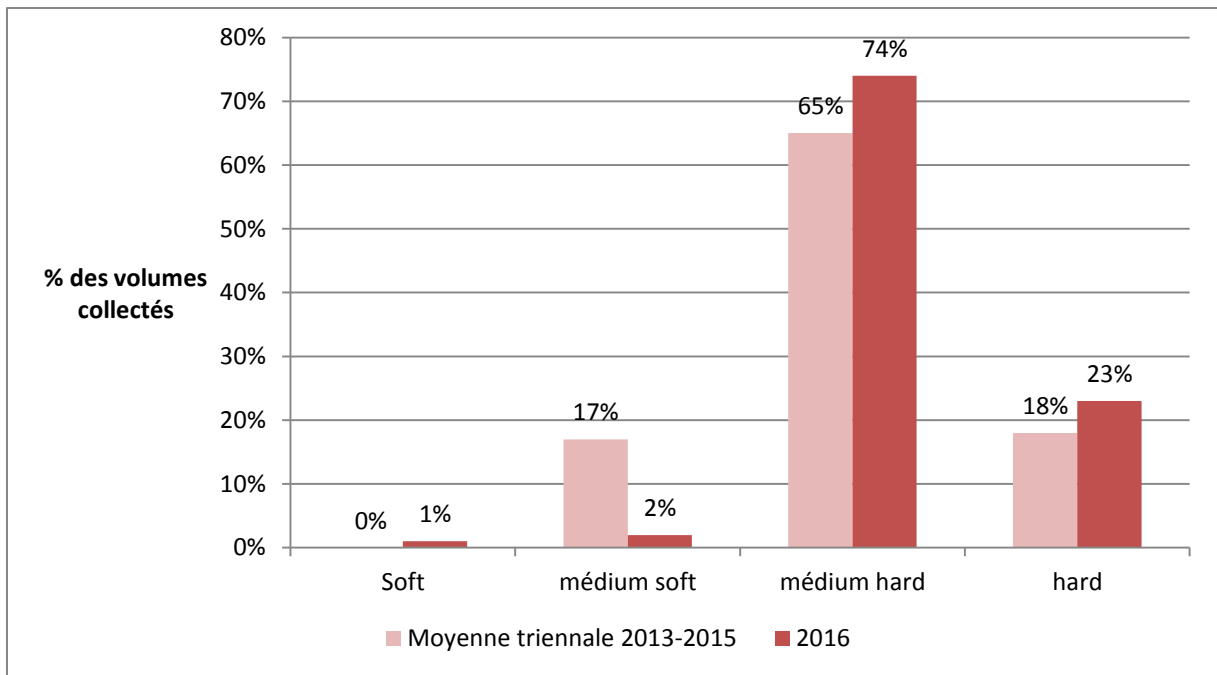


Figure 11 : Représentation graphique des classes de dureté des blés collectés en 2016 (Source : FranceAgriMer/Enquête qualité collecteurs 2016)

### 1.2.4 L'alvéographe de Chopin

Pour la panification, les critères de qualité mesurés sur les grains ou les moutures ne suffisent pas. C'est donc à partir de la pâte que des analyses sont faites. Plusieurs critères sont issus de l'alvéographe de Chopin. Le principe de la mesure est d'étudier le comportement d'un disque de pâte formé à partir de farine et d'eau salée lors de sa déformation sous l'effet d'un déplacement d'air à débit constant. Sous l'effet de l'air, une bulle de pâte se forme.

La détermination de l'alvéographe est soumise à une norme : NF EN ISO 27-971.

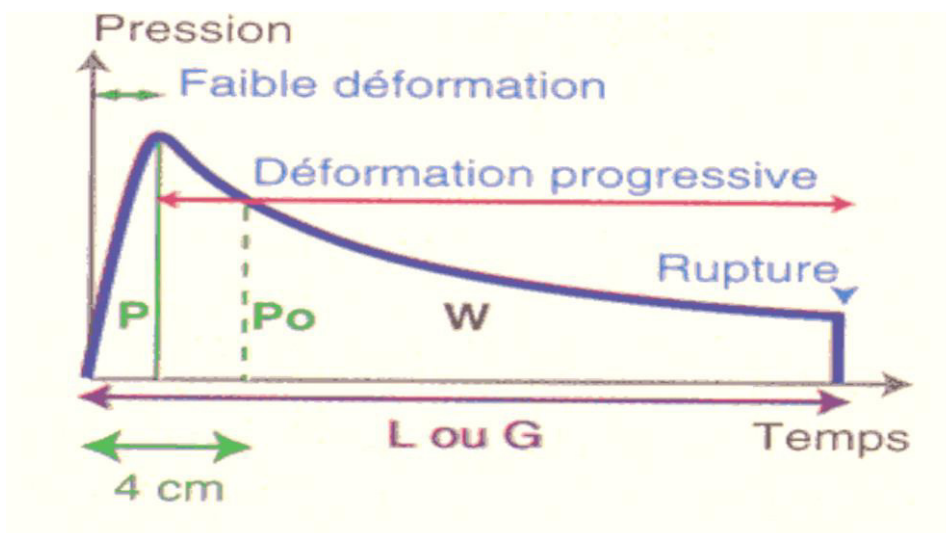


Figure 12: Alvéographe de Chopin et les critères de qualité issus de celui-ci (source : ARVALIS – Institut du végétal)

La mesure de la pression à l'intérieur de la bulle de pâte au cours du temps permet d'obtenir le graphique de la Figure 12. Ce graphique permet d'évaluer plusieurs caractéristiques de la pâte :




- P (unité : millimètre) est obtenu à partir de la pression maximale mesurée dans la pâte. Ce critère donne une indication sur la ténacité de la pâte. Plus le P est élevé plus la pâte est tenace.
- Le G ou le L (unité : millimètre) sont obtenus à partir de la mesure du gonflement de la pâte ( $G = 2,22 * \sqrt{L}$ ). Ce critère donne une indication sur l'extensibilité de la pâte. Plus le L est élevé plus la pâte est extensible.
- W (unité :  $10^{-4}$  joules) est obtenu à partir de la mesure de l'air sous la courbe. Ce critère donne une indication sur la résistance de la pâte. Plus il est élevé plus la pâte est résistante. Le W est aussi appelé « la force boulangère » de la pâte.
- L'indice d'élasticité (Ie) est obtenu à partir du rapport P0/P. Ce critère donne une indication sur l'élasticité de la pâte.
- Le rapport P/L donne une indication sur l'équilibre entre la ténacité et l'extensibilité de la pâte. C'est d'avantage ce rapport qui est un critère décisionnel important pour les meuniers que les deux valeurs prises individuellement.

En fonction du type de blé (blé de force, blé panifiable, blé biscuitier), on observe différents types de courbes à l'alvéographe de Chopin (Tableau 2).

**Tableau 2 : Alvéographe de Chopin et débouché du blé (Source : ARVALIS – Institut du végétal)**

	<b>Blé de force</b>	<b>Blé panifiable</b>	<b>Blé biscuitier</b>
W	>350	>170	<150
P/L		P/L<0.7	0.3<P/L<0.5

Alvéographe			
-------------	---	--	---

Enfin, l'une des propriétés importantes de l'alvéographe est son additivité. Dans un mélange de farine (mix), l'alvéographe du mix est la résultante des alvéographes des farines utilisées pour réaliser le mélange (Bar L'Helgouac'h, 1995). La teneur en protéines impacte de manière significative la forme de l'alvéographe. Ainsi, le W est positivement corrélé avec la teneur en protéines, tandis que le P/L est négativement corrélé avec celle-ci. L'alvéographe permet d'apprécier les propriétés rhéologiques de la pâte à un instant t. Mais on peut aussi désirer connaître l'évolution des propriétés rhéologiques de la pâte dans le temps grâce au farinographe.

### 1.2.5 Le farinographe Brabender

Le farinographe de Brabender permet de caractériser l'évolution des propriétés rhéologiques de la pâte lors du pétrissage. Le principe consiste à mesurer la quantité d'eau à ajouter à la farine pour obtenir une pâte avec une consistance de 500 Unités Farinographes (UF) au pétrissage. Afin de pallier aux incertitudes liées à l'introduction de la « bonne quantité » d'eau pendant le temps requis (25 secondes), 3 essais sont réalisés pour une même farine.



La quantité d'eau nécessaire pour que le maximum de 500 UF soit atteint lors du pétrissage définit la capacité d'absorption d'une farine. Plusieurs autres mesures peuvent être réalisées sur le farinographe :

- Le temps de développement est le temps nécessaire pour que le couple du pétrin (mesuré en UF) soit maximal
- La stabilité se définit comme la différence en temps entre les deux points d'intersection du sommet de la courbe avec la droite des 500 UF (Figure 13)
- Le degré d'affaiblissement est la différence de hauteur entre le centre de la courbe à la fin du temps de développement de la pâte et le centre de la courbe 12 minutes après ce point (Figure 13).

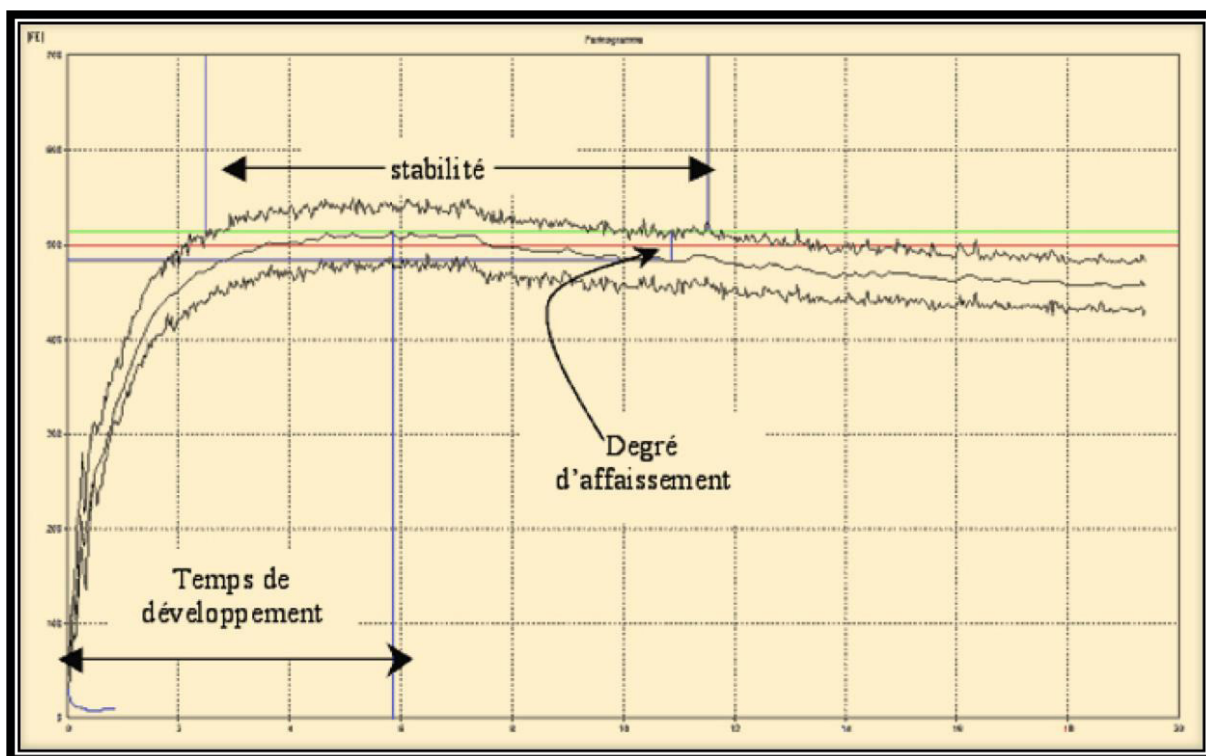


Figure 13 : Farinogramme de Brabender. Détermination du temps de développement, de la stabilité et du degré d'affaiblissement (Source : Meunerie Milanaise)

La capacité d'hydratation de la farine détermine directement le rendement en pain d'une farine. En effet, plus elle est capable de s'hydrater plus la quantité de pâte formé à partir d'une même quantité de farine sera élevée. Ce critère intéresse surtout les industriels. La stabilité est en générale indicatrice de la tolérance de la pâte au pétrissage.

### 1.2.6 Les tests de panification et biscuitiers

En France, il existe des tests directs de mesure de la capacité d'une farine à être utilisée en boulangerie ou en biscuiterie. Ils permettent l'attribution d'une classe de qualité lors de l'évaluation d'une variété. Les deux principaux tests sont le test de panification de type pain courant français (NF V03-716) et le test biscuitier.




### 1.2.6.1 Test de panification de type pain courant français

Le test de panification de type pain courant français permet d'évaluer la qualité boulangère d'une farine pure ou en mélange. Le BIPEA (Bureau interprofessionnel d'études analytiques) a mis en place une méthodologie commune d'essai afin de réduire les biais entre les différents fournils. Cette méthode est normalisée et standardisée (NF V03-716). Elle est inspirée de de la méthode CNERNA (Centre national d'études et de recherches sur la nutrition et l'alimentation).

Ce test reproduit un diagramme de panification tel qu'il pourrait être utilisé en boulangerie. Une grille de notation (Annexe 7) permet d'évaluer les propriétés de la pâte au cours du pétrissage, du pointage<sup>6</sup>, du façonnage, de l'apprêt<sup>7</sup> et de la mise au four, puis l'aspect du pain et de la mie. Au total 34 critères sont évalués. La description complète de ces critères est reprise par Roussel et al., 2010 (Roussel et al., 2010).

Pour chaque critère observé ou mesuré, le caractère « attendu » est gratifié d'une note de 10. Un défaut peut être considéré en excès (7 : excès peu important, 4 : excès important, 1 : excès très important) ou en insuffisance (-7 : insuffisance peu marquée, -4 : insuffisance marquée, -1 : insuffisance très marquée). Pour faciliter le traitement des données, ces notes sont souvent linéarisées (Figure 14).

Défaut (-)				Excès (+)		
-1	-4	-7	10	7	4	1



1	4	7	10	13	16	19
---	---	---	----	----	----	----

Figure 14 : Système de notation du test de panification de type pain courant français et règle de linéarisation de la notation

L'ensemble des notes est agrégé pour former une note totale de panification sur 300 points, résultant d'une note de pâte sur 100, d'une note de pain sur 100 et d'une note de mie sur 100. La classe technologique des blés est déterminée à partir de cette note totale de panification (Tableau 3).

Tableau 3: Classes technologiques: BPS (Blé panifiable supérieur), BP (Blé panifiable), BAU (blé à autre usage)

Classe technologique	BPS	BP	BAU
Note totale de panification	>250	250-220	<220

Cependant, le comportement en panification ne se résume pas à la seule classe qualité. En effet, pour un meunier, le profil d'une variété en panification a toute son importance.

L'outil d'aide au choix des variétés de blé tendre devra donc offrir la possibilité de classer les variétés en fonction des critères individuels issus du test de panification de type pain courant français. Le collant de la pâte est par exemple un critère très important pour les boulangeries industrielles où l'automatisation des systèmes exige un collant faible et homogène dans le temps. L'intérêt de ce test est que lors de l'évaluation variétale l'aptitude à la panification de chaque variété est déterminée strictement dans les mêmes conditions, ce qui rend la comparaison possible entre chaque variété.

Cependant les critères liés à ce test de panification peuvent être contestés. En effet, la particularité de ce test est qu'il est très lié à la subjectivité du boulanger d'essai. Hormis le volume, l'allongement et

<sup>6</sup> Première fermentation

<sup>7</sup> Seconde fermentation

l'activité fermentaire, tous les critères sont basés sur l'appréciation du boulanger d'essais. De plus, cette méthode ne rend pas compte de la réalité boulangère. Elle n'est pas représentative des protocoles utilisés dans les industries. Les recettes varient d'un industriel à l'autre et d'un boulanger artisanal à l'autre. Ainsi, il peut être difficile pour eux de s'identifier à la recette du test de panification. Pour pallier à ce problème, meuniers et boulangers réalisent leur propre test. La filière est demandeuse d'autres tests, plus représentatifs des recettes qu'ils utilisent. Si d'autres tests sont mis au point, d'autres critères de qualité apparaîtront. Les variétés seront alors mieux caractérisées mais le choix variétal sera d'autant plus complexe. Là encore, dans ce domaine, l'OAD apporterait une solution car il permet d'agréger un nombre important de critères.

### *1.2.6.2 Test biscuitier*

Le test biscuitier est réalisé sur les blés dits « biscuitiers » par le CTCPA (Centre Technique de la Conservation des Produits Agricoles). Il est réalisé à hydratation constante de 24 % et avec laminage. Quatre critères de qualité sont issus de ce test :

- L'aspect de la pâte est un avis qualitatif qui ne fait pas l'objet d'une note.
- L'aspect de surface est formalisé sous la forme d'une note comprise entre 0 et 5 (0 = mauvais aspect, 5 = bel aspect), c'est donc un critère subjectif.
- Le rétreint est le rapport entre la longueur (sens du laminage) et la largeur du biscuit après cuisson. La longueur est parfois associée au rétreint. Les pâtons mis au four sont de forme carrée et de 6 cm de côté. Ainsi, plus la longueur du pâton après cuisson est inférieure à 6 cm, plus le rétreint est élevé. De même, plus la longueur après cuisson est supérieure à 6 cm, plus le biscuit « s'étale ». Les utilisateurs cherchent des variétés ayant un faible rétreint.
- La densité du biscuit est exprimée en  $\text{g/cm}^3$ , et les utilisateurs désirent qu'elle soit inférieure à  $0.3 \text{ g/cm}^3$ .

Ce test n'est pas normalisé. Contrairement à la panification, actuellement aucune initiative commune au sein de la filière n'a permis de mettre au point une norme. Le test réalisé par le CTCPA est reconnu par le CTPS mais est fortement discuté dans la profession. Il n'est pas représentatif des protocoles de fabrication des biscuits pratiqués par la filière. Par exemple, le laminage de la pâte est uniquement réalisé pour certaines catégories de biscuits (les biscuits moulés ne sont pas laminés). Dès lors, chaque industriel développe ses propres tests qui sont confidentiels.

### *1.2.6.3 Autres tests*

D'autres tests existent en France, comme le test de panification de type pain de tradition française<sup>8</sup>, ou encore le test en pousse contrôlée<sup>9</sup>. Ces tests ne sont pas encore normalisés à l'heure actuelle. Les meuniers réalisent leurs propres tests adaptés à leurs besoins. Les protocoles et résultats obtenus sont gardés confidentiels.

Aux Etats-Unis, par exemple, un test de pâte à biscuit est normalisé par l'AACC (American association of cereal chemists) : baking quality of cookie flour AACC 10-50-05. Cet organisme

---

<sup>8</sup> Le décret n°93-1074 définit ce dernier comme « les pains, quelle que soit leur forme, n'ayant subi aucun traitement de surgélation au cours de leur élaboration, ne contenant aucun additif [...] ». Le protocole est en cours d'élaboration et donc ce test ne fait l'objet d'aucune norme à l'heure actuelle.

<sup>9</sup> Apprêt bloqué par une diminution de la température en chambre froide puis la fermentation est activée en augmentant la température

normalise énormément de test de cuisson, reprenant un protocole de fabrication du produit fini (cookies, cake, biscuit, ect)

La mise en place de tests et leur normalisation est une démarche difficile à mettre en place. Il faut que tous les acteurs de la filière se mettent d'accord sur un protocole suffisamment représentatif de leurs pratiques. Pour cela, il est nécessaire de connaître les pratiques de ces derniers, mais la concurrence qui règne entre les entreprises freine la mise en commun du savoir.

### 1.2.7 Autres critères

D'autres critères peuvent être pris en compte dans le choix du meunier.

Le poids spécifique est une mesure de la masse volumique du grain est, avec le taux de protéines, le critère le plus mesuré. Il s'agit d'un critère contractuel incontournable, systématiquement utilisé pour le commerce du blé, même si sa signification technologique est plutôt limitée. Pour les très faibles PS on constate cependant une diminution du taux d'extraction en farine. Dans la plupart des cahiers des charges, la limite basse stipulée est de 76 kg/hl.

Le test de sédimentation de Zélény évalue l'aptitude des protéines à gonfler en milieu lactique. La méthode consiste à mélanger une mouture avec de l'acide lactique et de l'isopropanol et de mesurer la hauteur du dépôt. Cette méthode fait l'objet d'une norme : NF ISO 5529. L'indice de sédimentation de Zélény est un critère totalement marginalisé en France car il ne permet pas de prédire le comportement à la panification d'une mouture. En revanche dans d'autres pays d'Europe comme la Belgique et l'Allemagne, ce critère est encore très utilisé (Bar L'Helgouac'h, 1995).

La valeur meunière est un critère important pour le meunier. Il l'est beaucoup moins pour les industries de seconde transformation du blé. La valeur meunière représente l'aptitude du blé au rendement en farine. Elle se caractérise par le taux d'extraction de la farine:

$$\text{Taux d'extraction} = \frac{\text{poids de farine}}{\text{poids de grain moulu}} * 100$$

Les critères sanitaires sont de l'ordre de la santé publique et sont donc rédhibitoires.

Les mycotoxines peuvent être produites par énormément de parasites qui se développent au champ ou au stockage. La mycotoxine la plus fréquemment retrouvée dans le blé tendre est le déoxynivalenol, communément appelé DON. Cette toxine fait l'objet de Limites Maximales Réglementaires Européennes. Les limites sont fixées en fonction du débouché de celles-ci. Si le blé est destiné à l'alimentation humaine alors il doit respecter la limite maximale de 1250µg/kg fixée par le règlement (CE) N°1881/2006.

Cette mycotoxine est susceptible d'être produite par certains champignons du genre *Fusarium* (*Ascomycètes*) ayant une phase de conservation dans le sol (phase saprophyte). Cette phase se caractérise par la libération au printemps d'ascospores par les périthèces présents dans les résidus de culture du sol. Ces ascospores vont coloniser les fleurs, les grains et les tiges du blé cultivé (Trail, 2009). La lutte contre ces champignons s'organise en deux axes : la prophylaxie et l'intervention (utilisation de fongicides). La prévention s'articule autour d'un triptyque : le travail du sol (gestion des résidus de culture qui servent de substrat au champignon), le précédent cultural (par exemple le maïs génère une quantité de résidus au sol plus importante nécessitant un travail du sol adapté), le choix variétal (sensibilité de la variété à *Fusarium*). A ces critères agronomiques s'ajoutent les aléas

climatiques (Gourdain et al., 2016). L'ensemble de ces facteurs sont intégrés dans l'outil Myco-LIS, développé par ARVALIS – Institut du végétal, qui permet de conseiller l'agriculteur et de prévoir notamment les risques de dépassement des teneurs maximales autorisées sur une aire de collecte.

La sensibilité variétale est donc un élément aggravant parmi d'autres. Mais c'est le seul levier utilisé par les meuniers pour identifier les variétés ayant un potentiel génétique intéressant (faible sensibilité à *Fusarium*) afin de favoriser le développement de celles-ci.

Le débouché dans lequel une variété, ou un lot, peut être valorisé va dépendre de sa teneur en déoxynivalenol. La détermination de la teneur en mycotoxines d'un lot de blé se fait par des laboratoires accrédités selon la norme NF EN ISO 17025 pour la méthode chromatographique d'analyse pour le couple mycotoxine/produit. L'échantillonnage doit être effectué comme indiqué dans la norme AFNOR NF V03-777.

### 1.2.8 Conclusion

Les différents tests mis en place permettent de prédire les propriétés physico-chimiques et rhéologiques d'un blé ou d'une farine. Cependant les critères évalués peuvent avoir une importance variable en fonction, d'abord, du débouché. Ainsi les résultats au test biscuitier d'une variété vont être consultés si l'on souhaite utiliser la farine pour faire un biscuit, alors qu'on regardera les résultats au test de panification si l'on souhaite utiliser une farine pour faire du pain. Mais l'importance des critères sera aussi fonction du procédé de fabrication (industriel ou artisanal) voir même de la recette utilisée. Plus une recette utilise d'ingrédients, moins le choix de la variété est déterminant car d'autres ingrédients peuvent être responsables des caractéristiques du produit fini. Aussi, les améliorants permettent de corriger certains défauts des farines. Par exemple, au cours du pétrissage, la formation du réseau de gluten peut être facilitée par l'ajout d'acide ascorbique (E300). Ce dernier permet aussi de réduire le temps de pointage. Toutefois, les améliorants sont soumis à des réglementations : réglementation sur les additifs (règlement (CE) n°1333/2008 et règlement (UE) n°1129/2011) et sur les ingrédients (acide ascorbique interdit dans la préparation du pain de tradition française).

La détermination de la valeur moyenne de ces critères est une donnée purement statistique. Le nombre de lieux où sont implantés les essais, le nombre d'échantillons, l'appareil de mesure ou même le type d'analyse statistique des données sont tant de facteurs qui varient dans le temps. Les résultats sont donc à relativiser, et la comparaison dans le temps des critères de qualité peut parfois ne pas être fondée. Certains critères ont une variance plus élevée que d'autres. De même, certaines variétés ont des variances pour un critère plus élevées que d'autres. A cela, s'ajoute les intervalles de confiance des résultats fournis par le matériel de mesure. Ces intervalles ne sont pas les mêmes d'un appareil à l'autre et donc la précision de mesure n'est pas la même d'un critère à l'autre. Enfin, chaque critère a une détermination génétique différente.

A l'image du rendement, l'ensemble des critères de qualité du blé sont déterminés à la fois par la génétique (effet variété), par l'environnement (effet année, effet lieu et effet itinéraire technique) et par l'interaction génotype-environnement. Une étude menée sur 6 variétés de blé tendre en 3 lieux différents a montré que le génotype était significativement influant sur la force boulangère et l'indice de sédimentation de Zélény (Khelifi et al., 2004). Une analyse des données fournies par les essais ARVALIS – Institut du végétal a permis de mesurer la responsabilité de la génétique dans la détermination de certains critères de qualité. Le poids de la génétique dans le niveau de la force boulangère est de 65 %, il est de 59 % pour le test de panification et de 76 % pour le PS (étude non publiée). En parallèle, notons que les conditions climatiques (effet année) impactent fortement les critères de qualité. Les accidents climatiques de l'année 2016 illustrent cette dépendance des critères

de qualité du blé aux aléas climatiques. Ainsi, les faibles rendements de 2016 ont favorisé une production à forte teneur en protéines par effet de « dilution » de la protéine dans le rendement. De même, en Belgique, la récolte tardive des blés à cause des conditions climatiques mauvaise début août 2016 a entraîné une diminution du temps de chute de Hagberg en deçà de 220 secondes pour certains lots (Watillon et al., 2016).

Il apparaît donc que le choix de la variété est un levier important dans l'établissement de la qualité du blé produit. Mais ce choix doit s'accompagner d'un itinéraire technique réfléchi en conséquence, auquel s'ajoutent les aléas climatiques.

### 1.3 Choix d'une méthode d'analyse multicritère

L'analyse multicritère devient indispensable lorsque le problème que l'on souhaite résoudre comporte plusieurs objectifs, souvent contradictoires (Lehoux et al., 2004). Ces méthodes d'analyse sont utilisées dans tous les secteurs : agronomique, médical, social, économique, etc. Elles permettent de prendre une décision, et donc faire un choix entre différents scénarios permettant de résoudre le problème auquel on est confronté (Roy et al., 1993). Ces méthodes intègrent tout type de critère et permettent de faire un compromis et non de chercher un optimum, ce qui n'aurait aucun sens dans la mesure où les critères peuvent être de forme très variées (Ben Mena, 2000).

Cette synthèse bibliographique ne se veut aucunement exhaustive. Elle reprend les méthodes d'analyse multicritère les plus répandues dans la littérature et susceptibles d'être utilisées dans l'outil d'aide à la décision dont fait l'objet ce mémoire. Elle s'inspire du travail de synthèse de la littérature sur ce sujet intitulé « Agriculture et développement durable : Guide pour l'évaluation multicritère » (Lairez et al., 2016) et du rapport d'étude fait lors de la convention ONEMA-INERIS de 2009 intitulé « Panorama des méthodes d'analyse multicritère comme outils d'aide à la décision » (Le Gall, 2009).

#### 1.3.1 Classification des différentes méthodes d'analyse multicritère

On peut distinguer les méthodes d'analyse multicritère en fonction de la méthode d'agrégation :

- Agrégation locale
- Agrégation partielle
- Agrégation complète

(Schärling, 1985; Balzarini et al., 2011).

Une autre classification de ces méthodes a été faite par Bernard Roy (Roy, 1985), qui se base sur le résultat auquel elles conduisent :

- Méthodes alpha : Le résultat est un groupe contenant les meilleures actions, mais il n'y a pas de classement
- Méthodes bêta : Le résultat est constitué d'un ensemble de groupes (un groupe contenant les meilleures actions, un autre contenant les actions un peu moins bonnes, etc)
- Méthodes gamma : Le résultat est un classement des différentes actions

#### 1.3.2 Description des différentes méthodes d'agrégation

##### *Agrégation locale*

Il existe différentes méthodes se basant sur l'agrégation locale. La plus utilisée est la programmation linéaire multicritère (PLM). On peut citer comme exemple d'application de cette méthode les travaux de Jordi et Peddies en 1988 (Jordi et al., 1988) qui ont utilisé cette méthode dans la gestion de réserves d'animaux sauvages en Afrique. Ces méthodes sont intéressantes lorsque le nombre de critère est infini et que leur valeur varie constamment (Ben Mena, 2000). N'étant manifestement pas dans ce cas, ces méthodes ne seront pas détaillées ici.

### *Agrégation partielle*

Les méthodes se basant sur l'agrégation partielle sont très utilisées. La plus connue d'entre elles est ELECTRE (Roy, 1968), mais on peut aussi citer PROMETHEE (Brans et al., 1984) qui est une variante de cette dernière. Ces méthodes font partie de ce qui est communément appelé « l'école française » par opposition aux méthodes d'agrégation complète, dites de « l'école américaine » (Lairez et al., 2016).

Dans les méthodes d'agrégation partielle, on définit l'indice de crédibilité d'une variété par rapport à une autre (Roy, 1991). C'est la base de ces méthodes, on classe les variétés en les comparant entre elles. L'indice de crédibilité est défini à partir de l'indice de concordance globale et l'indice de discordance.

$$d(a, b) = C(a, b) \prod_{j=1}^j \frac{1-D_j(a,b)}{1-C(a,b)}$$

- $d(a,b)$  : Indice de crédibilité
- $C(a,b)$  : Indice de concordance global
- $D_j(a,b)$  : Indice de discordance pour le critère  $j$
- $a$  et  $b$  les deux variétés comparées

L'indice de concordance global est obtenu à partir de la moyenne arithmétique pondérée des indices de concordances pour chaque critère. Ainsi, on a :

$$C(a, b) = \frac{\sum P_j c_j(a, b)}{\sum P_j}$$

- $C(a,b)$  : Indice de concordance global
- $C_j(a,b)$  : Indice de concordance du critère  $j$ , pour les variétés  $a$  et  $b$
- $P_j$  : Poids du critère  $j$

Les indices de concordance et discordance de chaque critère sont compris entre 0 et 1. La détermination de leur valeur se fait à partir de seuils (Figure 15). Au-delà du seuil véto<sup>10</sup>, l'indice de discordance vaut 1 et donc l'indice de crédibilité vaut 0. La variété  $b$  a donc une crédibilité nulle par rapport à la variété  $a$ . Cela signifie que la variété  $b$  est tellement différente de la variété  $a$  sur ce critère que sa crédibilité (pour tous les critères) est nulle. Le seuil de préférence fixe la valeur à partir de laquelle plus la variété  $b$  aura une valeur élevée pour ce critère plus sa concordance sera élevée pour ce critère, donc plus la concordance globale sera élevée et ainsi plus la crédibilité sera élevée. Le cas

---

<sup>10</sup> Le seuil véto est la différence entre la valeur du critère  $a$  et la valeur du critère  $b$  au-delà de laquelle l'indice de discordance vaut 1.

limite se présente quand deux variétés sont exactement identiques sur tous les critères, alors l'indice de crédibilité tend vers l'infini.

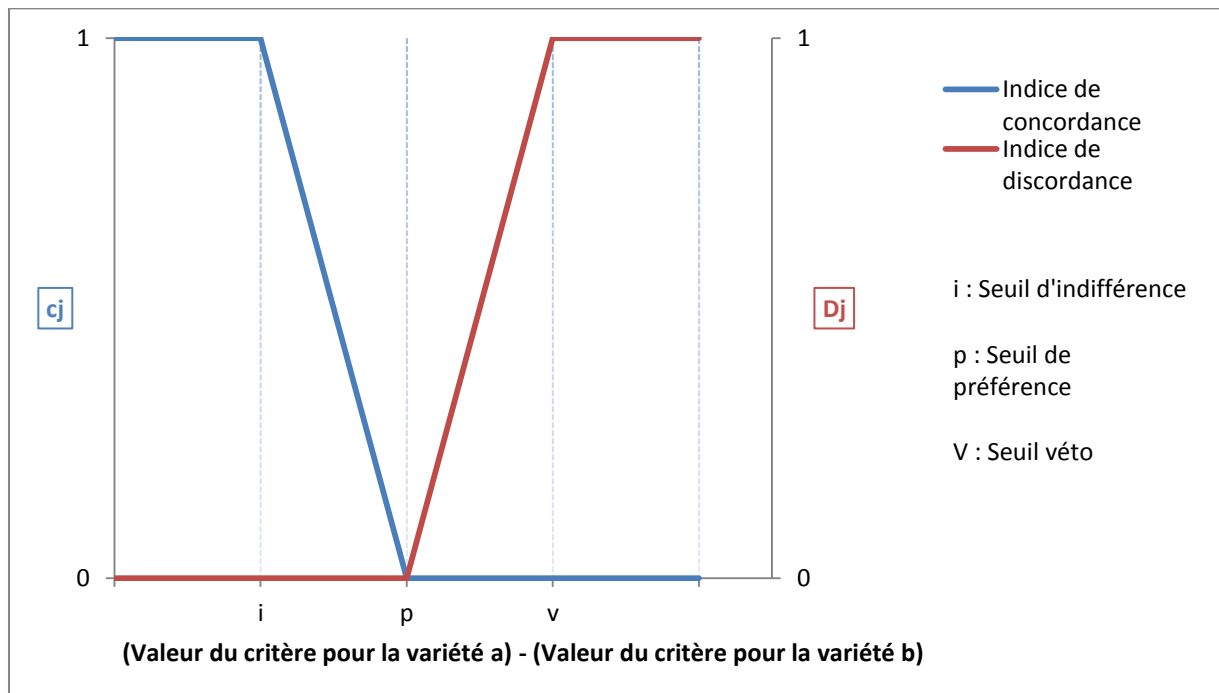


Figure 15: Représentation des seuils permettant de calculer les indices de concordance et discordance pour les variétés a et b

S'ensuit, la mise en place d'un classement par distillations ascendante et descendante successives : c'est le surclassement. Cette méthode repose sur deux conditions : « si l'action a est au moins aussi bonne que l'action b relativement à une majorité de critères (c'est la condition de concordance), sans être trop nettement plus mauvais relativement aux autres critères (c'est la condition de non-discordance) » (Schärlig, 1996).

La description précise de l'obtention de ce classement n'a pas sa place dans ce mémoire. En revanche, il est intéressant de mettre en évidence les points forts et les points faibles des méthodes d'agrégation partielle au regard de la problématique du choix des variétés pour la meunerie.

#### Avantages :

- Cette méthode permet de gérer le problème de l'incommensurabilité des critères due aux formes variées qu'ils peuvent prendre : qualitatif et quantitatif par exemple (Sadok et al., 2008). Cependant, dans les critères identifiés dans la partie précédente (cf. 1.2), aucun n'est qualitatif ;
- Elle permet de classer des critères sur lesquels l'incertitude n'est pas homogène ;
- La détermination des seuils peut se faire rapidement par expertise.

#### Inconvénients :

- Les résultats sont peu clairs ;
- On peut avoir des classements finaux contradictoires dû à la présence de « variétés baladeuses » (variétés ayant peu de puissance). Les classements ascendant et descendant ne sont pas les mêmes (Schärlig, 1996). Cela pose un problème de crédibilité de l'outil. C'est le principal inconvénient de cette méthode ;

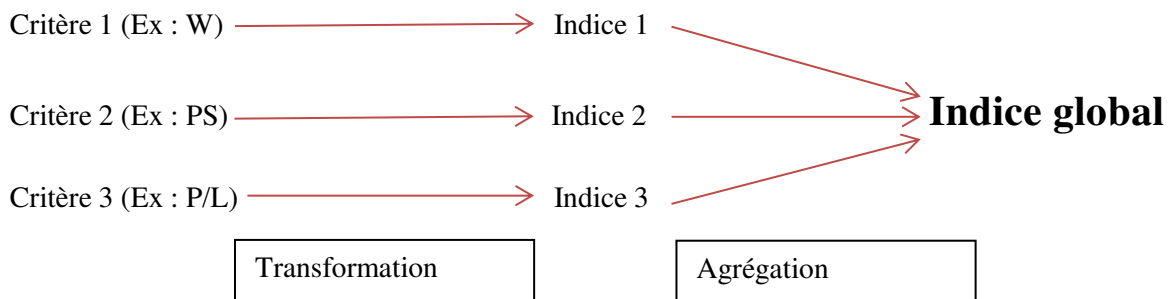


- La méthode n'est pas adaptée si on a une valeur optimale pour un critère (Lairez et al., 2016). Ce qui est souvent le cas pour les critères technologiques ;
- La méthode n'est pas adaptée si la relation entre le critère et son utilité n'est pas linéaire (Lairez et al., 2016).

Cette méthode a été utilisée dans un outil d'aide au choix de variété à destination des agriculteurs développé par ARVALIS – Institut du végétal et fait l'objet de deux mémoires de fin d'études (Streiff, 2014; Richard, 2016).

### *Agrégation complète*

Les méthodes d'agrégation complète consistent à transformer chaque critère en indices que l'on agrège en un indice global pour chaque variété. Les variétés sont ensuite classées en fonction de cet indice global (Figure 16).



**Figure 16: Schéma général de l'agrégation complète**

Il est important d'avoir à l'esprit que la méthode d'agrégation est fonction de la méthode de transformation et inversement. De même, la méthode de pondération est fonction de la méthode d'agrégation et de la méthode de transformation. Ainsi, il existe dans la littérature des méthodes « prêtes à l'emploi » comprenant par exemple une transformation et une agrégation précise comme la méthode MAUT (Multi-Attribut Utility) (Keeney et al., 1976) ou une agrégation et une pondération comme la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) (Saaty, 1980).

Au vu des inconvénients des méthodes d'agrégation partielles, les méthodes d'agrégation complètes ont été retenues pour le développement de l'outil.

### **1.3.3 Présentation des méthodes d'agrégation complète**

#### *Les méthodes de transformation:*

Les méthodes de transformation se séparent en deux grandes catégories : celles permettant d'obtenir un score (scoring), et celles permettant d'obtenir une classe. On peut obtenir un score par critère à partir du classement de la variété pour ce critère. Le score est alors la position de la variété dans ce classement. Mais le classement ne rend pas compte de l'écart entre les variétés ce qui occasionne une perte d'information importante.

Les scores peuvent aussi être obtenus à partir d'une fonction transformant la valeur d'un critère en un score: c'est la transformation en score sur une échelle continue. Le descriptif de ces méthodes ainsi que leur balance avantage/inconvénient sont repris dans l'annexe 6. La transformation en score sur une



échelle continue est la plus appropriée pour l'aide au choix de variété de blé tendre à destination de la meunerie. Deux méthodes de transformation peuvent être utilisées dans l'outil d'aide à la décision. La méthode MAUT et la méthode des indices de désirabilité (Tableau 4).

**Tableau 4: Comparaison des méthodes de transformation sur une échelle continue. Description des méthodes MAUT et indices de désirabilité (Lairez, 2016)**

	<b>MAUT (Multi-Attribute Utility Theory) (Keeney et al., 1976)</b>	<b>Indices de désirabilité</b>
<b>Description</b>	Transformation des valeurs de chaque critère en valeur d'utilité par le biais de fonctions d'utilité. Ces fonctions sont déterminées avec le décideur. Les indicateurs sont ensuite généralement agrégés via une moyenne arithmétique ou géométrique pondérée (Lairez et al., 2016).	Transformation des valeurs de chaque critère en indice de désirabilité par le biais de fonctions de désirabilité. Plusieurs fonctions sont disponibles : maximisation, minimisation, optimisation. La forme de ces fonctions peut être modulée via des coefficients.
<b>Avantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Possibilité d'agréger un grand nombre de critères car ils sont tous ramenés sur une même échelle</li> <li>- Grande liberté dans la forme des fonctions</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Possibilité d'agréger un grand nombre de critères car ils sont tous ramenés sur une même échelle</li> <li>- Facilité de paramétrage de la fonction</li> <li>- Méthode faisant l'objet d'un package (Package Desir) sur le logiciel R.</li> </ul>
<b>Inconvénients</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Forte subjectivité de la détermination des fonctions</li> <li>- Paramétrage des fonctions relativement difficile</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Forte subjectivité de la détermination des fonctions</li> <li>- Moins grand nombre de fonctions disponible que pour la méthode MAUT</li> </ul>

La forte liberté de forme des fonctions dans la méthode MAUT pourrait être un avantage pour d'autres outils. Mais pour les critères de qualité du blé tendre, la maximisation, la minimisation et l'optimisation sont suffisantes. De plus, les indices de désirabilité permettent un paramétrage plus simple, ce qui pourrait faciliter la maintenance de l'outil d'aide au choix de variétés de blé tendre.

#### *Les méthodes d'agrégation complètes:*

Il existe un grand nombre de méthodes permettant d'agréger les scores. Cependant trois d'entre elles semblent pouvoir convenir à l'agrégation des scores des critères de qualité du blé tendre (Tableau 5).

**Tableau 5: Tableau récapitulatif des avantages et inconvénients des différentes méthodes d'agrégation (Lairez, 2016)**

Indices : Classes (satisfaisant, moyen, insatisfaisant), scores [0 ; 1], scores à échelle variable				
	Moyenne arithmétique pondérée des scores	La multiplication de ratios (Weight Product Method) (Schärling, 1985)	Moyenne géométrique pondérée des scores	
Agrégation des critères	<b>Description</b>	Le score final est obtenu par la moyenne arithmétique pondérée des scores	Les valeurs de tous les critères sont divisées par la valeur de l'un d'entre eux et les ratios sont multipliés entre eux	Le score final est obtenu par la moyenne géométrique pondérée des scores
	<b>Avantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Facilité du calcul</li> <li>- Compréhensible</li> <li>- Permet d'agréger beaucoup de critères</li> </ul>	Il est possible d'avoir des gammes de valeurs différentes pour chaque critère	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permet d'agréger beaucoup de critères</li> <li>- Les valeurs les plus basses sont accentuées et donc on évite les variétés qui ont un défaut unique mais important</li> <li>- Les fortes valeurs ne modifient pas la moyenne (plus les valeurs sont proches de 1 moins elles modifient la moyenne)</li> </ul>
	<b>Inconvénients</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Masque les mauvais résultats sur certains critères</li> <li>- Ne rend pas compte des interactions entre critères</li> </ul>	Les actions qui ont une très mauvaise note sont très fortement pénalisées	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Problème des valeurs nulles : si un score est égale à 0 alors toute la moyenne est égale à 0</li> </ul>

Score unique pour chaque variété

**Les méthodes de pondération:**

Dans le choix d'une variété, les critères technologiques recherchés peuvent avoir une importance variable en fonction du débouché (pain courant, viennoiseries, biscuiterie, etc). La pondération permet donc de refléter la différence d'importance des critères dans le calcul du score final. Le Tableau 6 reprend les descriptions des méthodes de pondération trouvées dans la littérature.

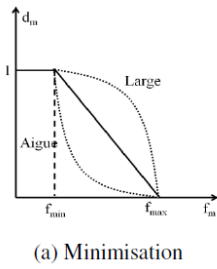
**Tableau 6: description et liste des avantages et des inconvénients des différentes méthodes de pondération**

Méthodes de pondération des scores					
Nom de la méthode	Méthodes AHP (Analytic Hierarchy Process)	Intégrale de Choquet	OWA (Ordered Weighted Averaging)	SMART	Définition de pourcentage
<b>Description de la méthode d'agrégation</b>	Mise en place d'une matrice de comparaison dans laquelle figure l'importance des critères les uns par rapport aux autres. On détermine les poids des critères par calcul des valeurs propres de la matrice. Cette pondération intervient alors dans une moyenne arithmétique pondérée ou géométrique pondérée (Saaty, 1980)	Généralisation de la méthode OWA. Il y a la possibilité d'avoir des groupes de critères qui représentent l'interaction entre certains critères (Grabisch et al., 2000; Kojadinovic, 2006; Rolland, 2012)	Le poids dépend du classement des critères. Le moins bon score a le plus fort poids (Lairez et al., 2016)	Attribution d'un nombre de point à chaque critères, normalisation, puis calcul d'une moyenne arithmétique pondérée (Shepetukha et al., 2001)	Pour chaque critère il est demandé au décideur le pourcentage d'importance du critère
<b>Avantages</b>	- La définition de la pondération est rigoureuse et non subjective  - Peut être très intéressante si on manque de données  (Semassou, 2011; Robin, 2014)	- Moins dépendante des valeurs extrêmes  - La pondération est définie de manière objective	- Cette méthode permet d'éviter au maximum les grosses lacunes que peut avoir une variété sur un caractère  - La pondération est définie de manière objective	- Ce n'est pas forcément un pourcentage qui est demandé mais une note d'importance qui est normalisée par la suite	- Facilité de mettre en place la méthode dans un outil d'aide à la décision
<b>Inconvénients</b>	- Difficulté de mise en place de la matrice de comparaison	Une variété qui a une lacune qui à priori n'est pas préjudiciable, peut être fortement pénalisée	Une variété qui a une lacune qui à priori n'est pas préjudiciable, peut être fortement pénalisée	La pondération est fortement liée à la subjectivité du décideur	- La pondération est fortement liée à la subjectivité du décideur

### 1.3.4 Les indices de désirabilité

C'est une méthode de transformation des critères en score (scoring) sur une échelle continue d'intervalle [0;1]. Chaque critère est transformé en un indice de désirabilité (sur une échelle de 0 à 1) à l'aide d'une fonction de désirabilité. Il existe plusieurs fonctions de désirabilité, on trouve ainsi les fonctions de type Derringer et Suich (Figure 17, Figure 18, Figure 19), Harrington (Figure 20, Figure 21), Castillo ou encore Ch'ng. Les fonctions de type Castillo et Ch'ng permettent de régler les problèmes de discontinuité des fonctions via l'utilisation de polynômes. Certaines applications mathématiques peuvent nécessiter cette précaution, mais cela n'est pas justifié dans le cadre du développement de l'outil d'aide au choix des variétés de blé tendre.

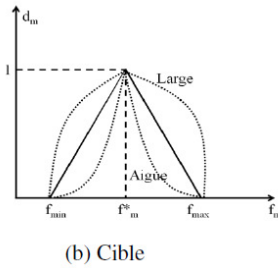
➤ Fonctions de désirabilité de type Derringer et Suich (Semassou, 2011)



$$d_m(f_m) = \begin{cases} 1 & \text{si } f_m \leq f_{\min} \\ \left[ \frac{(f_{\max} - f_m)}{(f_{\max} - f_{\min})} \right]^R & \text{si } f_{\min} \leq f_m \leq f_{\max} \\ 0 & \text{si } f_m \geq f_{\max} \end{cases}$$

Figure 17: Fonction de minimisation de Derringer et Suich

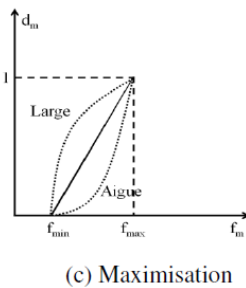
La fonction de minimisation permet d'avoir une désirabilité égale à 1 pour toutes les valeurs inférieures à  $f_{\min}$  et une désirabilité égale à 0 pour toutes valeurs supérieures à  $f_{\max}$ .



$$d_m(f_m) = \begin{cases} 0 & \text{si } f_m \leq f_{\min} \\ \left[ \frac{(f_m - f_{\min})(f_m^* - f_{\min})}{(f_m^* - f_{\min})^2} \right]^R & \text{si } f_{\min} \leq f_m \leq f_m^* \\ \left[ \frac{(f_{\max} - f_m)(f_{\max} - f_m^*)}{(f_{\max} - f_m^*)^2} \right]^R & \text{si } f_m^* \leq f_m \leq f_{\max} \\ 0 & \text{si } f_m \geq f_{\max} \end{cases}$$

Figure 18: Fonction valeur cible de Derringer et Suich

La fonction d'optimisation permet d'avoir une désirabilité de 1 pour une valeur cible et une désirabilité égale à 0 pour toutes valeurs supérieures à  $f_{\max}$  ou inférieures à  $f_{\min}$ .



$$d_m(f_m) = \begin{cases} 0 & \text{si } f_m \leq f_{\min} \\ \left[ \frac{(f_m - f_{\min})}{(f_{\max} - f_{\min})} \right]^R & \text{si } f_{\min} \leq f_m \leq f_{\max} \\ 1 & \text{si } f_m \geq f_{\max} \end{cases}$$

Figure 19: Fonction de maximisation de Derringer et Suich

La fonction de maximisation permet d'avoir une désirabilité égale à 1 pour toutes valeurs supérieure à  $f_{\max}$ . Et une désirabilité égale à 0 pour toutes valeurs inférieures à  $f_{\min}$ .

Le facteur R permet d'ajuster la pente de la courbe de manière à ce que la fonction corresponde au mieux aux attentes des utilisateurs (meuniers). Si  $R < 1$ , alors la courbe est « large » comme représenté sur les Figure 17, Figure 18, Figure 19. Si  $R > 1$ , alors la courbe est « aigüe ».

➤ Fonction de désirabilité de type Harrington:

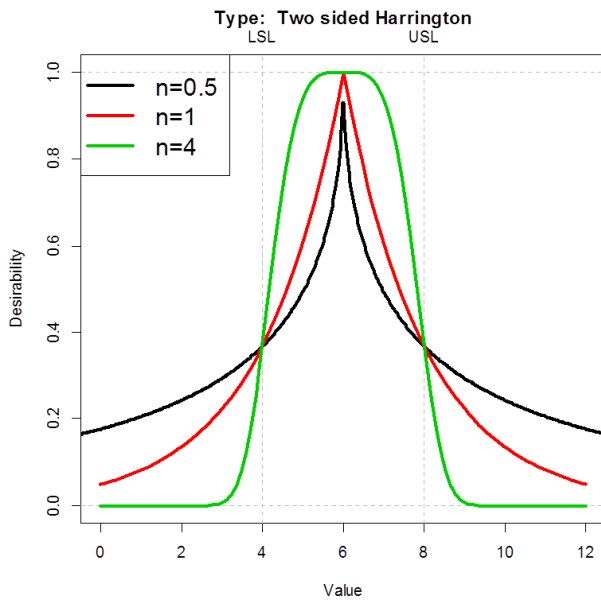


Figure 20: Fonction de type two sided Harrington (Source: ARVALIS – Institut du végétal)

$$d = e^{-|Z|^n}$$

Avec

$$Z = \frac{2.Y - (U + L)}{U - L}$$

n= paramètre d'importance de la déviation  
 USL= grande valeur de Y pour laquelle on connaît la désirabilité  $d_u$   
 LSL = petite valeur de Y pour laquelle on connaît la désirabilité  $d_l$

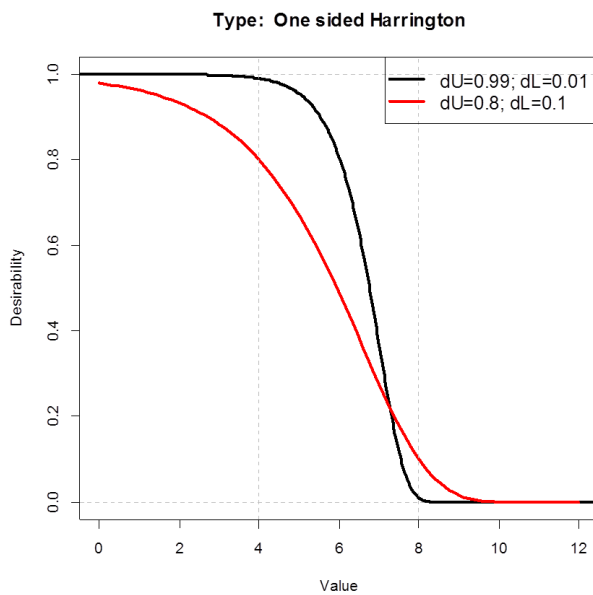


Figure 21: Fonction de type one sided Harrington (Source : ARVALIS – Institut du végétal)

$$d = e(-e^{-Z})$$

Avec

$$Z = \frac{Y - L}{U - L} * (Z_u - Z_l) + Z_l$$

Et

$$Z_u = -\ln(-\ln(d_u))$$

$$Z_l = -\ln(-\ln(d_l))$$

L'avantage de la méthode Harrington two sided (Figure 20) est qu'elle permet d'obtenir un palier (la désirabilité vaut 1 sur une gamme plus ou moins large de valeur du critère). Ce palier peut être intéressant lorsque les valeurs des critères ont une forte marge d'erreur. Ces marges d'erreurs sont souvent directement dues à l'appareil de mesure. Cette méthode permet aussi de faire varier « d » quand la valeur du critère est inférieure à LSL ou supérieure à USL. Elle permet enfin d'éviter d'obtenir une désirabilité de 0, qui entraîne l'annulation de la moyenne géométrique. Ce n'est pas un avantage dans notre cas, car on souhaite utiliser la désirabilité nulle comme un filtre. C'est-à-dire éliminer toutes les variétés ayant une désirabilité nulle pour un critère rédhibitoire. La fonction Harrington one sided (Figure 21) permet d'obtenir un point d'inflexion facilement. Cette fonction pourra donc être utilisée si la désirabilité d'un critère peut être formalisée par ce type de fonction.

En revanche la fonction de type Derringer et Suich a l'avantage d'offrir la possibilité de créer une fonction asymétrique.

### 1.3.5 Applications des méthodes d'analyse multicritères en agriculture

L'outil MASC 2.0 (multi-attribute assessment of the sustainability of cropping systems) est un outil d'évaluation multicritère permettant d'estimer la contribution des systèmes de culture au développement durable (Craheix et al., 2012). Il fait appel au logiciel DEXi. Ce logiciel permet de construire des arbres de décision dans lesquels à chaque nœud une règle de décision de type « si ... alors » est définie (Trdin et al., 2017).

L'analyse multicritère a été utilisée pour prévoir l'adaptation des cultures de maïs et de pommes de terre au Mexique (Ceballos-Silva et al., 2003). Dans ce cas, les données de base sont des données spatiales issues du GIS (Geographic information system). Une autre étude s'inspirant de celle-ci a d'ailleurs permis d'évaluer la durabilité de la culture de blé dans une région d'Inde (Sarkar et al., 2013). Dans cette étude, la méthode de goal programming est utilisée.

En agriculture, l'analyse multicritère est utilisée essentiellement dans l'analyse de la durabilité des exploitations ou des productions. Pour le choix de variété, les outils proposés se résument à un filtre (cf. 2.3).

### 1.3.6 Choix de la méthode

Le choix de la méthode est un compromis entre la qualité des résultats que l'outil fournira, le coût matériel (logiciels de développement) et humain (temps de travail du stagiaire et des ingénieurs qui diffuseront le logiciel aux utilisateurs) et la facilité d'utilisation de l'outil par l'utilisateur.

Les critères que l'outil devra traiter sont principalement quantitatifs et les valeurs recherchées pour ces critères sont souvent des valeurs cibles. Au vu des avantages et des inconvénients de chaque méthode, le scoring sera donc celle retenue pour la mise en place de l'outil.

La complexité de la méthode MAUT n'est pas justifiée pour atteindre les objectifs de l'outil, c'est donc la transformation en indice de désirabilité qui sera utilisée. De plus, le logiciel R est très utilisé à ARVALIS – Institut du végétal, et cette méthode fait l'objet d'un package (Desire) sur ce logiciel.

La pondération retenue est celle des pourcentages malgré le problème de subjectivité dans la détermination des pondérations. La méthode AHP serait théoriquement la plus adaptée. Mais, dans le cas ici présent, les coefficients de pondérations doivent être définis pour chaque débouché, voir pour chaque décideur et doivent répondre aux évolutions des besoins dans le temps. Dès lors, la méthode AHP semble trop lourde pour ce genre d'application.

Enfin, la forme de l'outil devra être judicieusement choisie. En effet, de nombreuses études en psychologie expérimentale et en théorie du comportement, ont montré que la manière de présenter le problème influe énormément sur les réponses du décideur (Mousseau, 1992). La méthode de pondération retenue étant fortement liée à la subjectivité du décideur, cet aspect devra faire l'objet d'une attention particulière (cf. 3.4).

# Contexte de l'étude

---

## 2.1 Présentation de l'entreprise

Créé par les agriculteurs et les filières qui le financent, ARVALIS – Institut du végétal est un organisme de recherche appliquée agricole dédié aux grandes cultures. Sa mission est de fournir à l'ensemble de la filière agricole des références et son expertise pour permettre l'émergence de systèmes de production conciliant compétitivité économique, adaptation aux marchés et environnement.

Le conseil d'administration d'ARVALIS – Institut du végétal est en grande partie composé d'agriculteurs. Le pouvoir public y est également représenté. L'institut est majoritairement financé par les interprofessions et les conventions filières (Cotisation Volontaire Obligatoire), mais également par la recherche publique et par la vente de services (formations, essais pour tiers, expertises, etc.).

L'activité d'ARVALIS - Institut du végétal concerne les filières céréales à paille (blé tendre, blé dur, orges, triticale, seigle, avoine, riz...), maïs (grain, fourrage, semences, doux), sorgho, pommes de terre, fourrages, lin fibre et tabac. De plus, le champ d'action de l'institut couvre les différentes étapes de la filière : des techniques de production jusqu'aux débouchés en passant par la récolte et le stockage.

Ce mémoire de fin d'études a été réalisé au sein du Service Qualité et Valorisation (SQV) et plus précisément dans le Pôle Qualités Technologiques et Sanitaires des Céréales (PQTSC). Les objectifs majeurs de ce pôle sont :

- Être acteur et pourvoyeur d'informations auprès des décideurs en matière de législation
- Avoir une bonne connaissance de l'occurrence des contaminants et de la valeur d'utilisation de nos productions
- Identifier les différents moyens de maîtrise des risques sanitaires et technologiques du champ au silo
- Proposer des outils de gestion des risques du champ au silo
- Communiquer très largement auprès des filières
- Contribuer à la promotion des céréales françaises sur les marchés d'exportation

L'outil d'aide au choix de variété de blé tendre s'intègre parfaitement aux objectifs du PQTSC et plus largement à ceux de l'institut. En effet, il permet de transmettre l'expertise et les connaissances acquises sur la qualité technologique des variétés de blé tendres aux différents membres de la filière et plus particulièrement aux meuniers via un outil interactif.

## 2.2 Problématique et objectifs du stage

La problématique générale de ce mémoire est de développer un outil d'aide au choix des variétés de blé tendre principalement destiné à la meunerie française et interactif.

Pour répondre à la problématique, les étapes suivantes sont nécessaires :

- Analyser la concurrence
- Identifier les attentes des meuniers : *Quelles fonctionnalités les intéressent ?*
- Identifier les critères variétaux impliqués dans le choix de la variété : *Quels sont les critères auxquels les meuniers veulent avoir accès pour faire leur choix ?*

- Identifier les débouchés distincts : *Quels débouchés nécessitent des qualités de farine distinctes ?*
- Identifier les critères impliqués dans le choix de la variété pour chacun de ces débouchés : *Sur quels critères se base le choix d'une variété par le meunier pour un débouché ?*
- Sélectionner les critères variétaux à prendre en compte en fonction des bases de données disponibles et des attentes de meuniers : *Parmi les critères identifiés par les meuniers, quels sont ceux pour lesquels ARVALIS – Institut du végétal a des données ?*
- Sélectionner la méthode d'analyse multicritère la plus adaptée, en tenant compte des attentes de l'utilisateur et les caractéristiques des critères
- Sélectionner l'outil informatique le mieux adapté au développement de cette méthode d'analyse
- Mettre en place la « calculette » : prototypage, paramétrage
- Tester les performances de la calculette
- Etablir un cahier de charge à destination des développeurs

Toutes ces étapes ont été réalisées lors de ce stage et une grande partie d'entre elles sont reprises dans ce mémoire. Pour ce faire, une importante recherche bibliographique a été réalisée et un groupe de travail constitué des principaux meuniers français et d'ingénieurs experts d'ARVALIS – Institut du végétal a été formé. Toutefois, en amont, plusieurs étapes ont été réalisées notamment la recherche de financements et l'identification des besoins de la filière. Plus en aval, c'est un travail de marketing et de communication qui sera nécessaire, comme la mise à disposition de l'outil sur internet.

### 2.3 Analyse de la concurrence

Les pays où le blé est fortement cultivé disposent généralement de plaquettes reprenant la plupart des caractéristiques des variétés en place. Pour chaque critère, une valeur ou un indice est mentionné. Ces critères sont cependant essentiellement agronomiques.

En Australie, la qualité du blé tendre est résumée en un seul critère, le *Wheat Quality Australia* (WQA). Cet indice reprend les mêmes critères que la classification du Comité Technique Permanent de la Sélection (CTPS) en France. Il n'existe cependant pas d'outil permettant de classer les variétés.

Aux Etats Unis, le *Winter Wheat Variety Selection Tool* attribue une note à chaque critère (comprise entre 0 et 4) ainsi qu'une pondération en pourcentage, puis réalise un classement. Cet outil a été développé, entre autres, par les universités du Dakota et Bayer CropScience. Il est destiné aux acheteurs de blé tendre. D'après Joel Ransom (Extension agronomist – Cereal crops, Department of plant sciences, North Dakota State University et l'un des principaux acteurs de la création de cet outil), le critère de choix des acheteurs est d'abord le taux de protéine, suivi du poids spécifique. Selon lui, aucun acheteur n'utilise d'autres critères de qualité à l'heure actuelle. Cet outil ne permet pas d'établir des classements sur davantage de critères de qualité.

En Angleterre, la *National Association of British and Irish Flour Millers* (NABIM) propose une segmentation des variétés en quatre groupes: blé pour alimentation animale (groupe 4), blé biscuitier (groupe 3), blé panifiable (groupe 2), blé supérieur (groupe 1). Les critères utilisés pour cette classification sont la teneur en protéines, le temps de chute de Hagberg, et le poids spécifique. En parallèle, l'*Agriculture and Horticulture development Board* (AHDB) propose sur son site internet un outil permettant de filtrer les variétés en fonction de ces quatre groupes, puis d'afficher les



caractéristiques agronomiques pour ces variétés. Mais là encore, il n'existe pas d'outils permettant de classer les variétés sur base des critères de qualité.

En Allemagne, il n'existe aucun outil d'aide à la décision dans ce domaine. Chaque variété possède une « fiche » reprenant ses principales caractéristiques. Celles-ci sont déterminées à partir d'essais menés dans 8 lieux et sur 3 ans. La *Bundesländer* peut réaliser des essais complémentaires qui permettent de déterminer les itinéraires techniques (fertilisation, protection) les mieux adaptés pour chaque variété en fonction des régions.

La meunerie y est fortement contractualisée et le meunier fixe à priori la qualité qu'il désire auprès du cultivateur.

En France, le *Memento* publié par Semences de France et ARVALIS – Institut du végétal, est une brochure annuelle reprenant surtout les caractéristiques agronomiques des variétés. Semences de France, via son outil *SemScope* propose un certain nombre de services comme le filtre du catalogue à partir d'un ou plusieurs critères, ou encore la comparaison de fiches variétales. ARVALIS – Institut du végétal publie chaque année une brochure (*Quoi de neuf en qualité ?*) dans laquelle les critères de qualité de chaque variété inscrite sont repris et comparés à des variétés référentes. Elle s'accompagne de commentaires visant à orienter l'utilisation de ces variétés. Les ventes de cette brochure ne cessent de diminuer et les meuniers, par l'intermédiaire de l'ANMF, ont formulé une demande d'un outil interactif.

En Belgique, le livre Blanc ((Watillon et al., 2016)) communique les résultats d'essai notamment sur 3 critères de qualité : le taux de protéines, l'indice de Zélény et le rapport Zélény/protéines.

Bien que la qualité soit de plus en plus importante pour l'ensemble des débouchés (meunerie, export, amidonnerie), l'aide à la décision n'est pas encore mise en place dans ce secteur de l'agriculture. La majorité des supports de communication sont sous des formats papier peu pratique, d'où la nécessité d'un outil interactif. La France semble être le pays le plus concerné par la qualité du blé et cet outil innovant d'aide à la décision serait d'une grande aide pour le secteur.

## Matériel et méthodes

---

### 3.1 Les objectifs de l'outil d'aide au choix des variétés de blé tendre

Plusieurs objectifs ont été formulés avant la mise en place de l'outil. Celui-ci doit respecter les contraintes suivantes :

- L'outil doit contenir des « cas types » reprenant les différents débouchés du blé tendre en meunerie,
- L'outil étant destiné à un public de professionnel, il doit laisser la possibilité d'être paramétré manuellement,
- L'outil doit être intuitif et permettre une utilisation facile même pour l'utilisateur occasionnel,
- Une attention particulière doit être portée à l'entretien de l'outil : l'ajout ou la suppression de variétés, de critères et de débouchés doit être facilement réalisable,
- Le langage et les logiciels utilisés devront correspondre aux pratiques de l'institut de manière à faciliter l'entretien de l'outil.

L'évaluation de la qualité de l'outil se fera à la fois sur les résultats fournis et sur sa capacité à remplir les objectifs cités ci-dessus. L'analyse des sorties de l'outil se fera grâce à une analyse statistique et à de l'expertise. La comparaison entre les variétés recommandées par la meunerie française (liste déterminée par expertise) et les résultats donnés par l'outil pourra être faite. L'évaluation des objectifs cités ci-dessus se fera par un comité interne à ARVALIS – Institut du végétal.

### 3.2 Matériel

La méthode des indices de désirabilité ayant été retenue, le logiciel R (R i386 3.3.3) et son package *desire* ont été utilisés pour le calcul des indices. L'interface utilisée est Excel 2010. Ces deux logiciels ont l'avantage d'être très utilisés dans l'Institut et largement diffusés dans le milieu agricole. Le transfert de données de Excel vers R et inversement se fait via le package *xlsx*, nécessitant les packages *xlsxjars* et *rJava*. Ces packages sont relativement stables mais l'une des étapes à réaliser lors de l'entretien annuel de l'outil sera de vérifier s'il y a eu des mises à jours sur ces packages et si elles conduisent à un ajustement des scripts.

### 3.3 Paramétrage

#### 3.3.1 Paramétrage des fonctions de désirabilité

Pour faciliter l'utilisation du logiciel, seul les fonctions *derringerSuich* sont utilisées. Elles ne laissent pas la possibilité de réaliser toutes les formes de fonction possible mais permettent d'avoir un outil plus transparent et compréhensible. Selon le paramétrage, ces fonctions peuvent être d'optimisation, de maximisation ou de minimisation. Ces paramétrages sont déterminés par expertise à partir des témoignages recueillis auprès des meuniers (cf. 4.1). Cependant, le choix du maximum, minimum et optimum peut être modifié à partir de l'interface Excel. Ceci laisse une grande liberté à l'utilisateur et permet de couvrir l'ensemble des cas de figures auxquels les meuniers peuvent être confrontés.

Le lancement du script R correspondant au paramétrage Excel se fait via un exécutable développé sur Visual Basic (VB.net).

### 3.3.2 Base de données

La qualité des résultats fournis par l'outil va dépendre du paramétrage de celui-ci mais aussi des données de base à partir desquelles il va calculer les indices de désirabilité. La caractérisation des variétés est réalisée par différents acteurs de la filière : obtenteurs, meuniers, industries de seconde transformation, coopératives agricoles, ANMF, ARVALIS – Institut du végétal, et autres. En revanche, la caractérisation variétale à l'inscription et en post-inscription est réalisée par le GEVES (Groupe d'Etude et de contrôle des Variétés Et des Semences) pour le CTPS, par ARVALIS - Institut du végétal et par l'ANMF.

Avant 2014, seules les données issues des essais menés par ARVALIS - Institut du végétal permettaient la mise en place de la base de données de l'institut.

Depuis 2014, une convention lie le GEVES, ARVALIS – Institut du végétal ainsi que l'ANMF. De ce fait, pour la caractérisation agronomique des variétés en post-Inscription, ARVALIS dispose de ses propres essais et a accès aux résultats obtenus par le GEVES dans le cadre des réseaux CTPS 1 et 2 pour l'inscription. Pour la caractérisation de la qualité technologique en post-inscription, ARVALIS et l'ANMF peuvent valoriser les données acquises dans le cadre du réseau CTPS 1 et analyser les échantillons issus du réseau CTPS2. Cela permet une continuité entre l'inscription et la post-inscription.

Il est à noter que le nombre d'échantillons, de lieux et d'années peut différer en fonction des critères (agronomiques et technologiques) et des variétés. Certains critères agronomiques comme le taux de protéines ou le PS sont très étudiés et comptabilisent un nombre de lieux et d'années d'essai plus élevé.

Pour l'évaluation agronomique un dispositif expérimental est mis en place afin de faire varier l'environnement et ainsi isoler la détermination génétique des différents critères. Le phénotype (la valeur des critères) est déterminé par le génotype, l'environnement et les interactions entre le génotype et l'environnement. Afin d'estimer le potentiel génétique des variétés il est important de mettre en place un dispositif expérimental permettant de déterminer la part du phénotype qui est expliquée par le génotype. Il faut pour cela déduire les effets environnementaux et les interactions génotype-environnement. Ces dernières sont difficiles à estimer. L'importance des interactions génotype-environnement est fonction du génotype, de l'environnement, et du critère que l'on observe. Ainsi, dans cette base de données le dispositif expérimental mis en place a permis de déduire uniquement l'effet environnemental.

Pour cela, chaque variété a été cultivée dans des environnements différents (région différente mais même itinéraire technique), et dans chacun de ces environnements des variétés témoins ont été cultivées. Ces variétés témoins ont permis de quantifier l'effet environnement. Par exemple, on a pu déterminer que l'environnement n°1 a tendance à augmenter le rendement de 5 q/ha alors que l'environnement n°2 a tendance à le diminuer de 1q/ha (Tableau 7). Puis la valeur des variétés pour chaque critère a été calculée à partir de moyennes ajustées. Cela consiste à faire une moyenne arithmétique (pour chaque variété) des valeurs de chaque critère dans les différents environnements où elles ont été cultivées mais en retirant l'effet environnement pour chacun de ces critères (1). Ces moyennes ajustées permettent d'atténuer l'effet environnemental et ainsi déterminer la valeur du critère si seule la génétique le détermine. Mais l'effet dû à l'interaction entre le génotype et l'environnement est négligé.

**Tableau 7 : Illustration de la soustraction de l'effet environnemental dans le calcul du rendement d'une variété**

Type d'environnement	Rendement mesuré de la variété testée	Effet environnemental déterminé à partir de variétés témoins	Rendement ajusté de la variété testée
Environnement n°1	80 q/ha	+ 5 q/ha	75 q/ha
Environnement n°2	70 q/ha	- 1 q/ha	71 q/ha
Environnement n°3	75 q/ha	+ 2 q/ha	73 q/ha

$$\text{Rendement} = \frac{75+71+73}{3} = 73 \text{ q/ha} \quad (1)$$

Pour l'évaluation de la qualité technologique, le traitement statistique est moins rigoureux. Si la variété est inscrite en zone Nord alors la détermination des critères de qualité se fera par le calcul de la moyenne arithmétique des valeurs des critères des 13 lieux d'essai (soit 2 années d'essai) (cf. 1.1.2) de la zone Nord. Il en est de même pour les variétés en zone Sud qui sont évaluées à partir de 13 lieux en zone Sud. L'effet environnement n'est donc pas soustrait lors des calculs des valeurs moyennes. Ainsi les valeurs des critères de qualité dans l'outil ne sont pas uniquement due au génotype. Il faut aussi ajouter l'effet laboratoire. Mais la mise en place du calcul de moyennes ajustées est en cours et les futures bases de données intégrées dans l'outil devraient être moins dépendantes de l'effet environnement.

La base de données contient donc des critères n'ayant pas :

- La même détermination génétique
- Les mêmes dispositifs expérimentaux permettant de déterminer leur valeur (nombre de lieu, d'années, etc.)
- Les mêmes traitements statistiques (moyennes ajustées ou non)

Sur les 423 variétés du catalogue CTPS, 206 sont reprises dans la base de données. La détermination des classes technologiques via le test de panification de type pain courant français (NF V03-716) n'est réalisée que depuis 2008, c'est pourquoi toutes les variétés inscrites avant 2009 ne sont pas présentes dans la base de données de l'outil (hormis quelques variétés encore très cultivées malgré une inscription antérieure à 2009).

### 3.3.3 Pondération

De même que pour le paramétrage, des cas-types ont dû être conçus pour faciliter l'utilisation de l'outil. Le public cible étant formé de professionnels qui aiment avoir la possibilité de pondérer les critères, une pondération personnalisée est disponible.

Le nombre de critères à pondérer pose problème. En effet, si l'on souhaite pondérer tous les critères, il faut pondérer les premiers en conséquence, de manière à ne pas avoir une somme des pondérations qui excède cent pour cent. Une solution à ce problème serait de limiter le nombre de critères pondérables. Cependant cela diminuerait le potentiel de l'outil, ce qui n'est pas souhaitable.

Par ailleurs, l'ordre dans lequel ces critères vont être pondérés peut influencer sur la pondération. Intuitivement, on peut imaginer que le décideur aura davantage tendance à pondérer les critères qui lui sont proposés en premier. Le poids attribué aux derniers critères serait moindre par rapport à celui attribué aux premiers et cela serait uniquement dû à l'ordre de proposition de ceux-ci. De même, le décideur devra pondérer les derniers critères en fonction de la somme des pondérations qu'il a déjà attribué aux autres critères, de manière à ce que celle-ci ne dépasse pas les cent pour cent. Plusieurs psychologues ont travaillé sur des notions qui rappellent ce phénomène. Solomon Asch et Norman

Henry Anderson ont travaillé sur l'effet de primauté. Asch a montré que lorsque l'on décrit une personne par plusieurs traits de personnalité, l'impression générale que l'on se fait de cette personne dépend davantage des premiers traits qui nous ont été présentés que des derniers (Asch, 1946). Plus tard, Anderson a formalisé cet effet de primauté avec une approche algébrique. Selon lui, les traits sont indépendants et l'effet de primauté est uniquement dû à une baisse de l'attention du décideur (Anderson, 1974).

Pour éviter ce biais, après avoir sélectionné les critères que l'on souhaite pondérer, l'outil nous propose de pondérer chacun de ces critères dans un ordre aléatoire.

La pondération proposée est un pourcentage. Comme la somme des pourcentages vaut 1, la puissance de la racine de la moyenne géométrique vaut 1. Cela revient à ne pas calculer la racine.

Pour les indices de désirabilité des critères ayant une pondération nulle, l'exposant est égal à 0, donc peu importe la valeur du critère il sera égal à 1 avec la pondération, et n'aura pas d'influence sur le calcul de la moyenne. De manière générale, quand l'exposant tend vers 0, l'indice tend vers 1.

## Résultats

### 4.1 Identification des débouchés et des critères

ARVALIS – Institut du végétal souhaite proposer un paramétrage par défaut de l’outil qui correspond au mieux aux exigences des meuniers. Ce paramétrage, déterminé par expertise, est une synthèse globale de ce qu’il se fait dans le débouché meunier. Il ne constitue en rien une vérité générale ou une quelconque norme.

Les farines préparées par les meuniers sont destinées à divers débouchés. Selon l’utilisation finale qui en sera faite, les meuniers s’intéressent à différents pool de critères.

Afin de proposer un outil répondant au mieux aux attentes des utilisateurs, le paramétrage a été réalisé en consultation des meuniers via l’ANMF. Une première étape a consisté à identifier des débouchés impliquant des critères de choix variétal différents et/ou des pondérations différentes de ces critères (Tableau 8). Ainsi, quatorze débouchés ont pu être identifiés.

**Tableau 8 : Quatorze débouchés des blés meuniers identifiés par les meuniers français volontaires (Axiane meunerie, Moulins Soufflet, Minoterie Girardeau, Gers farine, Banette)**

<b>14 débouchés du blé meunier</b>	
Pain de tradition française	Pâte à pizza
Pain courant	Biscottes et toasts
Pâte crue surgelée	Pâte sucrée levée
Pain précuit surgelé	Crêpe
Pâte levée feuilletée	Biscuit sec
Pâte feuilletée	Cake et madeleine (pâtes jaunes)
Pâte pour fond de tarte	Base foisonnante

Pour chacun de ces débouchés, trente critères ont été retenus (Tableau 9).

**Tableau 9 : Trente critères de qualité impliqués dans le choix de variété de blé tendre par le meunier. Critères définis par les meuniers français volontaires (Axiane meunerie, Moulins Soufflet, Minoterie Girardeau, Gers farine, Banette)**

<b>30 critères de qualité pondérables dans l’outil d’aide à la décision</b>	
Test de panification NF V03-716 :	Taux de protéines
- Note totale de panification	PS
- Note de pâte	Dureté
- Note de pain	Alvéographe de Chopin :
- Note de mie	- W
- Hydratation de la pâte au pétrissage	- P/L
- Lissage de la pâte au pétrissage	- G
- Collant de la pâte au pétrissage	- Indice d’élasticité
- Allongement de la pâte au façonnage	Indice de chute de Hagberg de la farine
- Elasticité de la pâte au façonnage	Farinographe :
- Tenue de la pâte à la mise au four	- Stabilité
- Développement des coups de lame	- Affaiblissement
- Volume	- Absorption
- Couleur de la mie	- Temps de développement
Test biscuitier:	Accumulation DON
- Rétractation	Germination sur pied
- Densité	
- Aspect de surface	

Enfin, cinq critères supplémentaires sont consultés par les meuniers lors de leur choix de variété mais ne sont pas directement pris en compte dans l’outil d’aide au choix de variété de blé tendre (Tableau 10).

**Tableau 10 : Cinq critères consultés lors du choix de la variété de blé tendre à destination de la meunerie. Critères définis par les principaux meuniers français (Axiane meunerie, Moulins Soufflet, Minoterie Girardeau, Gers farine, Banette)**

<b>5 critères supplémentaires consultables dans l’outil</b>	
Rendement	Surfaces cultivées
Précocité à épiaison	Valeur meunière
Surfaces multipliées	

Pour chacun des débouchés, la liste des critères pris en compte dans le choix de la variété ainsi que leur pondération ont été définies (information confidentielle). Ces pondérations sont à la base du paramétrage des cas types dans l’outil.

Ce nombre important de critères reflète bien la complexité actuelle du choix de variété.

Cependant les bases de données actuelles ne permettent pas d’avoir suffisamment d’information sur chacun de ces critères, pour toutes les variétés. Dès lors, offrir la possibilité de pondérer des critères pour lesquels il n’existe pas de données pourrait biaiser le résultat. Une attention toute particulière a dû être portée au traitement des données manquantes dans les différentes fonctionnalités de l’outil. De même on peut s’interroger sur la capacité du décideur à formaliser son processus de choix de variété à l’aide d’une pondération sur plus de 30 critères. Enfin, la valeur du classement fourni par l’outil peut être sujette à débat. Si les fonctions de désirabilité de l’outil sont définies de manière grossière (maximisation ou minimisation ou optimisation) et que celui-ci se base sur des pondérations qui diffèrent que très légèrement d’un critère à l’autre, la fiabilité du résultat peut être remise en question. Une analyse de la sensibilité de l’outil à la pondération devra donc être réalisée (cf. 4.3.3). Cependant, un paramétrage par défaut, où chaque pondération est judicieusement déterminée, et chaque fonction de désirabilité rigoureusement défini peut être envisagé sur un nombre aussi important de critère. Une évaluation de la qualité des résultats fournis par l’outil par confrontation avec l’expertise sera donc indispensable (cf. 4.3.2).

## **4.2 Fonction « Je filtre le catalogue »**

Les meuniers consultés (Axiane meunerie, Moulins Soufflet, Minoterie Girardeau, Gers farine, Banette) ont fait part de leur volonté de filtrer le catalogue variétal en fonction de la valeur d’un ou plusieurs critères. Suite à cette demande, une réflexion s’est engagée pour définir la méthode la plus adaptée pour développer cette fonction dans l’outil. Deux méthodes étaient envisageables : via un code VBA de type « If...Else » ou via les fonctions de désirabilité en utilisant les propriétés de la moyenne géométrique. Cette dernière méthode a été retenue pour plusieurs raisons :

- Elle utilise les mêmes structures de scripts R que les autres fonctions donc elle permet un gain de temps de développement et d’entretien,
- Elle permet de montrer le potentiel de la méthode des indices de désirabilité.

Les étapes de la fonction « Je filtre le catalogue » sont les suivantes :

1. Sélection des critères à partir desquels l’utilisateur souhaite filtrer le catalogue (Annexe 8),
2. Encodage des valeurs limites (maximum et minimum) par l’utilisateur pour chaque critère sélectionné (Annexe 9),

3. Excel calcule automatiquement l'optimum à partir de la moyenne arithmétique du maximum et du minimum (Figure 22).

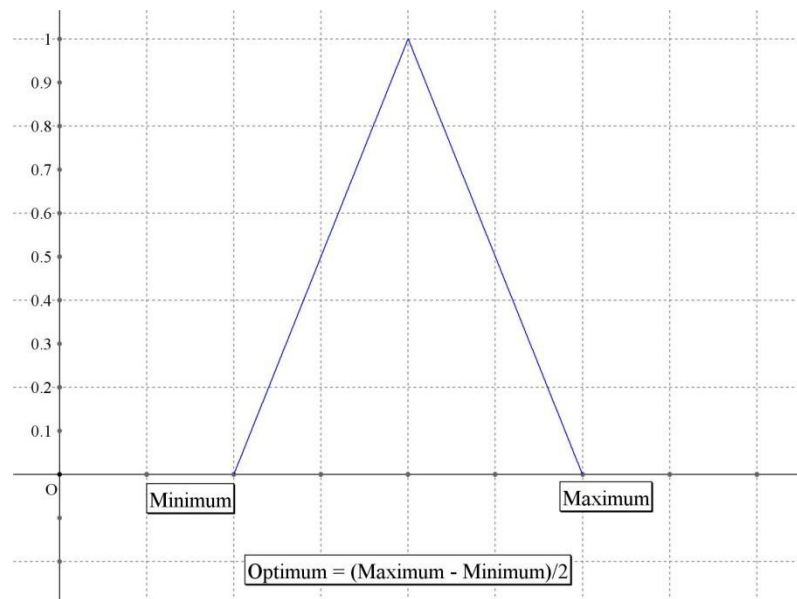


Figure 22 : Fonction *derringerSuich* (Package « *Desir* » du logiciel R) utilisée dans la fonction "Je filtre le catalogue". La valeur du critère est en abscisse et la désirabilité en ordonnée.

Optimum, maximum et minimum permettent de paramétrer la fonction *derringerSuich* (Figure 22) dans le logiciel R qui transforme les valeurs des variétés du catalogue pour les critères sélectionnés en indices de désirabilité. Si une variété a une valeur pour un des critères sélectionnés qui est supérieure (ou égale) au maximum ou inférieure (ou égale) au minimum, alors son indice de désirabilité pour ce critère sera égal à 0. D'après les propriétés de la moyenne géométrique, si une variété a au moins un indice de désirabilité nul pour les critères sélectionnés alors sa moyenne géométrique sera nulle. Dès lors, toutes les variétés qui ont la valeur d'au moins un des critères sélectionnés qui est en dehors des bornes (maximum et minimum) fixées par l'utilisateur auront une moyenne géométrique nulle. Cela revient à dire que les variétés que souhaite filtrer l'utilisateur sont toutes celles ayant une moyenne géométrique nulle. Le résultat de la fonction filtre est alors la liste des variétés ayant une moyenne géométrique non nulle. Cette liste est classée par ordre alphabétique.

#### Gestion des données manquantes :

Si une variété a une valeur manquante sur un des critères sélectionnés pour filtrer le catalogue alors ce critère n'est pas pris en compte dans le calcul de la moyenne géométrique. De cette manière, les variétés pour lesquelles il manque des données ne sont pas pénalisées. Il est cependant important d'informer l'utilisateur qu'il manque des données sur certaines variétés, c'est pourquoi ces variétés sont notées en rouge (Annexe 10).

L'entreprise Semences de France propose une fonction similaire dans son outil SemScope mais le filtre ne peut pas se faire sur autant de critères de qualité.



## 4.3 Fonction « Je cherche la variété la mieux adaptée à mon débouché »

### 4.3.1 Principe général

La fonction « Je cherche la variété la mieux adaptée à mon débouché » constitue le principal objectif de ce mémoire : développer un outil d'aide au choix de variété de blé tendre à destination de la meunerie. Une première étape a été de définir les débouchés et les critères de qualité pris en compte dans le choix de la variété pour chacun de ces débouchés (cf. 4.1). Cette fonctionnalité de l'outil se base sur quatre étapes :

1. Choix du débouché parmi les 14 identifiés (Annexe 11)
2. Définition du paramétrage des fonctions de désirabilité (encodage du maximum, minimum et optimum des fonctions de désirabilité des 31 critères de qualité)
3. Pondération des critères de qualité
4. Lancement du calcul

Les fonctions de désirabilité sont toutes de type Derringer & Suich pour faciliter l'utilisation de l'OAD (cf. 3.2).

#### Le choix du débouché :

Le choix se fait en cochant une « CheckBox » à partir d'une boîte de dialogue de type UserForm. Les 14 débouchés identifiés sont proposés dans cette boîte de dialogue (Annexe 11). En fonction du débouché choisi, un paramétrage par défaut est automatiquement chargé. Ce paramétrage peut être modifié par la suite. Le chargement automatique du paramétrage par défaut permet d'obtenir un classement pour un débouché en seulement 3 « clics ». C'est un avantage considérable qui répond à l'objectif « *L'outil doit être intuitif et permettre une utilisation facile même pour l'utilisateur occasionnel* ». Le paramétrage par défaut répond quant à lui à l'objectif « *L'outil doit contenir des cas types* » reprenant les différents débouchés du blé tendre en meunerie ».

#### Paramétrage des fonctions de désirabilité :

Une fois le débouché sélectionné, une interface offre la possibilité de consulter et/ou modifier le paramétrage des fonctions de désirabilité et la pondération. Cette interface permet aussi de modifier le débouché (Figure 23).

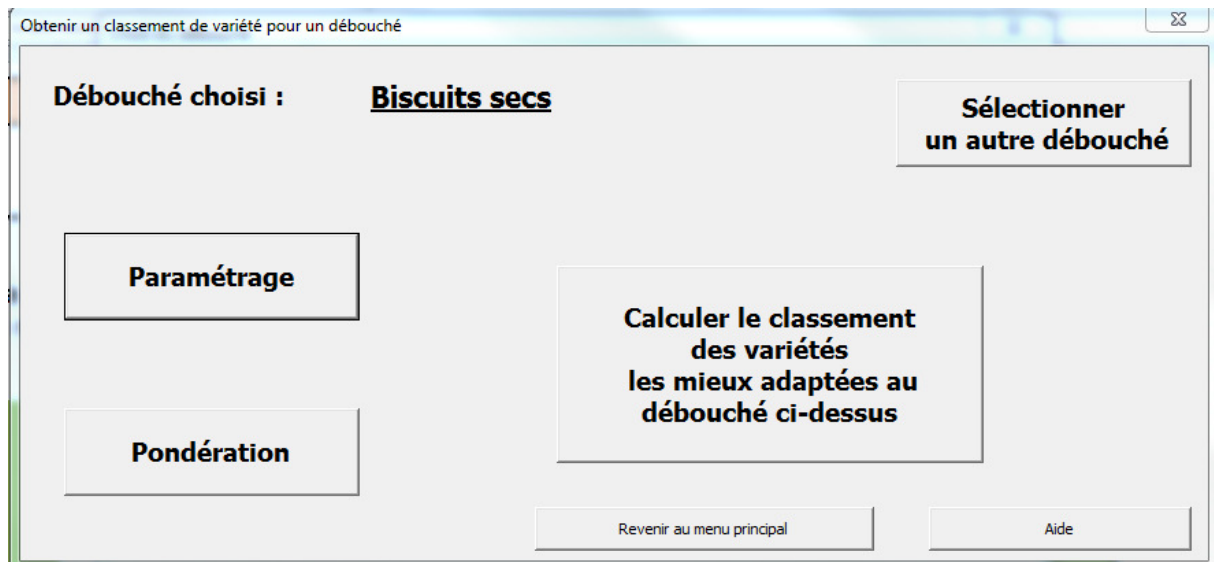


Figure 23 : Interface de la fonction "Je cherche la variété la mieux adaptée à mon débouché". Le bouton « Paramétrage » permet de consulter et/ou modifier le paramétrage des fonctions de désirabilité. Le bouton « Pondération » permet de consulter et/ou modifier la pondération. Le bouton « Sélectionner un autre débouché » permet de modifier le débouché sélectionné précédemment. Le bouton « Aide » permet d'afficher un texte expliquant le rôle de chaque boutons. Le bouton « Calculer le classement des variétés les mieux adaptées au débouché ci-dessus » permet de lancer le calcul.

Le paramétrage des fonctions consiste à fixer les maxima, minima et optimums de chacune des fonctions de désirabilité correspondant à chacun des critères de qualité. Ce paramétrage est réalisé par défaut. L'outil contient ainsi 434 fonctions de désirabilité (14 débouchés qui contiennent chacun 31 critères). Mais ce paramétrage peut être consulté et modifié par l'utilisateur, ce qui implique que l'utilisateur maîtrise le formalisme des fonctions de désirabilité. C'est la condition nécessaire au bon fonctionnement de l'outil. Cette condition peut être remplie car le public cible est un public de professionnels (meuniers français). Cependant, il doit être au préalable correctement informé du fonctionnement de l'outil. Plusieurs actions ont été mises en place à cet effet :

1. Certains meuniers sont impliqués dans le paramétrage de l'outil. Ils ont donc assisté à une rencontre où l'outil et son fonctionnement leur ont été présentés,
2. Une feuille « Information » est présente dans l'outil. Elle contient une présentation générale de l'outil ainsi qu'une aide au paramétrage de celui-ci,
3. Une commande « Aide » donne accès à une animation GIF qui facilite la compréhension du paramétrage des fonctions de désirabilité (Figure 24).

La modification du paramétrage se fait simplement en cliquant sur la « TextBox » correspondante puis en encodant la valeur souhaitée (Figure 24).

Pain Courant	Taux de protéines	PS	Indice de Zeleny	Dureté	W	PL
Minimum						
Maximum						
Optimum						
G	IE	Indice de chute de Hagberg	IHP	Ilote de pâte	Ilote de pain	Ilote de mie
1			220			
3			inf			
2			250			
Hydratation de la pâte au pétrissage	Lissage de la pâte au pétrissage	Collant de la pâte au pétrissage	Allongement de la pâte au façonnage	Elasticité de la pâte au façonnage	Tenue de la pâte à la mise au four	Développement des coups de lame
	1	1	1	1	1	1
	19	19	19	19	19	19
	10	10	10	10	10	10
Volume	Couleur de la mie	Rétraction au test biscuitier (cm)	Densité au test biscuitier (g/cm3)	Aspect de surface au test biscuitier	Accumulation DON	Germination sur pied
	1					
	19					
	10					
Stabilité au farinographe	Affaiblissement au farinographe	Temps de développement au farinographe	Absorption au farinographe			

Figure 24 : Boite de dialogue permettant le paramétrage personnalisé (données effacées par soucis de confidentialité)

Dans la Figure 24, deux exemples de paramétrages sont visibles (données fournies à titre d'exemple). Le paramétrage des critères liés au test de panification sont des fonctions d'optimisation (Figure 25) avec 10 comme valeur optimale. Cette fonction formalise le désir des meuniers d'avoir la note optimale sur ces critères (cf. 1.2.6). Dans l'exemple (Figure 25) l'allongement de la pâte au façonnage optimal est de 10.

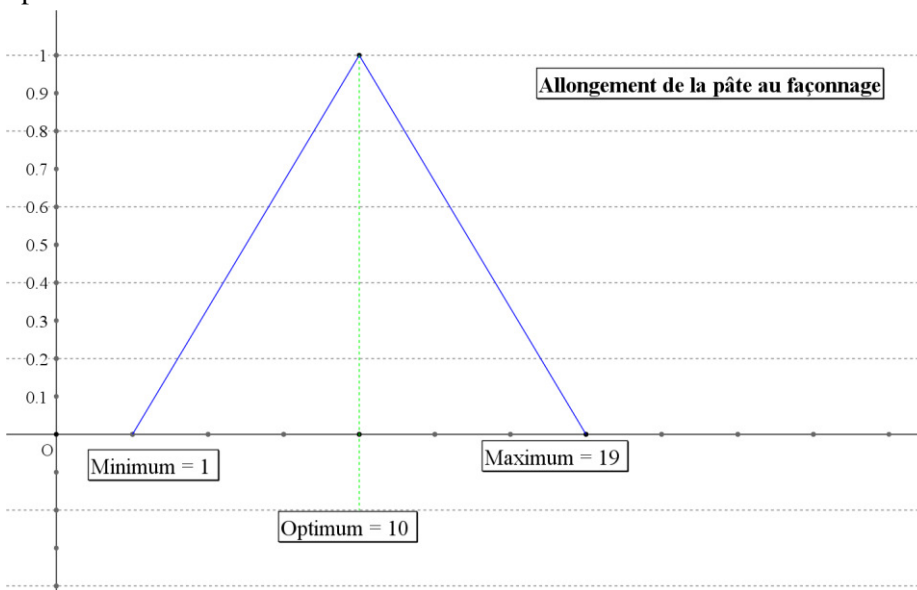


Figure 25 : Fonction d'optimisation définie pour le critère "Allongement de la pâte au façonnage" pour le débouché "Pain courant"

La fonction de la NTP (note totale de panification) est une fonction Derringer & Suich de type maximisation (Figure 26). En égalant le maximum à l'infini (Inf), la pente de la fonction au-delà de 250 est nulle.

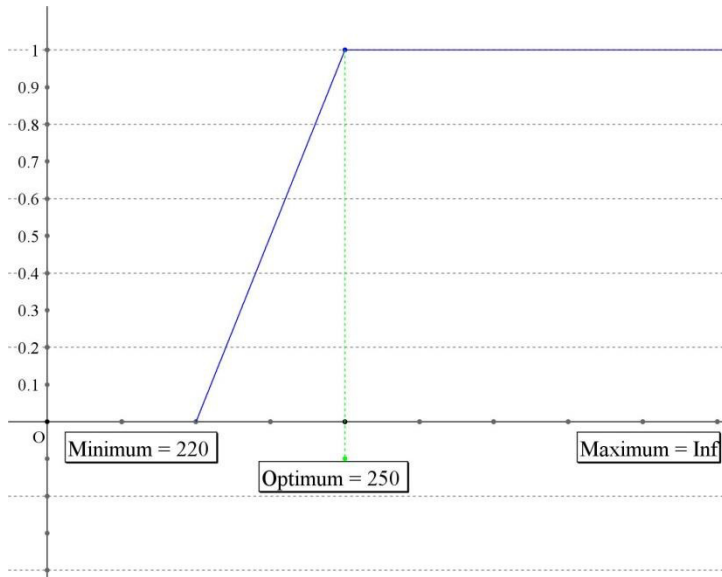


Figure 26 : Fonction de maximisation définie pour le critère "NTP" pour le débouché "Pain courant"

La pondération des fonctions de désirabilité :

Une pondération par défaut est chargée automatiquement lors du choix du débouché. Cette pondération a été définie grâce à l'expertise des meuniers faisant partie du groupe de travail (cf. 4.1). L'utilisateur a néanmoins la possibilité de modifier cette pondération en suivant ces étapes :

1. Sélection des critères qu'il souhaite pondérer (Figure 27)
2. Pondération des critères proposés dans un ordre aléatoire (Figure 28)
3. Visualisation de la pondération sur un diagramme circulaire puis validation si celle-ci lui convient (Figure 29)

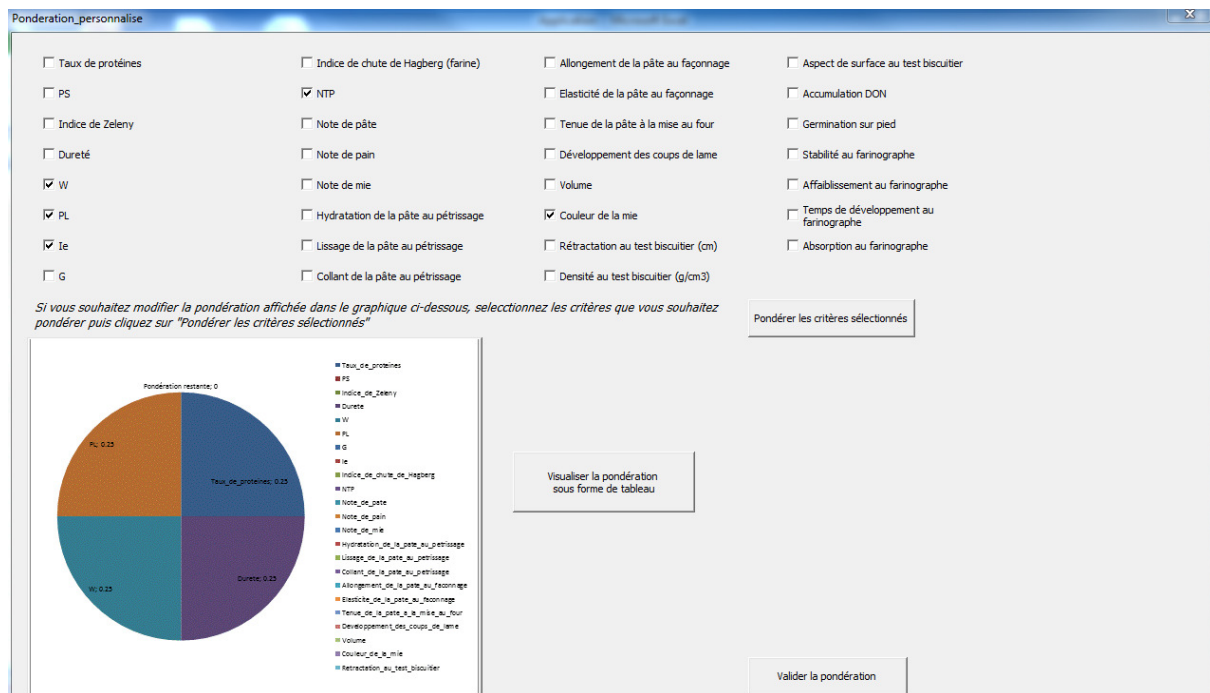


Figure 27 : Boite de dialogue permettant à l'utilisateur de visualiser la pondération par défaut et de modifier le paramétrage s'il le souhaite. Dans cet exemple, la pondération par défaut est la suivante : 25% PL, 25% Taux de protéines, 25% Dureté, 25% W. L'utilisateur a choisi d'autres critères à pondérer : W, PL, Ie, NTP, couleur de la mie

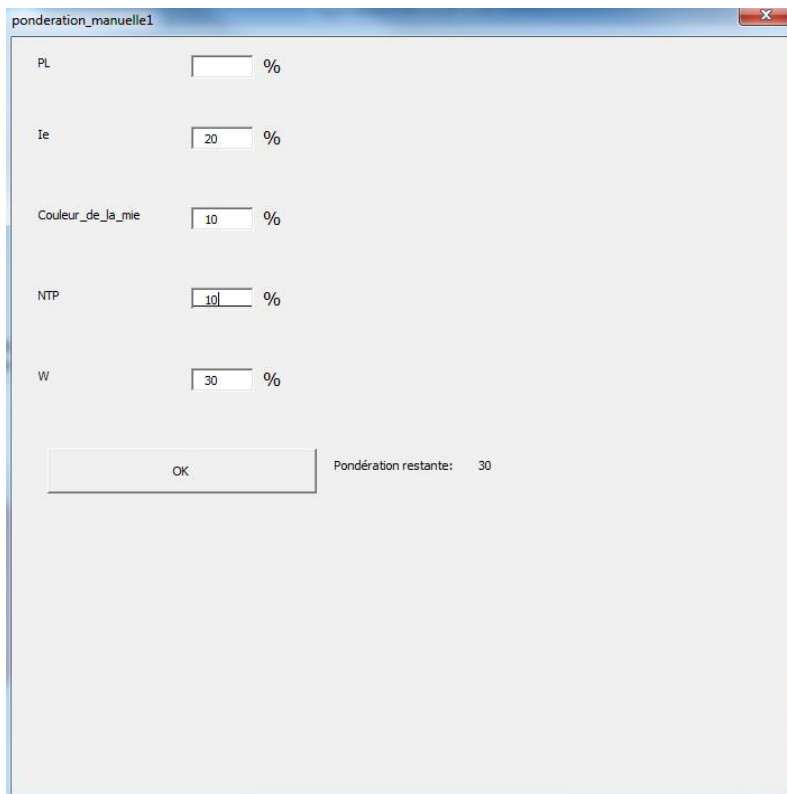


Figure 28 : Boite de dialogue permettant à l'utilisateur d'encoder la pondération qu'il souhaite. Les critères sélectionnés dans la boite de dialogue précédente (figure 27) sont proposés à l'utilisateur dans un ordre aléatoire. Ici, l'utilisateur a déjà pondéré 4 des 5 critères qu'il a sélectionnés. L'outil lui indique qu'il reste 30% de pondération à attribuer.

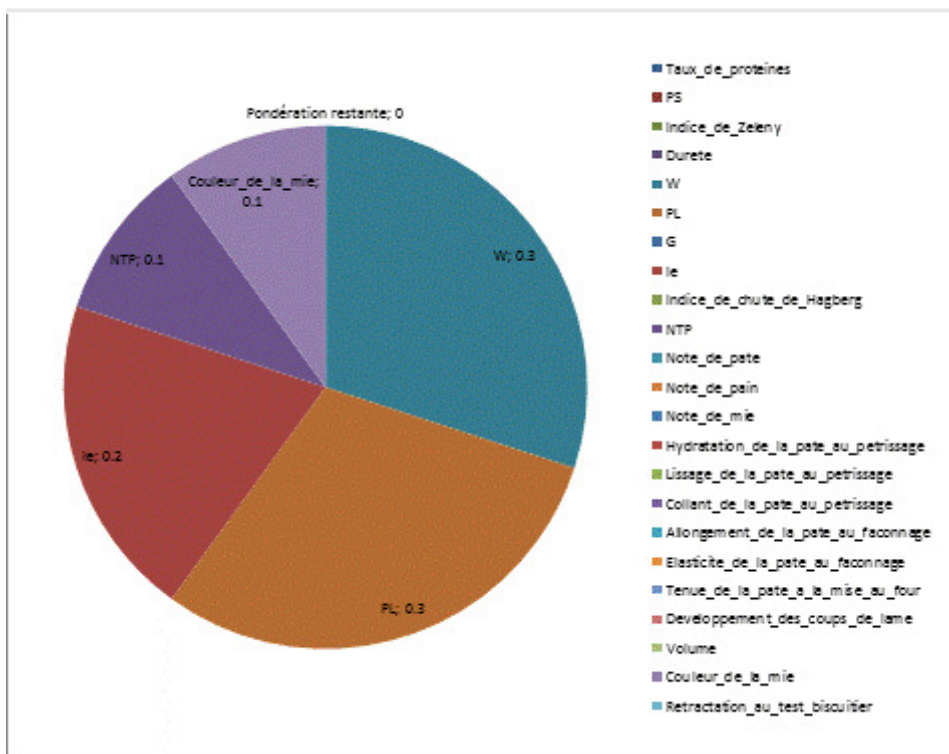


Figure 29 : Diagramme circulaire permettant de visualiser la pondération que l'utilisateur vient de réaliser. Les 5 critères sélectionnés dans la Figure 27 ont tous été pondérés.

Les critères sélectionnés sont proposés dans un ordre aléatoire pour éviter les biais liés à l'ordre de proposition des critères (cf. 3.4).

La somme des pondérations s'actualise en temps réel pour éviter à l'utilisateur de faire le calcul lui-même. Si la somme des pondérations n'est pas égale à 100, un message d'erreur le prévient lorsqu'il tente de valider la pondération. Il peut alors recommencer la pondération ou forcer la validation. Il est important que l'utilisateur puisse forcer la validation. Par exemple, s'il souhaite pondérer trois critères et leur attribuer la même pondération (33%), la somme des pondérations ne fera pas 100%. Cependant, le logiciel fournira un résultat cohérent (car il n'y aura qu'un pour cent qui ne sera pas attribué). Dès lors, il ne serait pas justifié de contraindre l'utilisateur à pondérer les critères sélectionnés de manière à ce que la somme des pondérations soit égale à 100%.

#### Lancement du calcul :

Une fois le débouché choisi, le paramétrage et la pondération définie, l'utilisateur lance le calcul à partir d'un bouton de commande. Les valeurs des 31 critères de qualité de toutes les variétés de la base de données sont transformées en indice de désirabilité à partir des fonctions de désirabilités définies pour chaque critère de qualité. Les indices sont pondérés puis agrégés. L'utilisateur peut choisir de filtrer ou non les variétés pour lesquelles au moins un des critères pondérés est en dehors des minima et maxima fixés dans le paramétrage. Pour cela, la question lui est posée et s'il répond « oui », l'outil utilise la moyenne géométrique pour agréger les critères, s'il répond « non », l'outil utilise la moyenne arithmétique.

Les variétés sont ensuite classées en fonction de leur moyenne globale. Le classement est fourni avec la valeur des critères de chaque variété. Pour le Taux de protéines, le PS, le W et le P/L un code couleur est donné en plus des valeurs. Ce code couleur est celui utilisé dans toutes les communications ARVALIS – Institut du végétal, et facilite la compréhension (Tableau 11).

**Tableau 11 : Code couleur appliqué au Taux de protéines<sup>11</sup>, PS, W et P/L**

PS et Taux de protéines	1	2	3	4	5	6	7
W		100	120-130	130-150	150-170	170-190	>190
P/L			>2	2-1.60	1.6-1.20	1.2-0.8	<0.8

#### Gestion des données manquantes :

Plusieurs cas de figure liés aux données manquantes peuvent être rencontrés. Il peut manquer une valeur pour un critère, donc dans ce cas l'indice de désirabilité pour ce critère sera manquant. La moyenne géométrique est alors calculée sans cette valeur, de manière à ne pas avantager ou désavantager les variétés pour lesquelles il manque des données. L'utilisateur est averti via un code couleur : nom de la variété écrit en rouge.

L'autre cas de figure est que l'utilisateur peut, lors de la pondération manuelle, choisir de ne pas avoir une somme des pondérations égale à 100%. Ceci n'a aucun effet sur le classement par définition des fonctions  $x^{1/n}$  qui sont croissantes entre 0 et  $+\infty$ .

### **4.3.2 Comparaison entre les classements obtenus et l'expertise**

Chaque année l'ANMF publie des listes de variétés qu'elle recommande (VRM) pour les blés panifiables, les blés de forces, les blés biscuitiers et les blés biologiques. Ces listes sont déterminées

<sup>11</sup> Comme dans tous les supports de communication d'ARVALIS – Institut du végétal le taux de protéines est exprimé en indice compris entre 1 et 9

avec l'expertise des meuniers français. En parallèle, des listes de « *Blé pour la meunerie française* » sont publiées et regroupent les VRM ainsi que des variétés utilisables en mélange par la meunerie. Enfin, une liste de variétés en observation (VO) regroupe les variétés inscrites au cours de l'année et susceptibles d'intégrer la liste VRM l'année suivante. La qualité des sorties de l'outil peut être évaluée en regard de ces listes.

Par ailleurs, le *Memento 2017* publié par ARVALIS – Institut du végétal et Semences de France, reprend les variétés les plus cultivées en France. Les variétés présentes dans la base de données de l'outil mais absentes dans le *Memento 2017* sont des variétés peu cultivées en France.

### *Débouché biscuit sec*

La liste des blés biscuitiers pour la meunerie française présents dans la base de données est reprise ci-dessous.

AMBITION	BELEPI	PALEDOR	VISCOUNT
ARKEOS	GALLIXE	RONCARD	
BAGOU	LEAR	SCIPION	

**Tableau 12 : Classement de sortie de l'outil pour le débouché "Biscuit sec". Les blés biscuitiers pour la meunerie française sont notés en vert. Les variétés recommandées par la meunerie française pour le débouché biscuitier sont notées avec un astérisque. Les variétés grisées ne sont pas reprises dans le *Memento 2017*.**

Classement	Nom de la variété	Moyenne géométrique
1	BAGOU*	0,90
2	AMBITION	0,88
3	VISCOUNT	0,83
4	SYEPSON	0,77
5	ARKEOS*	0,76
6	SCIPION	0,76

Parmi les 6 variétés sorties par l'outil (Tableau 12), cinq variétés figurent sur la liste BPMF de l'ANMF dont 2 sont recommandées par la meunerie (VRM). Certaines variétés présentes sur les listes de l'ANMF n'apparaissent pas dans les sorties de l'outil pour le débouché « Biscuit sec ». C'est le cas de GALLIXE, LEAR et PALEDOR qui ont été filtrées du fait de leur note « protéines » jugée trop élevée pour le débouché biscuitier. La variété RONSARD a quant à elle été filtrée car son P/L moyen est trop élevé pour ce débouché. La variété BELEPI est filtrée du fait de sa trop forte hydratation (57,5). Seule SYEPSON est présente dans la sortie de l'outil malgré qu'elle ne soit pas identifiée comme biscuitière par la meunerie française. Ses caractéristiques sont tout à fait compatibles avec un débouché biscuitier mais la faible valeur des surfaces cultivées de cette variété laisse penser que cette variété ne doit pas être agronomiquement intéressante.

### *Débouché pain courant*

En 2017, l'ANMF a identifié 74 variétés<sup>12</sup> de blé pour la meunerie française (BPMF) et 37 VRM dans la catégorie « blés panifiables ». Par ailleurs, 8 variétés inscrites en 2017 sont en observation. Cependant la base de données de l'outil ne reprend pas toutes ces variétés. On compte 58

<sup>12</sup> Parmi les 74 variétés BPMF on retrouve 34 VRM. Il y a donc trois VRM qui ne font pas parties des BPMF



BPMF (dont 30 VRM) et 7 VO dans la base de données de l’outil d’aide au choix de variétés de blé tendre. La qualité de la sortie de l’outil pour ce débouché peut donc être évaluée sur sa capacité à sortir prioritairement ces 65 variétés (les 58 BPMF et les 7 VO). Nous appellerons ces 65 variétés : Variétés identifiées par la meunerie française.

Pour le débouché « Pain courant » l’outil sort 141 variétés sur les 206 de la base de données (Annexe 12). Seules 4 variétés sur les 65 identifiées par la meunerie française sont filtrées : COMPIL, IONESCO, LAURIER et PAKITO. Elles sont filtrées du fait de leur note d’accumulation DON (note de 3 pour COMPIL, IONESCO et LAURIER) et de germination sur pied (note de 2 pour PAKITO). L’outil sort donc 94% (61 sur 65) des variétés identifiées par la meunerie.

Par ailleurs, il est possible d’analyser la qualité de la sortie de l’outil en se concentrant sur les 100 premières variétés sorties. On compte 53 variétés identifiées par la meunerie parmi les 100 premières variétés du classement (Tableau 13). De plus, seulement 7 variétés ne sont pas classées comme BPS ou BP par ARVALIS – Institut du végétal parmi celles-ci.

**Tableau 13 : Pourcentage de variétés identifiées par la meunerie (VRMp + BPMFp + VOp) parmi les 205 variétés de la base de données, parmi les 141 variétés sorties par l’outil pour le débouché *pain courant*, parmi les 100 premières variétés sorties par l’outil pour le débouché *pain courant***

<b>Variétés parmi les 100 premières sorties de l’outil</b>	<b>Pourcentage</b>	<b>Nombre de variété</b>
Variétés identifiées par la meunerie parmi les 205 variétés de la base de données	31 %	65
Variétés identifiées par la meunerie parmi les 141 variétés sorties par l’outil	43 %	61
Variétés identifiées par la meunerie parmi les 100 premières variétés sorties par l’outil	53 %	53

Les variétés sorties par l’outil mais absentes du Memento sont des variétés qui ont de bonnes caractéristiques technologiques mais qui sont peu cultivées, certainement à cause de leurs mauvaises caractéristiques agronomiques (rendement, résistance aux maladies, etc.). Lorsqu’on retire les variétés de la base donnée qui ne sont pas présentes dans le Memento, les pourcentages du Tableau 13 augmentent significativement. Ceci est dû au fait que les variétés recommandées par la meunerie sont jugées à la fois sur leurs caractéristiques technologiques mais aussi sur leurs caractéristiques agronomiques.

L’analyse de la qualité des résultats fournis pour les autres débouchés comme les pâtes feuilletés n’a pas été faite car les sorties de l’outil s’orientent principalement vers des BAF et ce type de variété est mal caractérisé à l’heure actuelle.

### **Conclusion sur l’analyse de la sensibilité des résultats**

L’objectif, a été d’évaluer la capacité de l’outil à formaliser l’expertise des meuniers. Celle-ci est actuellement représentée par les variétés identifiées par la meunerie française. Mais il pourrait aussi



être intéressant d'évaluer la capacité de l'outil à formaliser l'expertise de chacun des meuniers avec un paramétrage propre à chacun de ceux-ci.

Les résultats sont encourageants mais l'analyse n'a pas pu être mise en place sur tous les débouchés car il n'existe pas d'expertise à l'échelle nationale sur ces autres débouchés. Là encore, l'analyse pourrait se faire avec chacun des meuniers.

Enfin, l'outil a pu mettre en évidence certaines contradictions chez les meuniers. Effet, malgré qu'ils soient tous catégoriques sur les limites du taux d'accumulation DON et de la sensibilité à la germination sur pied, certaines variétés sont identifiées par la meunerie malgré leurs mauvais résultats dans cette catégorie.

#### 4.3.3 Evaluation de la sensibilité de l'outil

Pour mesurer l'effet d'un paramètre (la pondération ou le type de moyenne), il est nécessaire de définir au préalable sur quelle variable on souhaite mesurer son effet. L'idéal serait de mesurer si la modification de ce paramètre change de manière significative le choix de l'utilisateur. Pour cela, il faudrait définir un panel d'utilisateurs qui ferait son choix variétal à partir des classements obtenus en faisant varier le paramètre en question. Puis on évaluerait en quoi la modification du paramètre a modifié le choix variétal de l'utilisateur. Malheureusement, cela serait trop difficile car il faudrait définir un panel de professionnels, ayant la même expertise. De plus, une part de subjectivité difficilement mesurable causerait des biais.

Cependant, le choix de l'utilisateur se fait à partir de deux variables : la note des variétés et le classement des variétés. Bien que liées, ces deux variables doivent faire l'objet d'une analyse statistique séparée. Une modification du classement peut être due à une très faible modification de la note, et à l'inverse une forte modification de la note peut ne pas entraîner de modification du classement. Il pourrait aussi être intéressant de mettre en place un dispositif expérimental permettant de mesurer l'importance de ces variables dans le choix de l'utilisateur. Mais cela n'a pas pu être mis en place dans ce mémoire. Ici, l'effet de deux paramètres (la pondération et le type de moyenne) sur les variables *rang* et *note* a été mesuré.

Cinq variables seront alors testées :

- Le pourcentage de variétés communes aux deux classements parmi les 50 premières
- Coefficient de corrélation des rangs de Spearman
- Ecart de rang moyen entre les deux classements
- Ecart de note moyenne entre les deux classements
- Coefficient de corrélation des notes de Pearson

##### 4.3.3.1 « Effet pondération »

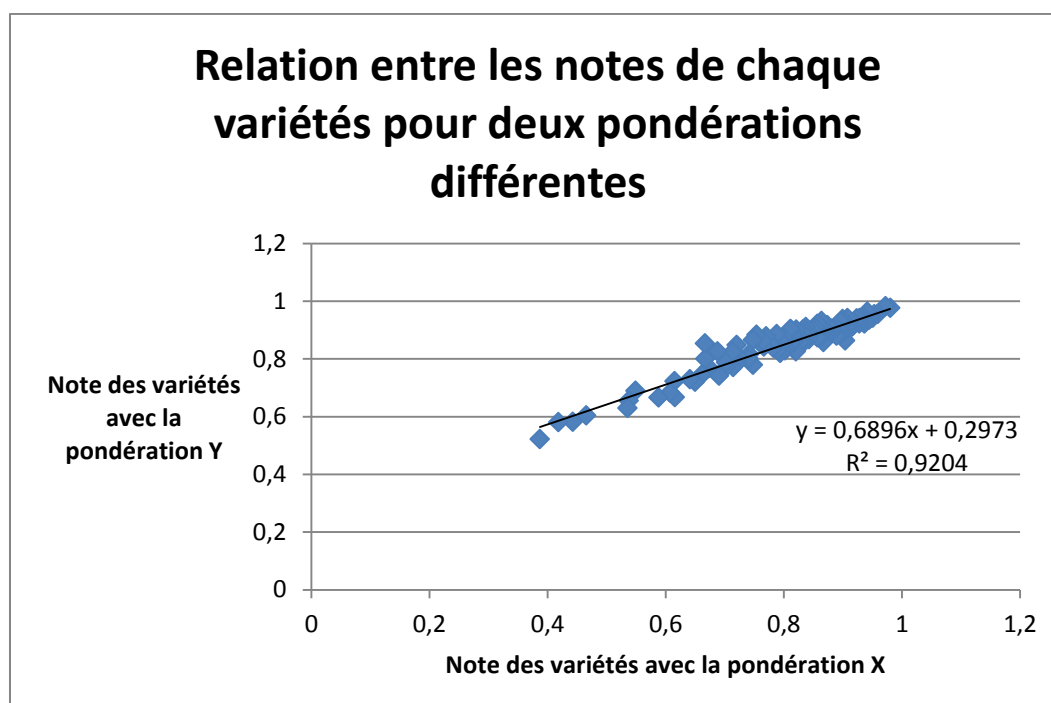
Les meuniers impliqués dans le groupe de travail ayant permis de paramétrer l'outil ont chacun fourni une pondération qui, selon eux, est représentative de leur processus de choix variétal. Ayant un savoir-faire différent, ils ont proposé une pondération qui leur est propre. La quantification de l'effet de la pondération a été faite en comparant les sorties de l'outil avec deux pondérations différentes et pour le débouché « Pain courant ».

**Tableau 14 : Analyse statistique de l'effet de la modification de la pondération sur les classements obtenus**

Pourcentage de variétés communes aux deux classements parmi les 50 premières	82 %
Coefficient de corrélation des rangs de Spearman	$\rho = 0,7587$ (p-value < $2,2 \cdot 10^{-16}$ )
Ecart de rang moyen entre les deux classements	4,9
Ecart de note moyenne entre les deux classements	-0,00432 (écart type = 0,0148)
Coefficient de corrélation des notes de Pearson	$r = 0,9593$ (p-value < $2,2 \cdot 10^{-16}$ )

Au niveau des rangs, 82% des variétés présentes dans les 50 premières places sont communes aux deux classements. Le coefficient de Spearman montre une corrélation des rangs significative.

Pour les notes, le coefficient de Pearson ( $r = 0.9593$ ) montre une bonne corrélation significative (p-value <  $2,2 \cdot 10^{-16}$ ) de celles-ci. En effet, la Figure 30 montre une bonne corrélation linéaire entre les notes des deux classements. De plus, la moyenne des écarts montre que la modification des notes due à la modification de la pondération est très faible (-0.00432).



**Figure 30 : Représentation de la corrélation entre les notes des variétés obtenues avec la pondération X et celles obtenues avec la pondération Y**

#### 4.3.3.2 « Effet moyenne »

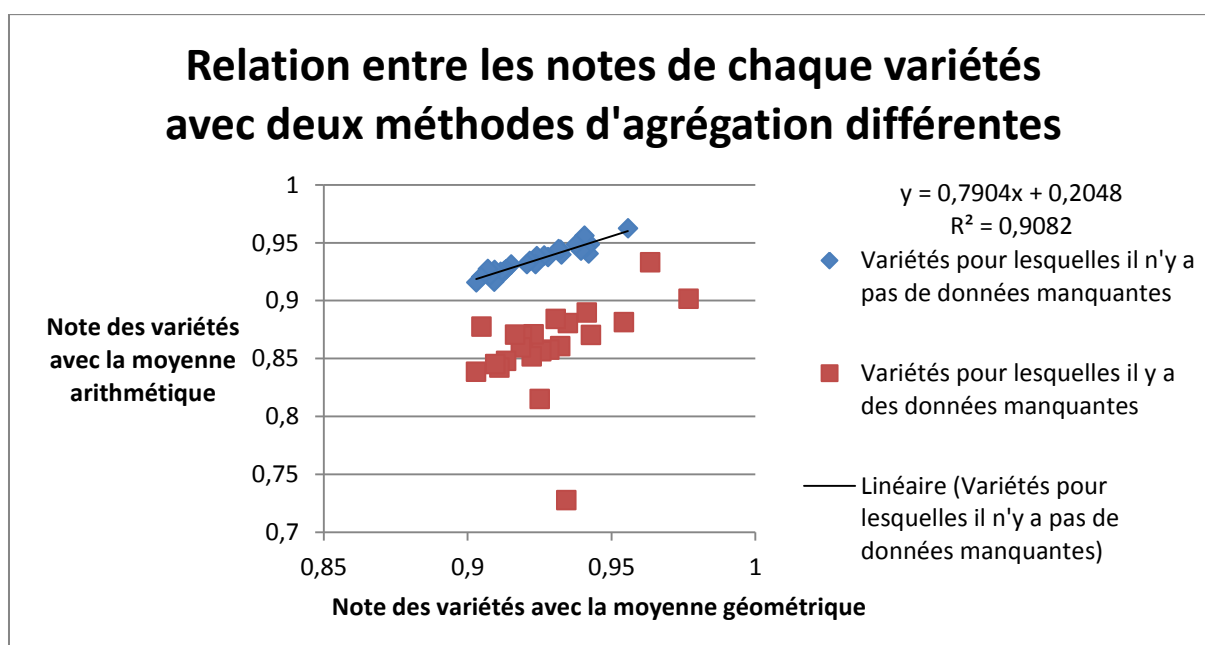
La moyenne géométrique est la moyenne la plus adaptée pour cette fonction de l'outil car elle permet de filtrer les variétés. Il peut cependant être intéressant de regarder en quoi la variation de la méthode d'agrégation modifie la sortie de l'outil. La quantification de l'effet de la méthode d'agrégation a été faite en comparant les sorties de l'outil en utilisant la moyenne géométrique ou la moyenne arithmétique pour le débouché « Pain courant ».

A l'image de l'effet pondération, les 5 mêmes variables ont été testées.

**Tableau 15 : Analyse statistique de l'effet de la modification de la méthode d'agrégation sur les classements obtenus**

Le pourcentage de variétés communes aux deux classements parmi les 50 premières	58 %
Coefficient de corrélation des rangs de Spearman	$\rho = 0,2792$ (p-value = 0,04989)
Ecart de rang moyen entre les deux classements	-28,14
Ecart de note moyenne entre les deux classements	0,04089 (écart type = 0,1252)
Coefficient de corrélation des notes de Pearson	$r = -0,3514$ (p-value = 0,01233)

Les résultats du Tableau 15 montrent tous que la méthode d'agrégation a un impact sur le classement obtenu. Il y a une corrélation mais elle est faible, voire négative pour les notes. L'écart de rang moyen montre lui aussi que les variétés sont fortement déclassées dans la moyenne arithmétique par rapport à la moyenne géométrique. Enfin, presque une variété sur deux est exclue des 50 premières places avec la moyenne géométrique. Cette absence de corrélation est illustrée par la Figure 31.



**Figure 31 : Illustration de l'absence de corrélation linéaire entre les notes obtenues via la moyenne géométrique et celles obtenues via la moyenne arithmétique. Mise en évidence de la dépendance aux données manquantes (marqués en rouge sur le graphique) de la moyenne arithmétique**

L'explication vient des données manquantes. Par construction, chaque note vient pénaliser la moyenne géométrique car on la multiplie par des nombres compris entre 0 et 1. Donc plus il manque de données pour une variété, plus celle-ci est favorisée avec la moyenne géométrique. A l'inverse, la moyenne arithmétique additionne les notes comprises entre 0 et 1, donc plus il manque de notes, plus la variété est pénalisée. C'est d'autant plus vrai si peu de critères sont pondérés ou s'il manque une donnée sur un critère fortement pondéré. Sur les 21 variétés présentes dans les 50 premières places avec la moyenne géométrique mais absentes de ce classement avec la moyenne arithmétique, toutes ont des données manquantes pour au moins un critère pondéré (dans le cas présent c'est le manque de données sur la note de pâte qui a pénalisé les variétés). Là encore la Figure 31 illustre très bien cette dépendance. Les variétés ayant des données manquantes pour au moins un des critères pondérés sont notées en rouge. On voit bien que si elles ne sont pas prises en compte (uniquement les variétés marquées en bleu), la corrélation linéaire entre les deux méthodes d'agrégation est effective.

#### 4.3.3.3 Généralisation de l'analyse de la sensibilité

Une analyse statistique plus complète a pu être faite en prenant en compte les effets d'interaction qu'il peut y avoir entre l'effet moyenne et l'effet pondération. Pour cela un modèle mixte a été utilisé en prenant comme variable la note ou le rang, comme variable fixe la pondération et la moyenne et comme variable aléatoire la variété.

##### Modèle mixte avec la note comme variable :

La sortie R (Annexe 13) montre que la déviation standard (std.dev.) est de 0,16 pour la variable aléatoire (la variété). Ceci veut donc dire que la variété explique jusqu'à 0,315 ( $0,16 \times 1,97$ ) point d'écart dans la note de désirabilité. En revanche, le  $R^2$  est très faible, ce qui signifie que la part des variations de notes expliquées par les variables fixes (pondération et moyenne) est très faible. Ce résultat est rassurant, il démontre que les variations de notes sont essentiellement dues aux variations des caractéristiques des variétés et non à la méthode d'agrégation ou au type de pondération.

Une ANOVA<sup>13</sup> a ensuite été réalisée pour déterminer la part respective de la moyenne, de la pondération et de l'interaction entre ces deux variables fixes dans la variation des notes. Cette analyse montre qu'il y a une interaction entre les deux variables fixes mais aux vues de leur faible importance dans les variations de notes on ne peut pas apporter d'avantages de conclusions.

##### Modèle mixte avec le rang comme variable :

La sortie R (Annexe 14) montre ici une déviation standard de 53,30 pour la variable aléatoire. Ceci veut donc dire que la variété explique jusqu'à 105 ( $53,30 \times 1,97$ ) classes d'écart dans le classement. Dans le cas des rangs, on arrive à mettre en évidence un effet moyenne mais sur une très petite résiduelle (part de la variation de note expliquée par autre chose que la variété). Là encore, le modèle démontre que c'est principalement les variations des caractéristiques des variétés qui expliquent les variations de rang et non les variables fixes.

Comme pour tous les modèles statistiques, des hypothèses sont à vérifier. Trois hypothèses ont dû être vérifiées :

- Homogénéité des variances : la moyenne des résidus doit être nulle (Annexe 15)
- Absence de structuration des résidus : allure gaussienne des résidus (Annexe 16)
- La normalité des effets aléatoires (Annexe 17)

Cette dernière hypothèse n'est pas vérifiée dans le cas des rangs mais après consultation avec les statisticiens, nous tolérons cette anomalie.

## 4.4 Fonction « Je cherche une variété de substitution »

Si le turn-over variétal est un témoin de l'intensité du progrès génétique, il pose en revanche problème pour les industries de transformation de la filière blé tendre. La qualité de la matière première (le blé tendre) varie constamment. Chaque récolte se caractérise par l'apparition de nouvelles variétés. Cependant, le client de la seconde transformation (par exemple le boulanger) demande une farine d'une qualité stable pour ne pas avoir à changer sa recette. Dès lors, quand une variété utilisée par le meunier dans un mélange est en déclin, il lui faut trouver une variété de substitution. La fonction « Recherche d'une variété de substitution » permet de déterminer un pourcentage de ressemblance de

---

<sup>13</sup> ANOVA réalisée avec la méthode de Kenward-Roger pour estimer les degrés de liberté (ddl) car il est difficile de les déterminer après un modèle mixte

chaque variété du catalogue pour une variété référente. Il est simplement demandé à l'utilisateur de choisir la variété référente (Annexe 18) et de sélectionner les critères (Annexe 19) à partir desquels il souhaite que le calcul soit fait et l'outil retourne une liste de variété de la plus ressemblante à la moins ressemblante (Tableau 16 p.55).

Là encore, les indices de désirabilité sont utilisés. Contrairement à la fonction « Je filtre le catalogue variétal » où maximum et minimum étaient renseignés par l'utilisateur et l'optimum calculé par le logiciel Excel, ici c'est l'optimum qui est demandé à l'utilisateur, via la variété référente, et le maximum et le minimum sont calculés par le logiciel R.

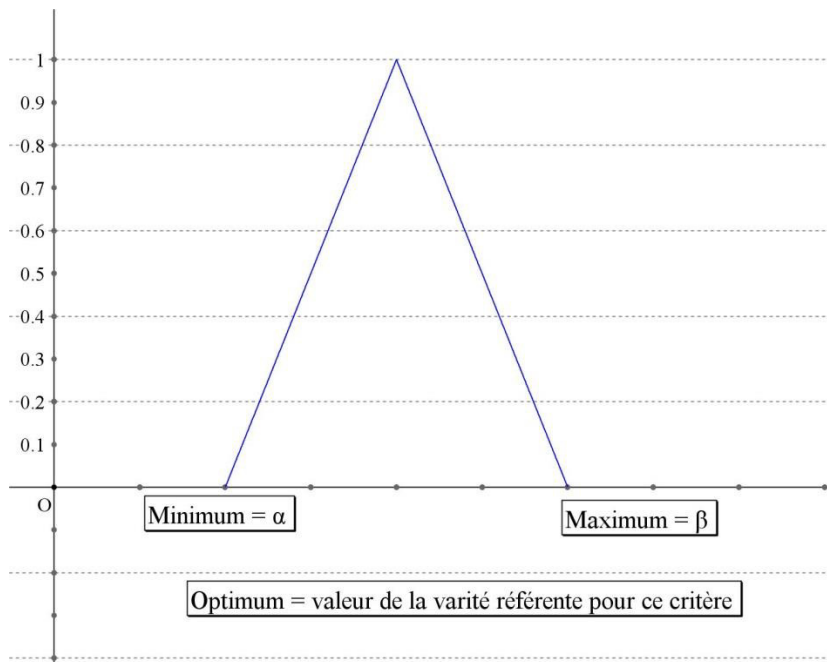


Figure 32 : Fonction Derringer & Suich (Package « *Desir* » du logiciel R) utilisée pour la fonction "Recherche de variété de substitution".

Une fonction Derringer & Suich (Figure 32) est paramétrée pour chaque critère avec comme optimum la valeur de la variété référente choisie. Pour chaque critère, les valeurs  $\alpha$  et  $\beta$  doivent être déterminées de manière à éviter qu'une variété ait sa valeur qui soit en dehors des bornes maximales et minimales.

#### Détermination du minimum et du maximum:

Une première solution serait de fixer la borne maximale comme la valeur de la variété la plus élevée pour ce critère parmi toutes les variétés du catalogue. Puis d'en faire de même avec la valeur la plus faible pour la borne minimale. Les bornes seraient alors fixes. L'inconvénient de cette méthode est que si l'optimum (la valeur pour ce critère de la variété référente), représenté par les pointillés verts sur la Figure 33, est proche d'une borne alors les variétés ayant leur valeur entre l'optimum et la borne en question (par exemple la variété représentée par le point A sur la Figure 33) sont très pénalisées par rapport aux autres (par exemple la variété représentée par le point B sur la Figure 33). En effet sur cette figure, les points A et B sont à égale distance de l'optimum sur l'axe des abscisses, donc ces deux variétés sont, l'une comme l'autre, aussi différentes de la variété référente, cependant leur indice de désirabilité n'est pas le même (0.5 pour la variété A et 0.9 pour la variété B). Donc la fonction de désirabilité ainsi définie ne permet pas de transcrire la ressemblance des variétés A et B par rapport à la variété référente.

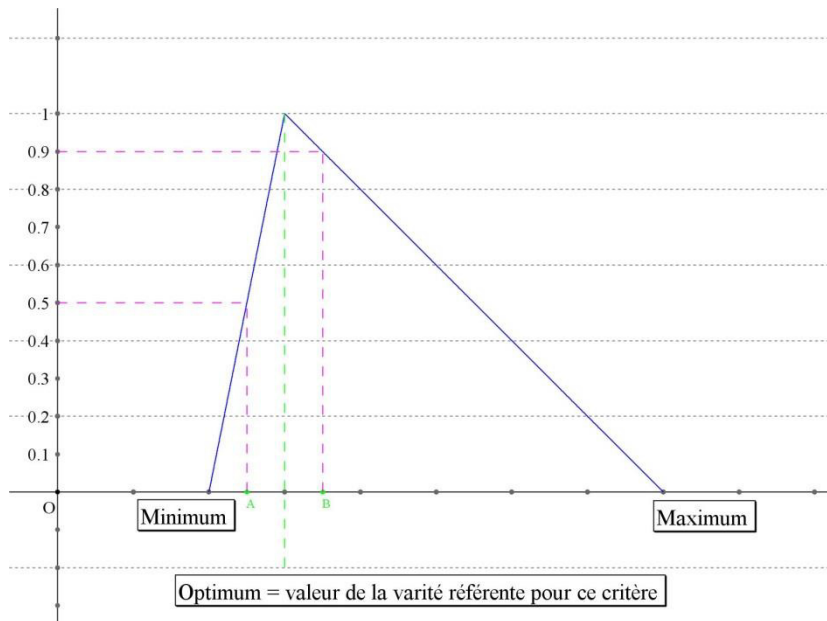


Figure 33 : Fonction de désirabilité si le choix de la borne maximale et minimale est fixe et si la variété référente a une valeur proche de la borne minimale pour ce critère

Pour éviter ce biais, ce sont les pentes de la fonction de désirabilité qui doivent être fixes. Les valeurs de  $\alpha$ , du minimum et du maximum sont définies comme suit :

$$\alpha = \text{Valeur maximale de ce critère} - \text{Valeur minimale de ce critère}$$

$$\text{Minimum} = \text{Optimum} - \alpha$$

$$\text{Maximum} = \text{Optimum} + \alpha$$

Les bornes sont donc des variables fonction de l'optimum défini par la variété référente.

#### Agrégation des indices :

Une fois que les indices de désirabilité de chaque variété sont calculés pour tous les critères, ils doivent être agrégés. La moyenne arithmétique est la méthode d'agrégation la plus adaptée. Les propriétés de filtre de la moyenne géométrique ne sont pas utiles dans cette fonctionnalité de l'outil. Une fois l'agrégation des indices de désirabilité pour les critères sélectionnés faite, chaque variété a une note comprise entre 0 et 1. Si la variété a une note de 1, alors elle est parfaitement identique à la variété référente sur les critères sélectionnés. A l'inverse, plus sa note se rapproche de 0 plus elle est différente de la variété référente sur base de ces mêmes critères. Cette note peut donc être assimilée à un pourcentage de ressemblance en la multipliant par 100. Les variétés sont ensuite classées en fonction de leur pourcentage de ressemblance et cette liste est retournée à l'utilisateur (Tableau 16).

**Tableau 16 : Classement des variétés sur base de leur pourcentage de ressemblance avec APACHE comme variété référente et sur les critères "Allongement de la pâte au façonnage" et "couleur de la mie"**

Revenir à la calcullette		Voir la légende		Test de panification										
Nom des variétés	Pourcentage de ressemblance	Classement de la variété	Indice d'élasticité	Indice de chute de hagberg (farine)	NTP	Hydratation de la pâte au pétrissage	Lissage de la pâte au pétrissage	Collant de la pâte au pétrissage	Allongement de la pâte au façonnage	Elasticité de la pâte au façonnage	Tenue de la pâte à la mise au four	Développement des coups de lame	Volume	Couleur de la mie
APACHE	100.0	1	49.3	443.8	251.1	58.5	7.9	11.0	10.9	9.1	9.0	9.4	1604.3	16.5
RGTCYCLO	98.7	2	49.7	397.0	239.1	56.6	8.3	12.1	10.9	9.1	10.0	8.3	1475.1	16.9
AIGLE!	97.6	3	45.2	438.8	253.0	60.2	8.0	11.3	10.8	9.0	9.5	10.0	1529.6	16.0
APLOMB	95.4	4	50.1	468.2	256.2	59.5	7.2	11.8	10.0	8.8	10.0	10.0	1536.1	16.5
PAKITO	95.2	5	49.4	449.9	257.9	59.1	7.8	10.4	10.0	9.0	9.6	9.9	1561.2	16.4
VYCKOR !	94.9	6	45.0		233.7	61.0	6.6	10.9	11.3	9.6	8.7	8.3	1565.0	15.6
RGTVENEZIO	94.4	7	52.2	429.0	249.7	59.6	7.7	10.3	11.0	9.0	9.3	9.0	1561.7	15.0
ADVISOR !	93.9	8	44.8	483.8	250.8	60.1	8.0	11.3	11.5	8.5	9.3	9.8	1590.1	
JOKER !	93.7	9	52.6		251.3	59.9	6.3	11.5	11.5	10.0	10.0	10.0	1671.5	17.5
BERGAMO	93.1	10	42.9	237.7	224.1	59.9	6.1	10.0	11.9	9.6	7.4	7.4	1493.7	16.0
GRAPELI	92.3	11	47.1	375.0	215.8	57.8	8.2	10.0	9.5	9.3	8.6	7.2	1307.7	16.2
RGTMONDIO	91.7	12	52.1	434.8	244.8	59.1	8.5	11.5	10.8	8.3	9.3	9.3	1619.9	14.3
LGABSALON	91.1	13	52.3	381.2	243.8	60.1	8.6	11.4	10.2	9.8	9.8	7.9	1605.8	14.8
OREGRAIN	91.1	14	47.4	433.6	257.8	58.6	7.4	10.8	10.3	8.9	9.5	9.3	1627.5	14.8
COSTELLO	90.6	15	47.3	478.6	244.8	59.7	7.8	11.3	11.8	8.8	8.8	9.0	1485.5	15.0

Dans le Tableau 16, la variété Apache est prise comme variété référente. En effet c'est une variété qui a longtemps été très utilisée en meunerie. Mais elle est actuellement de moins en moins cultivée à cause de son manque de compétitivité sur les critères agronomiques par rapport aux nouvelles variétés. Cette variété est appréciée pour son allongement et la couleur de sa mie, surtout chez les boulangers artisans. Dans cet exemple, nous cherchons donc des variétés pouvant se substituer à Apache sur ces deux critères.

Dans le Tableau 16, on voit notamment que RGT Cyclo ressemble à 98.7% à Apache sur ces deux critères. Les variétés notées en rouge sont des variétés pour lesquelles des données manquent.

#### Gestion des données manquantes :

Certaines variétés ne sont pas totalement caractérisées et il leur manque des données pour certains critères. Si la variété référente a une valeur manquante sur un des critères sélectionnés, l'outil n'est pas en mesure de fournir un résultat. En effet, la fonction de désirabilité sur ce critère est paramétrée à partir de la valeur de la variété référente sur ce même critère. Pour éviter cela, lorsque l'outil rencontre cette situation, il utilise la moyenne de toutes les variétés pour ce critère comme valeur référente (optimum de la fonction de désirabilité pour ce critère). Lorsque c'est le cas, l'outil affiche un message d'alerte avertissant l'utilisateur qu'il est dans ce cas de figure et indique le (ou les) critère(s) manquant(s).

Le problème des valeurs manquantes intervient aussi dans le calcul de l'indice de désirabilité d'une variété non référente. Lorsqu'une variété a une valeur manquante pour un critère, il est logiquement impossible de calculer son indice de désirabilité pour ce critère. Cependant, ARVALIS – Institut du végétal ne souhaite pas qu'une variété soit pénalisée par le simple fait qu'elle ne soit pas caractérisée de manière exhaustive. Dès lors, les valeurs manquantes ne sont pas prises en compte dans le calcul de la moyenne arithmétique des indices de désirabilité. Enfin, si une variété non référente a une valeur manquante pour chacun des critères sélectionnés, alors elle n'a pas d'indice de désirabilité et apparaît en bas du classement.

## 4.5 Fonction « Je compare des fiches variétales »

Cette fonction permet de sélectionner des variétés dans une liste déroulante (Annexe 20) et d'afficher les « fiches variétés » de celles-ci. Une « fiche variété » est une ligne Excel reprenant le nom de la variété et les valeurs de cette variété pour tous les critères de la base de données. Cette



fonction est simple, facile à développer et pourtant d'un réel service pour le meunier. Semences de France propose un service similaire mais qui se base sur très peu de critères de qualités.

#### **4.6 Fonction « Je cherche le débouché le mieux adapté à mon lot de blé tendre »**

Les fonctions présentées jusqu'ici répondaient aux besoins de la meunerie et des boulangeries. Certains meuniers (Moulins Soufflet, Axiane Meunerie) impliqués dans le développement de l'outil font partie de groupes de sociétés intervenant à plusieurs niveaux dans la filière céréalière. Ainsi, le groupe Soufflet et le groupe Axereal réalisent aussi de la collecte de céréales et du stockage. A ce titre, ils ont exprimé la volonté d'intégrer une fonction permettant de déterminer le débouché le mieux adapté pour une variété ou un lot de blé caractérisé. L'ANMF songe également depuis plusieurs années à développer un outil permettant de déterminer le meilleur débouché pour les lots de céréales collectées. C'est pour répondre à cette demande que la fonction « Je cherche le débouché le mieux adapté à mon lot de blé tendre » a été développée.

##### Principe général :

Pour chacun des débouchés caractérisés (paramétrage des fonctions de désirabilité des 31 critères pour 14 débouchés), les variétés ont une note globale (note comprise entre 0 et 1). C'est sur la base de cette note que les variétés sont classées dans la fonction « Je cherche la variété la mieux adaptée à mon débouché ». Comme présentée dans le point 4.3, cette note est le résultat de l'agrégation des indices de désirabilité de la variété pour tous les critères. Plus cette note est élevée, plus la variété est désirable pour ce débouché.

Un raisonnement similaire peut être fait pour un lot de blé parfaitement caractérisé. A l'image d'une variété, il est possible de calculer un indice de désirabilité global d'un lot de blé pour chacun des débouchés. Cette note peut alors être utilisée comme indicateur de la capacité d'un lot de blé à être valorisé dans un débouché donné. Toutefois, il se peut que l'organisme stockeur ne connaisse pas le comportement à la panification de son lot de blé. Ces critères sont fortement liés à la génétique et donc à la variété. De plus, les notes de ces critères sont additionnables. Afin d'avoir un résultat le plus cohérent possible, il faut encoder un maximum de caractéristiques. C'est pour cela que l'outil offre la possibilité de charger les caractéristiques d'une variété. Cela peut être intéressant si l'organisme stockeur connaît la composition variétale de son mélange.

Trois étapes sont nécessaires :

##### 1. Chargement des caractéristiques du lot

La fonction « Je cherche le débouché le mieux adapté à mon lot de blé tendre » utilise les caractéristiques que l'utilisateur renseigne dans l'outil. Cependant, l'utilisateur peut ne pas avoir caractérisé totalement son lot. Pour pallier à ce problème, il est possible pour l'utilisateur de charger les caractéristiques d'une variété du catalogue dans l'application.

##### 2. Calcul des indices de désirabilité globaux

Pour chacun des 14 débouchés un indice de désirabilité global est calculé. Au total, 434 (31 critères multipliés par 14 débouchés) fonctions sont définies et donc 434 indices de désirabilité sont calculés. Ces 434 indices de désirabilité sont agrégés par débouchés.

##### 3. Retour d'un pourcentage à l'utilisateur

Ces indices compris entre 0 et 1 sont transformés en pourcentage. Un pourcentage pour chaque débouché est fourni à l'utilisateur. Ainsi, plus le pourcentage pour un débouché est élevé, plus le lot est désiré pour ce débouché.

A partir de ces pourcentages, l'utilisateur a une indication du débouché dans lequel le lot de blé peut être valorisé (Figure 34).



Dans la Figure 34, la variété APACHE a une désirabilité pour le débouché « Pain courant » de 75% alors qu'elle n'est que de 10% pour le débouché « Biscuit sec ». Apache est une variété très utilisée en panification, notamment artisanale, ce qui est en accord avec les résultats fournis par la fonction « Je cherche le débouché le mieux adapté à mon lot de blé tendre ».

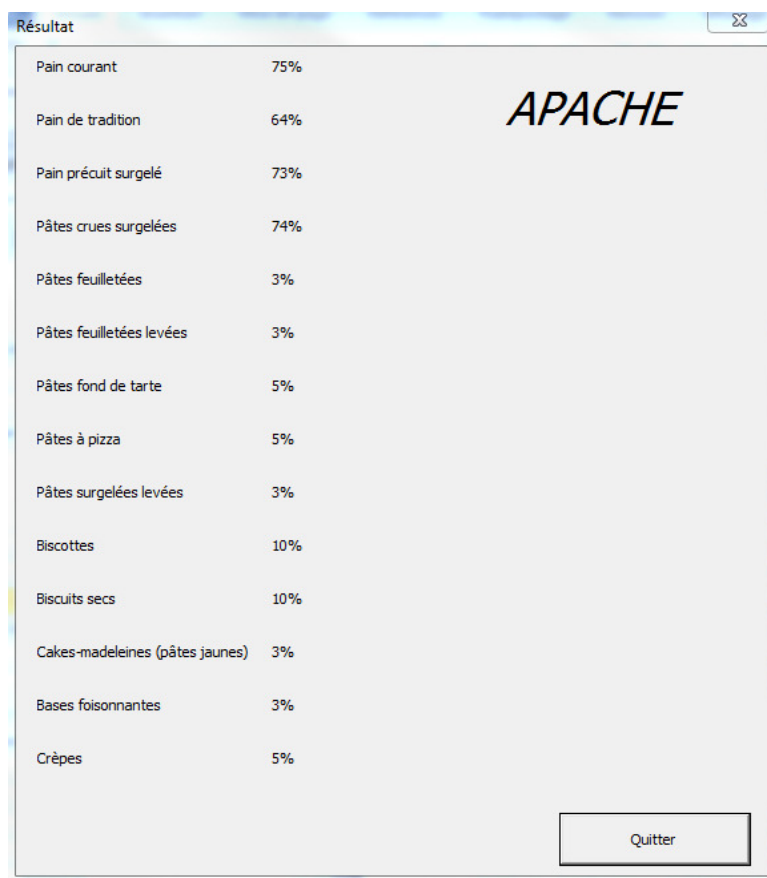


Figure 34 : Résultat de la fonction " Je cherche le débouché le mieux adapté à mon lot de blé tendre ". Les pourcentages représentent la désirabilité de la variété ou d'un lot de blé (dans cet exemple, la variété est "APACHE") pour chaque débouché

## Discussion

---

Les cinq fonctions de l'outil présentées au point 4 illustrent l'important potentiel de la méthode des indices de désirabilité. La méthode choisie, à partir de la synthèse bibliographique des méthodes d'analyse multicritère, a permis de répondre à l'objectif de ce mémoire : créer un outil d'aide au choix de variété de blé tendre à destination de la meunerie. Une exploitation plus complète de cette méthode d'analyse multicritère a permis de développer d'autres fonctions (« Je filtre le catalogue variétal », « Je cherche une variété de substitution », « Je cherche le débouché le mieux adapté à mon lot de blé tendre ») en réponse aux demandes de la filière. Cet outil se base également sur l'expertise d'ARVALIS – Institut du végétal et d'un groupe de meunier constitué grâce à la participation de l'ANMF.

Cependant, plusieurs voies d'amélioration de l'outil peuvent être envisagées et l'importance des résultats fournis par l'outil ouvre la porte à diverses utilisations.

### 5.1 Voies d'amélioration

#### Le paramétrage

Par nature, l'outil est fortement dépendant du paramétrage. Cette caractéristique lui confère une forte flexibilité grâce au paramétrage personnalisé, qui lui permet de formaliser une grande diversité de processus de choix variétal. Mais cette dépendance au paramétrage lie la qualité des résultats fournis à la qualité du paramétrage de l'outil. C'est pourquoi un gros effort a été fait pour récolter auprès des meuniers les informations nécessaires pour paramétrer l'outil afin qu'il corresponde à leurs attentes.

#### Un paramétrage synthétique dans la fonction « Je cherche la variété la mieux adaptée à mon débouché »

La concurrence qui anime les meuniers impliqués dans le paramétrage de l'outil les empêche de communiquer largement sur leur savoir-faire et limite donc l'intégration de leur expertise dans l'outil. Les cas-types enregistrés dans l'outil sont une synthèse de l'expertise des différents meuniers ayant participé au paramétrage de celui-ci. Mais cette synthèse peut, pour certains meuniers, être éloignée de ce qu'ils recherchent comme qualité pour un débouché donné. Dans ce cas, la fonction « Je cherche la variété la mieux adaptée à mon débouché » pourrait ne pas satisfaire l'utilisateur. Il faudrait pour cela définir des cas types par meuniers et non des cas types généraux. La meilleure solution pour cela serait d'offrir la possibilité au meunier d'enregistrer un paramétrage. Ou alors, comme le nombre d'utilisateur est assez faible, d'enregistrer un paramétrage par meuniers. Cette possibilité a été envisagée, il faut pour cela travailler avec chaque meunier en bilatéral et non en groupe de travail. Ainsi, les cas types proposés à l'utilisateur seraient fonction de celui-ci. La reconnaissance de l'utilisateur pourrait se faire via un identifiant.

#### Un paramétrage fixe dans la fonction « Je cherche le débouché le mieux adapté à mon lot de blé tendre »

Dans la fonction « Je cherche la variété la mieux adaptée à mon débouché », l'utilisateur peut entrer les caractéristiques précises de son lot. En revanche, cette fonction est directement liée au paramétrage des cas type des débouchés qui ne peut être modifié.

Le choix de ne pas offrir la possibilité de paramétrer personnellement chaque débouché dans cette fonction se justifie par l'utilisation future de celle-ci. En effet, à l'avenir cette fonction pourrait être proposée à d'autres utilisateurs que les meuniers, comme les organismes stockeurs (cf. 5.2). Or le paramétrage relève de la propriété intellectuelle des meuniers et ARVALIS – Institut du végétal ne souhaite pas le communiquer à tous les utilisateurs. A titre d'exemple, en revanche, la fonction « Je cherche la variété la mieux adaptée à mon débouché » sera proposée qu'aux meuniers. Ceux-ci ayant participé au paramétrage de l'outil, il est logique qu'ils puissent y avoir accès.

De plus, à terme, l'outil pourrait être utilisé pour fournir un indicateur (le pourcentage fourni par la fonction « Je cherche le débouché le mieux adapté à mon lot de blé tendre ») qui constituerait un argument objectif dans le choix des variétés recommandées par la meunerie (VRM). Afin que cet indicateur soit crédible, il faut qu'il soit toujours calculé à partir d'une même base de calcul. Pour cela, le paramétrage doit être fixe. Le paramétrage fixe de cette fonction permet donc de fournir un indicateur qui peut servir de base de comparaison des variétés mais rend cette fonction très dépendante du paramétrage. Il est donc indispensable d'avoir un paramétrage précis qui correspond aux attentes des utilisateurs. Celui-ci pourrait être amélioré en faisant une enquête auprès d'un groupe de meunier plus important.

## Les bases de données

### Les critères agronomiques

Le choix variétal du meunier n'est pas uniquement basé sur les critères de qualité (cf. 4.1). Les critères agronomiques ont aussi leur part d'importance car ils déterminent la qualité sanitaire et la production potentielle de cette variété. Lors des discussions avec les meuniers, la nécessité d'évaluer la production potentielle d'une variété qui vient d'être inscrite a été abordée. En effet, il est nécessaire pour les meuniers de connaître cette donnée afin de rechercher ou non des méthodes de panification capables d'intégrer cette variété. Mais cette donnée est très difficile à déterminer car la production d'une variété dépend de la surface cultivée et du rendement. La surface cultivée dépend des critères de qualité agronomiques (plus la variété est agronomiquement performante, plus elle sera cultivée) mais aussi du marketing dont elle a fait l'objet. De plus, les critères de caractérisation variétale recherchés par les agriculteurs peuvent être subjectifs et dépendre de paramètres difficiles à formaliser. Ainsi, par exemple, si une année a été marquée par une grosse pression en septoriose (*Septoria tritici* et *Stagonospora nodorum*) alors l'année suivante l'agriculteur aura tendance à rechercher des variétés résistantes à cette maladie. Enfin, la communication du potentiel de production d'une variété peut influencer les surfaces cultivées de celle-ci. Il a donc été décidé de ne pas travailler sur cette fonctionnalité.

### L'ajout de critères

La demande de produits meilleurs pour la santé et plus respectueux de l'environnement est grandissante chez le consommateur. Dans ce contexte, les meuniers et les boulangers souhaitent valoriser leur produit en utilisant des variétés à faible consommation d'intrants. La seule manière de valoriser officiellement cela serait de créer un label garantissant la faible consommation d'intrant de la variété. En Belgique, le livre blanc (Watillon et al., 2016) propose une liste des variétés recommandées dans laquelle les variétés sont réparties en deux groupes : groupe production intégrée et groupe surveillance renforcée. Cette expertise est faite sur base du comportement des variétés à la rouille jaune, la septoriose et la verse.

Un label doit être déterminé de la manière la plus objective possible en se basant, par exemple, sur des seuils de tolérance aux différentes maladies des variétés. Cette notion dépasse de loin le cadre de ce mémoire mais si un label est mis en place, il pourrait constituer un critère de qualité à part entière, et à ce titre, être implanté dans l'outil. Cet exemple illustre la nécessité d'offrir la possibilité d'ajouter un critère de qualité. Cela est possible mais nécessite la modification de plusieurs codes. L'ajout de critère dans l'outil pourrait être facilité en revoyant l'entièreté du prototypage.

### *Autres sources de données*

#### Des données nationales

Au-delà du paramétrage, l'outil repose aussi sur la base de données qu'il utilise. Cette base de données est obtenue par synthèse des données du CTPS et des données de post inscription d'ARVALIS – Institut du végétal ainsi que celles de l'ANMF (cf. 3.3). Mais l'environnement influe aussi la valeur de ces critères de qualité. La base de données de l'outil est déterminée à partir de données récoltées partout en France et donc dans des climats et pédoclimats différents et avec des itinéraires techniques différents.

#### Un approvisionnement régional des meuniers

Une variété reçue par un meunier est souvent cultivée dans sa région et avec des itinéraires techniques qui peuvent être propres à cette région. Par conséquent, en moyenne, la variété cultivée dans la région du meunier aura des caractéristiques différentes de celles de l'outil qui se base sur des données nationales. Il en est de même pour l'effet année. En fonction des conditions climatiques, une variété peut, en moyenne sur l'ensemble du territoire, avoir des caractéristiques différentes d'une année à l'autre. La fonction « Je cherche le débouché le mieux adapté à mon lot de blé tendre » permet de tenir compte de cette contrainte en offrant la possibilité à l'utilisateur de modifier les caractéristiques de la variété. En quelque sorte, cette fonction permet d'intégrer l'effet environnement dans l'outil. Mais cette fonction ne permet pas de comparer les variétés. La solution pourrait être d'utiliser différentes bases de données en fonction des régions. Ainsi, la fonction « Je cherche la variété la mieux adaptée à mon débouché » pourrait fournir des résultats plus conformes aux attentes des meuniers.

Cette discussion sur la base de données amène à une question fondamentale : *Quel service doit apporter l'outil et à qui est-il destiné ?* L'objectif est-il d'aider le meunier à identifier les variétés inscrites, qui ont un potentiel génétique pouvant les intéresser, afin de promouvoir leur développement ? Ou l'objectif est-il d'aider le meunier à choisir la variété la mieux adaptée à son débouché, parmi celles présentes sur le marché ? Ces deux objectifs sont très différents et ont des implications méthodologiques, économiques et politiques qui sont discutées dans la partie 5.2 (Figure 35).

#### Des méthodes d'évaluation normalisées mais éloignées des pratiques des meuniers

Une autre contrainte, liée directement à la méthode de détermination des valeurs des critères, apparaît. La valeur des critères est déterminée à partir de méthodes de détermination précises qui font d'ailleurs souvent l'objet d'une norme (cf. 1.2). L'avantage de ces méthodes normalisées est qu'elles permettent de comparer les variétés sur une même base. L'inconvénient est que ces méthodes peuvent ne pas refléter les pratiques réelles des meuniers et boulangers. Ainsi, un critère comme l'élasticité de la pâte au façonnage est déterminé par le test de panification qui suit la norme NF V03-716. Mais en pratique, les boulangeries peuvent utiliser des recettes avec plus d'amylases ou avec des temps de pétrissage différents par exemple. Et une variété peut avoir son élasticité augmentée avec la méthode

du boulanger par rapport à la méthode normalisée alors qu'à l'inverse une autre variété peut avoir son élasticité plus faible avec la méthode du boulanger qu'avec la méthode normalisée.

Afin que l'outil corresponde parfaitement à chaque utilisateur, il faudrait utiliser des méthodes de détermination des critères propres à chaque utilisateur. Mais ceci nécessiterait un investissement trop important. Cependant, chaque meunier réalise aussi des essais de panification. Ainsi, chaque meunier dispose d'une base de données qui correspond à ses pratiques. La solution serait alors de charger les bases de données des meuniers et de faire fonctionner l'outil sur la base de données qui correspond à l'utilisateur. Cette possibilité a été discutée avec les meuniers. Ils souhaitent pouvoir intégrer leur base de données dans l'outil mais qu'elle soit accessible qu'à eux même. Cette fonctionnalité est une piste d'amélioration de l'outil.

Au-delà de ces voies d'améliorations, l'outil devra être présenté à l'utilisateur via une interface web qui fera l'objet d'une promotion pour lancer le produit. La présentation de l'outil, les fonctions qu'il contient et le marketing dont il fait l'objet devront être fonction du type d'utilisateur. Ainsi, l'organisme stockeur n'aura pas accès aux mêmes fonctions que le meunier et ne fera pas l'objet de la même démarche marketing. La forme que doit prendre l'outil dépend donc de la cible qu'ARVALIS – Institut du végétal vise.

## 5.2 Perspectives d'utilisation

Initialement, l'outil devait permettre d'aider les meuniers à choisir les variétés les plus adaptées à leurs débouchés. Mais d'autres fonctions sont venues enrichir l'outil. Finalement, il apporte des services qui peuvent être valorisés auprès de différents acteurs de la filière blé tendre.

### Utilisateurs potentiels

Le meunier est évidemment le principal utilisateur potentiel. Toutes les fonctions de l'outil sont susceptibles de lui apporter un service et le développement de l'outil fait suite à une demande de l'ANMF. Mais les meuniers français représentent au maximum quelques dizaines de clients potentiels. En France, le boulanger artisanal achète principalement des mix de variétés élaborés par les meuniers. Le boulanger artisanal n'effectue donc pas, ou peu, de choix de variété, ce qui ne fait pas de lui un utilisateur potentiel de l'outil. En revanche, le réseau de boulangeries artisanales Banette s'intéresse au choix de variété. L'entreprise Banette achète des farines à des meuniers qui respectent leur cahier des charges, puis réalise les mix. Ces mix sont ensuite distribués dans leurs boulangeries partenaires. Banette est, de ce fait, une boulangerie artisanale potentiellement utilisatrice de l'outil et était d'ailleurs l'un des membres du groupe de travail ayant permis le développement de l'outil.

Les industries boulangères pèsent sur le choix variétal via leur cahier des charges. Elles souhaitent de plus en plus identifier les variétés performantes afin de favoriser leur développement en imposant un cahier des charges aux meuniers qui ne peut être respecté que par les variétés qu'ils jugent performantes. Ces industries sont donc aussi des utilisateurs potentiels.

Enfin, les organismes stockeurs (négoce et coopératives) peuvent être intéressés par la fonction « Je cherche le débouché le mieux adapté à mon lot de blé tendre ». Ces entreprises représentent un nombre d'utilisateurs important, et donc un nombre de clients potentiellement élevé.

Ces utilisateurs font souvent partie de groupes de sociétés intervenant à plusieurs niveaux dans la filière céréalière. Ainsi, à titre d'exemple, le groupe Limagrain intervient dans tous les maillons de la filière allant du sélectionneur au boulanger (Jacquet Brossard), c'est aussi le cas du groupe Soufflet. Dès lors, les fonctions susceptibles d'intéresser ces utilisateurs dépendront de leur situation.

### Un outil adapté au type d'utilisateur

Le type d'utilisateur détermine la base de données et le paramétrage à utiliser pour chaque application de l'outil. L'ensemble de ces éléments sont repris dans le Tableau 17.

**Tableau 17 : Identification du choix de la base de données et du paramétrage en fonction de la fonctionnalité de l'outil et de l'utilisateur de celle-ci.**

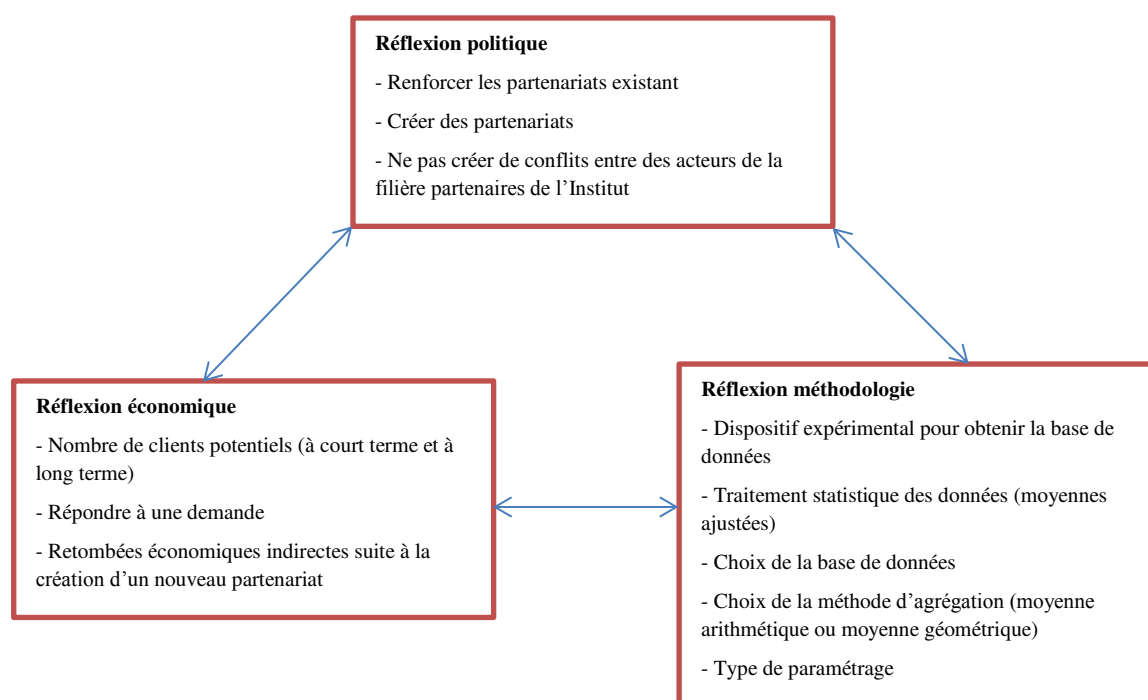
Fonction de l'outil	<b>Je cherche la variété la mieux adaptée à mon débouché</b>		<b>Je cherche le débouché le mieux adapté à mon lot de blé tendre</b>		<b>Je cherche une variété de substitution</b>
Utilisateur	<b>Meunier</b>	<b>Arvalis</b>	<b>Meunier</b>	<b>Organisme stockeur</b>	<b>Meunier</b>
Base de données	Reprenant uniquement la variabilité génétique	Reprenant uniquement la variabilité génétique	Représentative : variabilité génétique, environnementale et interactions génotype environnement	Représentative : variabilité génétique, environnementale et interactions génotype environnement	Reprenant uniquement la variabilité génétique
Paramétrage	Propre à chaque meunier	Synthèse représentative des meuniers français	Propre à chaque meunier	Synthèse représentative des meuniers français	Propre à chaque meunier

Le paramétrage fixe de la fonction « Je cherche le débouché le mieux adapté à mon lot de blé tendre » peut poser problème pour le meunier. Dans les faits, le meunier utilisera peu cette fonction, donc le choix a été fait de ne pas offrir la possibilité de modifier le paramétrage dans cette fonction.

### Réflexion politique-économique-méthodologique

La base de données va donc dépendre de l'objectif recherché qui dépend lui-même des débouchés économiques potentiels. Finalement, le choix stratégique repose sur trois réflexions (Figure 35) :

1. Réflexion économique
2. Réflexion politique
3. Réflexion méthodologique



**Figure 35 : Réflexion politique, économique et méthodologique nécessaire avant la commercialisation de l'outil**

Avant d'aborder cette triple réflexion, il est indispensable de replacer ce projet dans son contexte. En 2004, ARVALIS – Institut du végétal mettait à disposition des meuniers une brochure : *Quoi de neuf en qualité ?* Une enquête auprès des meuniers avait permis de s'orienter vers un format papier et non un format numérique. Depuis, les ventes de la brochure n'ont cessé de diminuer. L'Institut a donc remis en place une enquête pour identifier les besoins de la filière. A priori, l'objectif était d'aider les meuniers à trouver rapidement les variétés qui pouvaient répondre à leur cahier des charges afin de promouvoir leur développement. Ainsi, l'outil peut être un support pour déterminer les VRM (variétés recommandées par la meunerie française).

Initialement, au niveau politique, il y avait une volonté de renforcer le partenariat avec la meunerie. L'outil a donc utilisé une méthodologie pour répondre à cette volonté (base de données prenant en compte uniquement la variabilité génétique). Toutefois, au niveau économique, la meunerie ne représente pas un capital client très élevé. Pour répondre à cette contrainte économique, la fonction « Je cherche le débouché le mieux adapté à mon lot de blé tendre » a été développée afin d'élargir le capital client aux organismes stockeurs. Cette fonction propose de modifier les caractéristiques de la variété sélectionnée afin d'inclure l'« effet environnement » dans les caractéristiques de celle-ci et ainsi répondre à une demande des organismes stockeurs. Cependant, cette fonctionnalité laisse apparaître une contrainte politique : les organismes stockeurs pourraient faire pression sur la meunerie pour qu'elle achète leur lot de blé en utilisant l'outil comme argument pour démontrer la bonne qualité de leur lot.

Dans les faits, cette contrainte n'en est pas une car les meuniers ont un cahier des charges stipulant les critères de qualité nécessaires pour qu'un lot de blé leur soit vendu. En revanche, ça n'est pas le cas des amidonniers. En effet, ce débouché pourrait être intégré à l'outil. Il suffirait de caractériser leurs attentes comme cela a été fait pour les meuniers (réflexion méthodologique). Ceci élargirait encore un peu plus le capital client (réflexion économique). Mais le secteur de l'amidonnerie est moins transparent que celui de la meunerie. Les cahiers des charges ne sont pas communiqués aux clients, ceci laissant d'ailleurs libre choix à l'acheteur de fixer son prix d'achat. Au niveau politique, cela pourrait être intéressant pour l'institut de proposer un service aux amidonniers afin de se positionner dans cette filière. De manière générale, cette démarche est à la base du suivi d'un projet. Plus le projet s'étale dans le temps, plus cette triple réflexion doit avoir lieu régulièrement et donc plus la mise en place d'un calendrier est indispensable. En effet, la politique de l'entreprise peut évoluer entre temps, et ainsi modifier les objectifs du projet. De même, dans le cas du développement d'un outil, les fonctionnalités envisageables peuvent évoluer au fur et à mesure que le développeur se familiarise avec la méthode, ceci ouvrant des perspectives économiques nouvelles et donc peut-être des financements plus importants.

Le débouché « export » (36.9 % de la production française était exportée en 2016 (Source : France Agrimer) (Figure 7)) peut être ajouté pour répondre aux attentes des organismes stockeurs. Il pourrait aussi répondre aux attentes des meuniers bien que les exportations de farines soient faibles (9.2 % des farines produites en France étaient exportées en 2015 (Source : ANMF)).

L'ajout de ces débouchés est une piste d'amélioration et devra faire l'objet, comme pour les débouchés meuniers, d'enquête auprès, notamment, des amidonniers. Le débouché export est quant à lui facilement paramétrable car nécessite très peu de critères de qualité. Enfin le débouché « Alimentation animale » pourrait aussi être caractérisé et ajouté à l'outil mais il nécessite d'autres critères de qualité. Citons aussi les obtenteurs, qui pourraient utiliser l'outil pour déterminer dans quel débouché une lignée candidate à l'inscription pourrait être valorisée afin d'orienter leur marketing.

Au vu du potentiel de l'outil, une réflexion s'est engagée sur l'utilisation de ses capacités pour aider ARVALIS – Institut du végétal dans ses activités d'expertise. L'Institut est impliqué dans divers

groupes de travail visant à apporter une expertise sur les variétés de blé tendres comme la détermination des listes VRM (variétés recommandées par la meunerie française) et BPMF (Blé Panifiable Pour la Meunerie Française) ou encore des classes technologique du CTPS. ARVALIS – Institut du végétal diffuse également son expertise sur les variétés via différents supports de communication comme la revue *Perspective Agricole* ou encore la brochure *Quoi de neuf en qualité ?*. Actuellement la détermination des classes technologique et des listes ANMF se fait par expertise et nécessite un travail de synthèse de la part des différents groupes de travail. La détermination des VRM, par exemple, se fait avec les principaux meuniers français et des représentants d'ARVALIS – Institut du végétal et de l'ANMF. Si le classement dans l'outil d'une variété pour un débouché ne constituera certainement jamais le seul critère pour déterminer les VRM, il peut en revanche apporter un argument de plus pour accorder ou non cette distinction à une variété.



## Conclusion

---

La filière blé tendre a une importance économique majeure dans le secteur agricole français. Les débouchés du blé tendre produit en France sont multiples : alimentation animale, alimentation humaine, export, amidonnerie. Ce mémoire s'est principalement concentré sur l'alimentation humaine et sur un acteur majeur de ce débouché : la meunerie. Comme pour d'autres espèces cultivées, le choix de la variété est une des étapes clés dans la mise en place d'une production de qualité.

L'outil développé dans ce mémoire, permet de répondre à une demande formulée par la meunerie française face à la complexité croissante du choix variétal dans cette profession. Les interactions entre ARVALIS – Institut du végétal et l'ANMF ont permis d'identifier précisément les attentes des meuniers et donc de proposer un outil y répondant au mieux. La multitude de fonctions proposées dans cet outil a été permise grâce à la méthode d'analyse multicritère basée sur les indices de désirabilité. L'analyse de la qualité des résultats fournis et de leur sensibilité au type de pondération et à la méthode d'agrégation, permet de s'assurer de la fiabilité des sorties ainsi que de leur robustesse.

Au vu de l'important potentiel de cette méthode d'analyse, une triple réflexion s'est engagée : réflexion politique, économique et méthodologique. Ces réflexions, ont permis de définir les publics cibles, les fonctions à leur proposer, et la manière dont l'institut doit diffuser cet outil.

Par ailleurs, la possibilité d'ajouter des critères et/ou des débouchés, pérennise l'application développée dans ce mémoire. L'ajout de débouché permet aussi d'augmenter le nombre d'utilisateurs potentiels, ce qui présente de bonnes perspectives économiques. Ce mémoire a permis le développement d'un outil performant, capable de répondre aux besoins actuels et futurs de plusieurs acteurs de la filière blé tendre.

Au-delà des efforts à fournir dans la présentation et dans la diffusion de l'application, en amont, une analyse plus complète de la sensibilité des résultats pourrait être faite. Il serait en effet intéressant, que l'analyse de la sensibilité des résultats couvre toutes les fonctions, et tous les débouchés que l'outil propose. Cela permettrait de cerner précisément les capacités de celui-ci et ainsi évaluer la crédibilité de chacune de ses fonctionnalités. La qualité des résultats fournis pourrait quant à elle être évaluée directement auprès des meuniers. Finalement, cette analyse de la sensibilité apporterait des arguments marketing solides en vue de la diffusion de l'application.

L'outil s'intègre parfaitement dans la transition numérique initiée il y a plusieurs années dans le secteur agricole. Mais d'autres défis, comme celui des biotechnologies, pourraient faire évoluer les pratiques en termes de choix variétal dans la filière blé tendre. La présence d'un gène ou d'un allèle pourrait alors devenir un critère de qualité. Mais, malgré les efforts fournis dans ce domaine par la recherche scientifique, les applications tardent à venir et les critères phénotypiques resteront encore au cœur de la décision du choix variétal pendant plusieurs années.

## Bibliographie

---

- Anderson N.H., 1974. Cognitive Algebra: Integration Theory Applied to Social Attribution. 1–101.
- Asch S.E., 1946. Forming impressions of personality. *J. Abnorm. Soc. Psychol.* **41**, 258.
- Balzarini R., Davoine P.-A. & Ney M., 2011. Evolution et développement des méthodes d'Analyse spatiale multicritère pour des modèles d'aptitude : l'exemple des applications en Géosciences. *In: Conférence Francophone ESRI*. Versailles, France, 1–19.
- Bar L'Helgouac'h C., 1995. *Contrôle de la qualité des céréales et des protéagineux: guide pratique*.
- Bar L'Helgouac'h C., 2016. Qualité du blé tendre : des critères adaptés à chaque débouché. *Perspect. Agric.* 28–31.
- Bar L'Helgouac'h C., Giraud M. & Cosson C., 2004. La chromatographie : un outil pour comprendre la qualité des variétés. *Perspect. Agric.* **303**, 20–24.
- Ben Mena S., 2000. Introduction aux méthodes multicritères d'aides à la décision. *Biotechnol. Agron. Société Environ.* **4**(2), 83–93.
- Bergez J.É. & Abecassis J., 2009. *Les filières céréalières: Organisation et nouveaux défis*.
- Bonjean A., 2001. Histoire de la culture des céréales et en particulier de celle du blé tendre (*Triticum aestivum* L.). *Doss. l'environnement l'INRA* **21**(JANUARY 2001), 29–37.
- Bonneuil C. & Thomas F., 2009. Gènes, pouvoirs et profits. *La Rech. publique dans les Transform. des régimes Prod. des savoirs en génétique végétale Mendel aux OGM*.
- Boulineau F. & Leclerc C., 2013. EVOLUTION DES VARIETES AU TRAVERS DU CATALOGUE OFFICIEL. *Le sélectionneur français* **64**, 35–49.
- Branlard G. & Autran J., 1986. L'amélioration génétique de la qualité technologique du blé tendre. *Cult. Tech.* 132–145.
- Brans J.P., Mareschal B. & Vincke P., 1984. PROMETHEE: A New Family of Outranking Methods in Multicriteria Analysis. *In: Operational Research.* 477–490.
- Brisson N. et al., 2010. Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. *F. Crop. Res.* **119**(1), 201–212.
- Burnouf T. & Bouriquet R., 1980. Glutenin subunits of genetically related European hexaploid wheat cultivars: Their relation to bread-making quality. *Theor. Appl. Genet.* **58**(3–4), 107–111.
- Calderini D.F. & Slafer G.A., 1998. Changes in yield and yield stability in wheat during the 20th century. *F. Crop. Res.* **57**(3), 335–347.
- Ceballos-Silva A. & López-Blanco J., 2003. Delineation of suitable areas for crops using a Multi-Criteria Evaluation approach and land use/cover mapping: A case study in Central Mexico. *Agric. Syst.* **77**(2), 117–136.
- Craheix D. et al., 2012. MASC 2.0, un outil d'évaluation multicritère pour estimer la contribution des systèmes de culture au développement durable. *Innov. Agron.* **20**, 35–48.
- Delcour A. et al., 2014. État des lieux des flux céréaliers en Wallonie selon différentes Filières d'utilisation. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* **18**(2), 181–192.
- Feillet P., 2000. *Le grain de blé: composition et utilisation*.
- Filippi M., Frey O. & Peres S., 2012. Ce que nous enseignent les statistiques nationales françaises sur les évolutions de la coopération agricole. *Rev. Int. l'Économie Soc.* **326**, 29–44.
- Gallais A., 2013. ÉVOLUTION DE LA DIVERSITÉ GÉNÉTIQUE DES VARIÉTÉS DE PLANTES CULTIVÉES. *Divers. génétique* 1–9.
- Gallais A., 2015. *Comprendre l'amélioration des plantes: Enjeux, méthodes, objectifs et critères de sélection*.
- Goffaux R. et al., 2011. Quels indicateurs pour suivre la diversité génétique des plantes cultivées ?

- Gourdain E. et al., 2016. Lutte contre les fusarioses des épis de blés : quantification des espèces du complexe fusarien , facteurs de risque et méthodes de lutte. *Innov. Agron.* **49**, 133–145.
- Grabisch M. & Roubens M., 2000. Application of the Choquet integral in multicriteria decision making. *Fuzzy Meas. Integr.* 348–374.
- Ishikawa G. et al., 2014. Association mapping and validation of QTLs for flour yield in the soft winter wheat variety Kitahonami. *PLoS One* **9**(10).
- Jordi K.C. & Peddie D., 1988. A Wildlife Management Problem: A Case Study in Multiple-Objective Linear Programming. *J. Oper. Res. Soc.*
- Keeney R.L. & Raiffa H., 1976. Decision Analysis with Multiple Conflicting Objectives. *Wiley& Sons, New York.*
- Khelifi D. et al., 2004. Caractéristiques biochimiques et technologiques des blés cultivés en zone semi-aride **192**, 189–192.
- Kojadinovic I., 2006. Representation de preferences a l'aide de l'integrale de Choquet. In: *Journées Franciliennes de Recherche Opérationnelle*. CNRS.
- Lairez J. et al., 2016. *Agriculture et développement durable: Guide pour l'évaluation multicritère.*
- Le Gall A.-C., 2009. Panorama des méthodes d'analyse multicritère comme outils d'aide à la décision. In: *Rapport D'étude ONEMA-INERIS.*
- Lehoux N. & Vallée P., 2004. Analyse multicritère. *École Polytech. Montréal.*
- Lorgeou J., Le Souder C. & du Cheyron P., 2014. Qualité et débouchés : exploiter le potentiel en protéines des variétés. *Perspect. Agric.* **411**, 44–48.
- Méléard B. & Du Cheyron P., 2016. Quelle évolution qualitative des variétés de blé tendre depuis 60 ans ? *Ind. des céréales* **197**.
- Michel L. & Makowski D., 2013. Comparison of statistical models for analyzing wheat yield time series. *PLoS One* **8**(10), e78615.
- Mousseau V., 1992. Analyse et classification de la littérature traitant de l'importance relative des critères en aide multicritère à la décision. *RAIRO. Rech. opérationnelle* **26**, 367–389.
- Osborne T., 1907. The proteins of the wheat kernel. *J. Chem. Inf. Model.* **53**(9), 1689–1699.
- Oury F.X. et al., 2012. A study of genetic progress due to selection reveals a negative effect of climate change on bread wheat yield in France. *Eur. J. Agron.* **40**, 28–38.
- Parker R. & Ring S.G., 2001. Aspects of the Physical Chemistry of Starch. *J. Cereal Sci.* **34**(1), 1–17.
- Payne P.I., Corfield K.G. & Blackman J.A., 1979. Identification of a high-molecular-weight subunit of glutenin whose presence correlates with bread-making quality in wheats of related pedigree. *Theor. Appl. Genet.* **55**(3–4), 153–159.
- Peng M. et al., 1999. Separation and characterization of A- and B-type starch granules in wheat endosperm. *Cereal Chem.* **76**(3), 375–379.
- Peronne R. et al., 2017. L' évolution de la filière blé tendre en France entre 1980 et 2006 : quelle influence sur la diversité cultivée. *Notes et Etudes Socio-Economiques* **41**, 83–113.
- Raeker M.Ö., Gaines C.S., Finney P.L. & Donelson T., 1998. Granule size distribution and chemical composition of starches from 12 soft wheat cultivars. *Cereal Chem.* **75**(5), 721–728.
- Richard H., 2016. Aide au choix des variétés de blé tendre : Faire des compromis et gérer les risques.
- Robin M.M., 2014. Analyse Et Modelisation Des Effets Des Pratiques Culturelles Et De La Situation De Production Sur Les Degats Causes Par Les Bioagresseurs Des Cultures. Application Au Ble D'Hiver.
- Rolland A., 2012. Aide à la décision multicritère et apprentissage automatique pour la classification.
- Roussel P., Chiron H., Della Valle G. & Ndiaye A., 2010. Recueil de connaissances sur les descripteurs de qualité des pâtes et des pains ou variables d'état pour la panification française.

*Gloss. Terminol. appliqué aux pains français.*

- Roy B., 1968. Classement et choix en présence de points de vue multiples. *Rev. française d'automatique, d'informatique Rech. opérationnelle. Rech. opérationnelle* **2**(V1), 57–75.
- Roy B., 1985. *Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision*, Paris, 423.
- Roy B., 1991. The outranking approach and the foundations of electre methods. *Theory Decis.* **31**(1), 49–73.
- Roy B. & Bouyssou D., 1993. *Aide Multicritère à la Décision: Méthode et Cas*, 693.
- Saaty T.L., 1980. *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resources allocation*, McGraw-Hill Inc, 17-34.
- Sadok W. et al., 2008. Ex ante assessment of the sustainability of alternative cropping systems: implications for using multi-criteria decision-aid methods. A review. *Agron. Sustain. Dev.* **28**(1), 163–174.
- Sarkar A., Ghosh A. & Banik P., 2013. Multi-criteria land evaluation for suitability analysis of wheat : a case study of a watershed in eastern plateau region , India. *Geo-spatial Inf. Sci.* **5020**(October), 37–41.
- Schärlig A., 1996. *Pratiquer Electre et Prométhée: un complément à décider sur plusieurs critères*, Vol.11.
- Schärlig A., 1985. *Décider sur plusieurs critères*, 304.
- Semassou C., 2011. Aide a la décision pour le choix de sites et systemes energetiques adaptes aux besoins du Benin.
- Shepetukha Y. & Olson D.L., 2001. Comparative analysis of multiattribute techniques based on cardinal and ordinal inputs. *Math. Comput. Model.* **34**(1–2), 229–241.
- Shewry P.R. et al., 1986. The classification and nomenclature of wheat gluten proteins: A reassessment. *J. Cereal Sci.* **4**(2), 97–106.
- Silhol P., 2010. Indicateurs de biodiversité: flux variétal, segmentation et concentration du marché pour huit espèces de grandes cultures de 1985 à 2007. *Synthèse des Princ. études Relat. à l'évaluation du progrès génétique. GNIS, Econ. Stat.* **44**.
- Simons K. et al., 2012. Genetic mapping analysis of bread-making quality traits in spring wheat. *Crop Sci.* **52**(5), 2182–2197.
- Sindic M. et al., 2010. *Valorisation de l'amidon de blé: incidences des modalités de culture sur les propriétés techno-fonctionnelles*.
- Soulaka A.B. & Morrison W.R., 1985. The bread baking quality of six wheat starches differing in composition and physical properties. *J. Sci. Food Agric.* **36**(8), 719–727.
- Streiff A., 2014. Outil d'aide au choix des variétés de blé tendre.
- Terrones Gavira F. & Burny P., 2012. Evolution du marché mondial du blé au cours des cinquante dernières années. *Livre Blanc* 1–12.
- Trail F., 2009. For blighted waves of grain: Fusarium graminearum in the postgenomics era. *Plant Physiol.* **149**(1), 103–110.
- Trdin N. & Bohanec M., 2017. Extending the Multi-Criteria Decision Making Method DEX. *Cent. Eur. J. Oper. Res.* 1–41.
- Watillon B. & Bodson B., 2016. Livre Blanc Céréales-Gembloux. *Livre Blanc Céréales-Gembloux*.