

ETUDE DU MALTAGE ARTISANAL DE L'ORGE BRASSICOLE POUR SON DÉVELOPPEMENT EN CIRCUIT COURT EN WALLONIE

HUGO ROBERT

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN CHIMIE ET BIOINDUSTRIES**

ANNEE ACADEMIQUE 2016-2017

**CO-PROMOTEURS: MARIANNE SINDIC (GXABT)
BRUNO GODIN (CRA-W)**

© 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 académique¹ de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur

¹Dans ce cas, l'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de Gembloux Agro-Bio Tech.

ETUDE DU MALTAGE ARTISANAL DE L'ORGE BRASSICOLE POUR SON DÉVELOPPEMENT EN CIRCUIT COURT EN WALLONIE

HUGO ROBERT

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN CHIMIE ET BIOINDUSTRIES**

ANNEE ACADEMIQUE 2016-2017

**CO-PROMOTEURS: MARIANNE SINDIC (GXABT)
BRUNO GODIN (CRA-W)**

Remerciements

Au terme de ce long travail, j'aimerais remercier les gens qui ont participé de près ou de loin à sa réalisation.

Merci tout d'abord à Emmanuel Faucillon de « Maltfabrique » d'avoir partagé ses connaissances et son savoir-faire. Merci également à sa famille, Christelle, Paul et Jeanne pour leur accueil et leur bonne humeur.

À Marianne Sindic, Bruno Godin et Stéphane Winandy sans qui ce travail n'aurait été possible. Merci pour leur encadrement et leurs bons conseils mais surtout pour leur temps !

Merci aux équipes du CRA-W et en particulier Sébastien Gofflot, Sévrine Goffin et Jean-Michel Romnee pour leur expertise et leur aide pour mes analyses.

À Cécile Van Bellinghen et son équipe du SPW pour leur soutien lors de la mise en germination des 5200 grains d'orge.

Un grand merci à l'équipe de Laurence Van Neederveld de l'institut Meurice, notamment Anne Pietercelie et Anne-Catherine Vandeville pour leur expertise, leur accueil et leur aide.

Merci aux personnes m'ayant permis de mener à bien les maltages pilotes. Notamment à François Béra et son équipe du laboratoire d'Ingénierie des Procédés Agro-Alimentaires, sans qui le touraillage n'aurait pas été possible. Merci également à Philippe Maesen du bureau d'études environnement et analyses, même si le produit de ce travail l'intéressera plus que ces quelques mots. Merci à Philippe Moniquet de m'avoir fourni l'orge pour ces essais.

Merci à Christophe Blecker de m'avoir permis d'utiliser les installations de son unité de Science des Aliments et Formulations.

Merci à Antoine et Catherine de m'avoir aidé à intégrer le secteur brassicole, mais surtout pour leur amitié !

Merci à mes amis du KDR pour les moments d'émotions intenses de ces 3 derniers mois, on s'est bien dévoilés comme diraient certains !!

Merci à Laetitia pour notre complicité et surtout sa capacité à encaisser l'insupportable ascenseur émotionnel de ces 2 derniers mois.

Enfin merci à ma famille pour m'avoir soutenu et pour avoir cru en moi pendant toutes ces années d'études, malgré mon caractère (hérité) loin de faciliter les choses ! Pour paraphraser la sagesse des anciens, je suis quand même tombé dans une bonne maison !

Résumé

La culture de la bière en Belgique a été reconnue, le 30 novembre 2016, patrimoine mondial de l'Unesco. Outre le savoir-faire, partagé par beaucoup de brasseurs internationaux, il s'agit bien de la diversité, de la culture et de l'histoire brassicole faisant partie intégrante de notre quotidien qui sont reconnues ici.

La Belgique a su garder au cours du temps un intérêt important pour ce secteur dont les produits sont très liés à la notion de terroir. Notion définie par l'Unesco comme « *un espace géographique délimité défini à partir d'une communauté humaine qui construit au cours de son **histoire** un ensemble de **traits culturels distinctifs**, de **savoirs**, et de **pratiques fondées sur un système d'interactions entre le milieu naturel et les facteurs humains**. Les savoir-faire mis en jeu révèlent une originalité, confèrent une typicité et permettent une **reconnaissance pour les produits ou services originaires de cet espace**, et donc pour les hommes qui y vivent. Les terroirs sont des espaces **vivants et innovants** qui ne peuvent être assimilés à la seule tradition.* » On a ainsi assisté au cours du temps à la caractérisation des terroirs belges, en partie par leur culture brassicole. Citons ainsi le Lambic, bénéficiant du label « *Spécialité traditionnelle garantie* », typique de la vallée de la Senne, la Saison, bière destinée historiquement aux ouvriers agricoles et fervente représentante du Hainaut ou encore les Rouges des Flandres, bières de fermentation mixte de Flandre occidentale.

Mais qu'en est-il « **des interactions entre le milieu et les facteurs humains** » ou « **des produits originaires de cet espace** » ? La Belgique est aujourd'hui un producteur d'orge brassicole anecdotique dont la production est loin de combler les besoins du secteur. Secteur qui joue toujours la carte du terroir tout en travaillant des matières premières étrangères, qu'il s'agisse de l'orge comme du houblon.

Cette reconnaissance par l'Unesco est pour la Belgique une vitrine sur le monde et il est important de remettre en question, de temps à autre, notre manière de produire afin que nos terroirs restent « **vivants et innovants** ».

Ceci étant dit, quelle autre question se poser que la provenance des matières premières contenues dans nos bières ?

Abstract

Beer culture in Belgium was recognized on 30 November 2016 as a World Heritage Site by Unesco. In addition to the know-how shared by many international brewers, this is the diversity, culture and history of brewing that is an integral part of our daily lives.

Belgium has been able to keep an important interest for this sector, whose products are closely linked to the notion of *terroir*. The concept defined by Unesco as "*a delimited geographical space defined from a human community that constructs in the course of its **history** a set of **distinctive cultural traits, knowledge, and practices based on a system of interactions between the natural environment and human factors**. The know-how involved reveals an originality, confer a typicity and allow **recognition for the products or services originating in this space**, and therefore for the men who live there. The terroirs are **living and innovative** spaces that can not be assimilated to tradition alone* ». In the course of time, we have witnessed the characterization of Belgian terroirs, in part by their brewery culture. For example, the Lambic, with the "Traditional specialty guaranteed" label, typical of the Senne valley, the Saison, a beer destined historically for agricultural workers and a fervent representative of Hainaut or the Reds of Flanders, beers of mixed fermentation of West Flanders.

But what about "*interactions between the environment and human factors*" or "*products originating from this space*"? Belgium is now an anecdotal malting barley producer whose production is far from meeting the needs of the sector. A sector that always uses the terroir as marketing while working with foreign raw materials, whether barley or hops.

This recognition by Unesco is for Belgium a showcase on the world and it is important to challenge, from time to time, our way of producing so that our terroirs remain "**alive and innovative**".

That being said, what other question to ask than the origin of the raw materials contained in our beers?

Contenu

Remerciements	i
Résumé	ii
Abstract	iii
Contenu	iv
Objectifs et démarche	1
Partie I: Synthèse bibliographique sur l'orge et le maltage	2
1. Etat des lieux de la filière « orge brassicole » en Wallonie	2
2. Obligations légales liées au secteur « malterie »	4
3. Processus de maltage	6
a. L'orge	6
b. Conditionnement de l'orge	12
c. La trempe	15
d. La germination	16
e. Le tourillage	19
f. Conditionnement du malt	20
g. Les malts spéciaux	22
4. Types d'installation	24
a. Le maltage sur aire	24
b. Le maltage pneumatique	25
c. Les unités « 3 en un »	26
Partie II: Analyses des orges et malts résultants	27
1. Matériel et méthode	27
a. Échantillonnage	27
b. Analyses	27
c. Statistiques	32
d. Maltage pilote	34
2. Résultats et discussion	35
3. Analyses en composantes principales	50
4. Discussion générale	53
Partie III: Approche économique	57
1. 25 T/an	57
2. 100 T/an	58
3. 500 T/an	59

4. Comparaison et Discussion	60
Partie IV: Conclusion et perspectives	63
Bibliographie.....	66
Annexes	A

Objectifs et démarche

L'objectif de ce travail est d'évaluer la faisabilité technique et la viabilité économique du maltage artisanal afin de relancer une filière d'orge brassicole (*Hordeum vulgare. L*) wallonne permettant de garantir un revenu juste aux agriculteurs et de produire des bières issues de matières premières locales afin d'affiner et d'affirmer notre patrimoine brassicole.

Partie I : La première partie de ce document consiste en une synthèse bibliographique compilant un certain nombre de références afin de bien comprendre la conformation, la composition et les modifications ayant lieu dans l'orge. Le processus de maltage et ce qu'il implique sera décrit ainsi que les différents types de malt résultants. Finalement une description des grandes classes de conception de malterie sera présentée afin de poser les bases techniques nécessaires pour l'approche économique ultérieure.

Partie II : Le secteur de la micro-malterie en Belgique étant inexistant, ce travail a débuté par une formation de un mois dans une malterie artisanale bretonne, « Maltfabrique ». Cette formation a eu pour but d'apprendre les fondements du maltage et de récolter des échantillons d'orges et de malts afin d'en évaluer les caractéristiques en laboratoire. Caractéristiques qui seront ensuite comparées avec les critères de l'industrie brassicole, mais également d'autres microstructures, et discutées afin d'apprécier la qualité de ces malts artisanaux dans un contexte de valorisation des circuits courts.

Ensuite, les conditions de maltage artisanal seront reproduites à l'échelle pilote (10kg de malt fini) afin d'expérimenter le processus dans son intégralité pour mieux cibler les paramètres clés.

Partie III : Finalement, une approche technico-économique sera présentée pour la mise en place de microstructures permettant de produire 25, 100 et 500 tonnes de malt/an tout en optimisant le contrôle des paramètres clés.

Partie I: Synthèse bibliographique sur l'orge et le maltage

1. Etat des lieux de la filière « orge brassicole » en Wallonie

La culture de l'orge se décline en 2 catégories, les orges d'hiver et les orges de printemps. Les orges d'hiver sont des variétés à 2 ou 6 rangs semées fin septembre ou début octobre tandis que les orges de printemps sont des variétés à 2 rangs, semées entre mi-février et mi-mars.

Pour les orges à 2 rangs, 4 des 6 épillets sont stériles, laissant plus de place aux 2 derniers pour se développer. Ces variétés fournissent donc des grains de calibres plus importants mais surtout plus homogènes, plus adaptés au maltage. Les orges à 6 rangs, ou escourgeon, fournissent quant à eux des rendements plus importants à l'hectare mais 4 grains sur 6 sont de calibre inférieurs au 2 derniers qui, manquant de place, ne se développent pas aussi bien que dans le cas des orges à 2 rangs. Les escourgeons offrent des rendements de 9 T/ha en moyenne quand les orges de printemps permettent des rendements de l'ordre de 6 T/ha dans les mêmes conditions. Les orges brassicoles ont, de manière générale, des rendements inférieurs de 30% par rapport aux orges fourragères. Les cultures biologiques permettent quant à elles des rendements de 4.5 T/ha en orge fourrager et 3.5 T/ha en orge brassicole (SoCoPro, 2017).

Actuellement, les variétés les plus utilisées en orge de printemps brassicoles en France, étant donné la faible production en Belgique, sont *KWS Irina*, *RGT Planet* et *Sebastian*, les variétés d'escourgeons brassicoles les plus courants sont *Casino* et *Etincel*, cette dernière étant de loin la plus disponible à destination de la brasserie en Belgique (Monfort 2016). Enfin la variété d'hiver à 2 rangs, bien qu'anecdotique, est *Salamandre* (Malteurs de France & Brasseurs de France 2017).

La production d'orge de brasserie en Belgique est très faible malgré la réputation brassicole du pays. En effet, la production belge n'a cessé de diminuer (Figure 1) pour arriver en 2015 à 1704 tonnes d'orges brassicoles produites, dont 1635 tonnes en Wallonie, pour un besoin du secteur malterie de 991380 tonnes, dont 308281 tonnes pour le marché belge (SoCoPro). Les principaux pays producteurs d'orge à destination des malteries belges sont la France et l'Allemagne. Plusieurs raisons peuvent expliquer l'abandon de cette culture en Belgique:

- Été pluvieux obligeant le cultivateur et/ou stockeur à sécher la céréale
- Culture plus contraignante que les céréales fourragères notamment pour assurer le bon taux de protéines
- Un déclassé tous les 4 ans en moyenne causé par une teneur en eau trop élevée, une énergie germinative trop faible, une mauvaise teneur en protéines, un calibre mauvais,... résultant des conditions climatiques du pays
- L'abandon de ce marché pour beaucoup de négociants-stockeurs car prestation contraignante, notamment pour assurer la pureté variétale et un pouvoir germinatif élevé par la suite.
- La demande importante pour l'orge fourragère en Belgique
- La qualité des orges de grandes cultures françaises et allemandes et la facilité d'approvisionnement, la Belgique étant une plaque tournante du marché céréalier mondial
- Minimum de 20 tonnes d'orge pour former un lot de maltage dans les malteries actuellement présentes

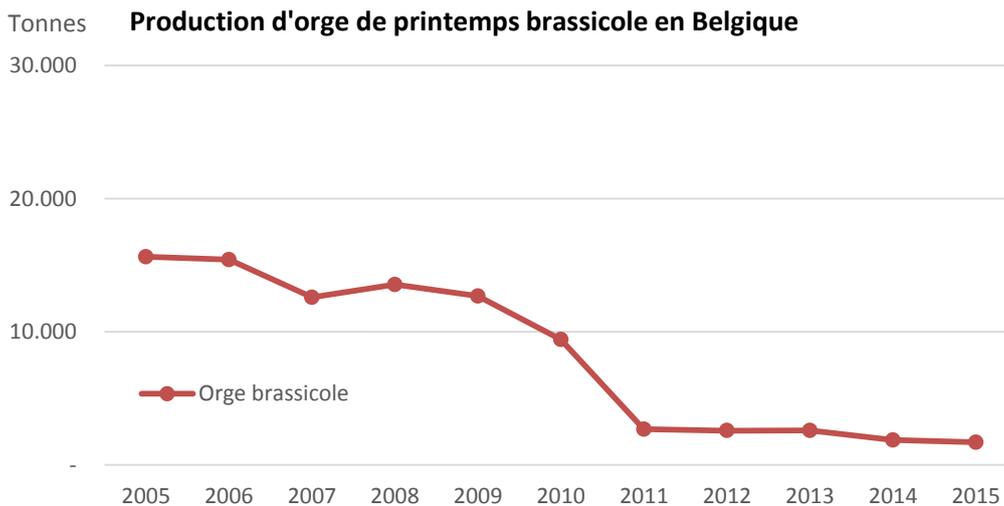


Figure 1: Evolution de la production d'orge de printemps brassicole en Belgique (Source Stabel –INS)

Toutes ces raisons ont menées à une diminution progressive de la production d'orge à destination des malteurs en Belgique. La filière ne suit plus de schéma classique agriculteur-négociant-malteur-brasseur, toutes les combinaisons sont possibles de la prise en charge de l'orge par le brasseur, jusqu'au maltage à façon par l'agriculteur qui stock à la ferme, en passant par le stockage « à façon » des négociants pour s'éviter le risque du déclassement. Dès lors qu'il n'y a plus de structure, les chiffres et statistiques concernant la filière sont loin d'être fiables et beaucoup d'informations se contredisent.

Cependant, il y a un réel intérêt pour la production d'orge locale à destination des brasseurs. En effet, le marché de la bière est un marché qui joue fortement la carte du terroir et beaucoup de brasseurs voient un intérêt à produire en circuit raccourci, sans parler des agriculteurs qui s'en verraient plus justement rémunérés et des consommateurs qui ne seraient plus dupés par un marketing jouant la carte locale parfois même sans brasser dans ladite région. Selon une étude menée par Mr. Bruno Montfort en 2004, 82% des brasseurs seraient désireux d'une matière première locale (Monfort 2005). Cette valeur, bien que non actualisée, donne une information sur l'implication des brasseurs dans la filière courte, d'autant plus que les tendances du marché montrent un intérêt grandissant pour la valorisation des matières premières locales.

Le prix moyen de l'orge de printemps brassicole entre 2012 et 2016 était de 174 €/tonne, auxquels il faut ajouter 35 €/tonne de frais de stockage-préparation-transport alors que le prix assurant une juste rémunération pour l'agriculteur serait de 250€ €/tonne, hors prestation du stockeur. Ce prix est calculé par rapport au prix de l'escourgeon corrigé en fonction du rendement et comprend entre 25 et 30 € de bonus/T, bonus sensé compenser les années de déclassements important. Le prix moyen de l'escourgeon fourrager entre 2012 et 2016 était quant à lui de 160 €/tonne auquel il faut ajouter 25 €/tonne de frais de stockage-préparation-transport (Terrabrew, 2016). Cette faible différence de prix n'est pas pour encourager l'agriculteur à la culture de l'orge brassicole.

Le malt quant à lui coûtait en 2016 et 2017 en moyenne 613 €/tonne pour le marché des microbrasseries. Il faut environ 17 kg de malt pour faire un hectolitre de pils de qualité et 20-25 kg de malt pour faire un hectolitre de bière spéciale. Soit 21 kg et 30 kg d'orge (coefficient de 1.25 entre l'orge en le malt) pour produire respectivement 1 hectolitre de pils et de bière spéciale. Ces chiffres

représentent un coût d'environ 5.22 € d'orge/hl de bière spéciale vendue en grande surface environ 350 €/hl, ce qui représente 0.017 € d'orge/33cl. Le même calcul appliqué avec le prix 250 €/tonne d'orge que représente une rémunération juste pour l'agriculteur mène à un coût de 0.025 € d'orge/33cl soit 0.8 centimes d'augmentation du prix de la bière. On voit clairement le faible impact du prix de la matière première dans le prix du produit fini. Bien qu'il soit peu probable que les grandes brasseries puissent se permettre cette augmentation au vu des volumes importants commandés, les petites et moyennes brasseries ne ressentiraient quant à elle pas ou peu la différence engendrée par l'emploi de matières premières issues des circuits courts. D'autant plus que la valeur ajoutée du produit fini s'en verrait augmentée, compte tenu d'une bonne communication de la part de la brasserie. (Terrabrew, 2016).

Le cœur de ce travail est d'analyser la qualité du malt artisanal en vue d'évaluer la pertinence de l'implantation de micro-structures permettant le maltage de lot beaucoup moins volumineux (1-5 tonnes). Ceci afin de faciliter le développement d'un circuit court en orge de brasserie à destination de micro-brasseurs désireux de s'inscrire dans ce mouvement.

Il est à noter que le développement d'une filière d'orge brassicole locale est soutenue par la DGO3 du Service public de Wallonie suite à l'introduction du concept de « produit wallon de qualité différenciée » dans le Décret du 19 Décembre 2002 relatif à la promotion de l'agriculture et au développement des produits agricoles de qualité différenciée. Produits qui seraient privilégiés dans la politique de soutien des productions agricoles, relancée par le communiqué de presse du gouvernement du 24/11/2016 « acheter wallon ».

L'association Terrabrew a déjà commencé le lancement de cette filière en rassemblant des agriculteurs, permettant de faire malter des lots de 80 tonnes afin d'approvisionner certaines brasseries artisanales wallonnes. Dans cette optique, il est important de pouvoir considérer un approvisionnement étranger en orge lors des mauvaises années de récoltes afin d'assurer la qualité du malt et surtout de bien communiquer cette information afin de ne pas heurter le consommateur.

2. Obligations légales liées au secteur « malterie »

D'un point de vue environnemental, Le secteur malterie n'est pas anodin quant à ces rejets car comme nous le verrons plus loin, les eaux de trempes résultantes du processus sont chargées en matières organiques et éventuellement en composés chimiques issus de l'agriculture conventionnelle. La charge de polluants contenue dans un volume d'eau peut être caractérisée par la DCO et la DBO_5 . Ces valeurs servent à fixer les concentrations maximales en polluants qu'une eau peut contenir lors de son rejet dans les eaux de surface ordinaires, dans les égouts publics et dans les voies artificielles d'écoulement des eaux pluviales. L'arrêté royal du 2 août 1985 déterminant les conditions sectorielles de déversement des eaux usées provenant des brasseries, malteries et des entreprises de conditionnement et de mise en bouteilles des boissons, dans les eaux de surface ordinaires et dans les égouts publics définit ces valeurs. Ce texte de loi est en relation avec la directive européenne du 21 mai 1991 relative au traitement des eaux urbaines résiduaires (91/271/cee).

La DCO est la demande chimique en oxygène. Il s'agit de la quantité de dioxygène consommée par les oxydants forts pour oxyder les matières organiques et minérales de l'eau, elle est exprimée en mg/l. La législation belge contraint les rejets du secteur brasserie-malterie à une valeur maximale de 200mg/l.

La DBO_5 est la demande biochimique en oxygène après 5 jours. Il s'agit de la quantité d'oxygène nécessaire aux micro-organismes aérobies pour oxyder les matières organiques dissoutes ou en suspensions dans l'eau, calculée après 5 jours à 20°C en l'absence de lumière. La législation belge contraint les rejets du secteur brasserie-malterie à une valeur de 25mg/l. On compte généralement 2.9 à 4.5 kg DBO_5 /tonne de malt fini ou 3.4 à 7.95 kg DCO/tonne de malt fini (Kunze 2014).

L'arrêté du 2 août 1985 restreint aussi le secteur malterie à 7 m³ d'effluents par tonne d'orge traitée dans le cas d'un trempage par immersion, ce qui sera le cas dans le cadre de ce travail. Il en ressort des valeurs de DCO de 486 à 1136 mg/l et de DBO_5 allant de 414 à 643 mg/l

Les malteries sont donc contraintes de mettre en œuvre un système de traitements des eaux usées avant évacuation dans les eaux de surface.

Actuellement, le traitement des eaux dans le secteur malterie se limite à un traitement par boues activées et d'un lagunage. Certains procédés plus poussés, tel que la nanofiltration et osmose inverse permettent de recycler les eaux de trempage (Guiga, 2006).

Schildbach (2005) a identifié trois caractéristiques clés d'une eau utilisable pour la trempage sans altérer le processus de maltage:

- Une conductivité de l'eau ne devant pas dépasser 2500 μ S/cm pour ne pas entraver l'absorption d'eau par le grain
- Une absence de bactéries et/ou spores afin de limiter le développement microbien lors de la trempage
- Une absence de DCO facilement dégradable par la population microbienne.

Outre les normes environnementales de rejet, il est donc important de traiter ses eaux si l'on désire les recycler.

L'obtention d'un permis d'environnement pour la mise en place d'une malterie, lorsque la quantité de céréales susceptible d'être traitée est inférieure ou égale à 50 T/jour, en zone d'habitat, nécessite:

- L'avis de la DGO4 (Direction Générale Opérationnelle de l'Aménagement du Territoire, du Logement, du Patrimoine et de l'Énergie) sur la compatibilité de l'installation et de l'activité avec le CWATUP (Code Wallon de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme, du Patrimoine) ;
- La consultation du DNF concernant la partie Natura2000 du formulaire de demande de permis ;
- La consultation du DDR (Direction du Développement Rural du Département de la Ruralité et de Cours d'Eau) pour toute demande de permis relatif à une activité ou une installation sise en tout ou en partie en zone agricole

(Source: Service publique de wallonie)

Concernant l'hygiène dans le secteur malterie, les obligations légales se limitent à la directive 39/43/CEE du 14 juin 1993 stipulant que « *les entreprises du secteur alimentaire identifient tout aspect de leurs activités qui est déterminant pour la sécurité des aliments et elle veille à ce que des procédures de sécurité appropriées soient établies mises en œuvre, respectées et mises à jour en se fondant sur les principes qui ont été utilisés pour développer le système HACCP* ». Un guide de bonnes pratiques hygiéniques existe pour le secteur malterie français permettant de se conformer aux exigences réglementaires (Gillot, 2000). Il est également important de noter que les teneurs limites en contaminants pour l'orge et pour le malt sont définis par le règlement (CE) No 1881/2006 de la

commission du 19 décembre 2006 portant fixation de teneurs maximales pour certains contaminants dans les denrées alimentaires.

3. Processus de maltage

a. L'orge

- Structure du grain d'orge

Le grain d'orge est un fruit de type caryopse. Extérieurement, on peut distinguer sur le grain d'orge plusieurs parties. La face ventrale se distingue par son *sillon ventral* tandis que la face dorsale se verra déformée lors de la croissance de la plumule à la germination. La base du grain est droite ou biseautée contrairement à l'extrémité opposée pointue et présentant une aiguille, la *barbe*. La base du grain est le siège de l'embryon, on peut y voir l'*appendice basillaire* qui est un petit axe velu au sein du sillon ventral, vestige de l'épillet de la fleur. Toujours à la base, côté dorsal, on peut voir les *lodicules*, organes membraneux également issus de la fleur. Les lodicules et l'appendice basillaire permettent l'identification des variétés.

L'intérieur du grain peut être divisé en 3 grandes parties: les *téguments*, l'*albumen* et l'*embryon* (Figure 2).

Les téguments sont constitués de 3 couches: l'*enveloppe externe*, le *péricarpe* et le *testa*. Les téguments sont globalement riches en cellulose, hémicellulose, lignine et composés phénoliques ou polyphénols (englobant les tanins).

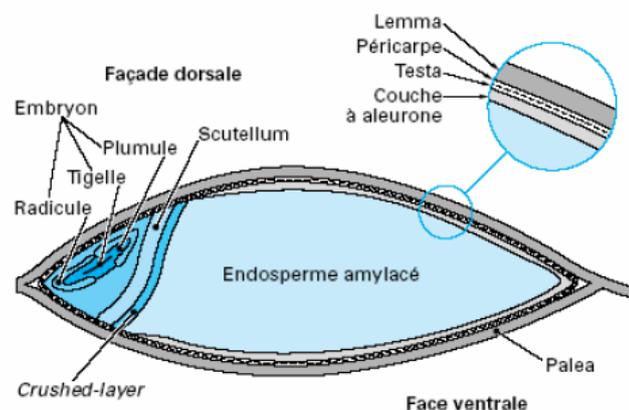


Figure 2: Coupe longitudinale du grain d'orge (Société Malteurop, 2000)

L'enveloppe externe, comprenant l'enveloppe ventrale (*pâlea*) et dorsale (*lemma*), est composée majoritairement de cellulose et contient des acides testiniques. Ce terme rassemble la fraction soluble en solution alcaline diluée et insoluble en solution acide, principalement de l'enveloppe mais aussi plus globalement du grain. Elle consiste surtout en un complexe de composés phénoliques et de protéines (Stevens, 1959) impliqué dans les troubles colloïdaux dans la bière (Hall et al., 1959). En effet, la composition des acides testiniques de l'orge et des troubles colloïdaux de la bière présentent beaucoup de similitudes, notamment en terme d'acides phénoliques et d'acides aminés (Stevens, 1959). L'enveloppe externe représente la principale protection des tissus vivants.

C'est le péricarpe, qui contient la majorité des polyphénols (Hall et al., 1959). Il agit également comme tissu de protection. C'est entre le péricarpe et l'enveloppe extérieure, sur la partie dorsale, que se développera la plumule lors de la germination.

Enfin vient le testa, constitué de 2 couches de cellules autour de l'endosperme et d'une seule couche autour de l'embryon. Il a une importance particulière de par sa semi-perméabilité. En effet, le testa permet le passage de l'eau mais pas des minéraux la constituant. Ainsi lors de la trempe, les sels présents dans l'eau ne pénétreront pas dans le grain. Cette couche est riche en lignine, en composés phénoliques et en acide férulique.

Des études ont montré que la quantité de polyphénols présente dans le grain était moins responsable de l'astringence présente dans la bière que les procédés mis en œuvre au brassage (Mcmurrough et al., 1984). En effet, un empâtage trop poussé mène à l'extraction d'une plus grande quantité de polyphénols, d'autant plus que l'eau utilisée est alcaline (Buiatti, 2009). Vanderhaegen et al. (2006) montrent que l'astringence se développe aussi suite à l'oxydation de certains composés phénoliques au cours de la conservation.

Suite à ces descriptions, on comprend mieux pourquoi une orge de qualité doit posséder des téguments aussi fins que possibles. Le malteur aura ainsi plus de facilité à tremper son orge et le malt obtenu produira des bières avec moins de troubles et une plus grande stabilité dans le temps.

L'albumen constitue le tissu de réserve nutritive du grain d'orge et peut être subdivisé en 2 parties: *l'amande farineuse (ou endosperme amylicé)*, entouré de la *couche à aleurone*.

L'amande farineuse est le tissu de stockage de l'amidon, ce dernier est contenu dans les amyloplastides des cellules. La taille des granules d'amidon présente une distribution très hétérogène. On retrouve des gros granules (20-30 μm) et des petits granules (3-5 μm), ces derniers représentant 70 à 95% du nombre total mais seulement 3 à 10% de la masse totale d'amidon. Ces proportions varient beaucoup selon les variétés et les conditions environnementales lors du développement de l'orge mais on ne retrouve jamais de grain de taille intermédiaire (Kunze, 2014). L'espace entre ces grains d'amidon est comblé par une matrice protéique représentant 2/3 des réserves protéiques totales (Crepel, 1997). Cette distribution de tailles a une influence sur le maltage et sur la qualité du malt produit. Les parois de ces cellules sont formées de la lamelle mitoyenne, entourée par une couche de β -glucanes, elle-même située à l'intérieur d'une couche d'arabinoxylanes poreuse (Figure 3) (Charles et al., 2001)..

Au sein de cette couche poreuse, on retrouve des acides organiques (acétique, férulique,...) liés aux hémicelluloses. Ce sont ces couches qui seront dégradées lors du maltage afin d'accéder au contenu amylicé, leur épaisseur dépend de la variété d'orge mais également des conditions environnementales lors de la croissance du grain. Les variétés brassicoles présentent des épaisseurs moindres que les variétés fourragères

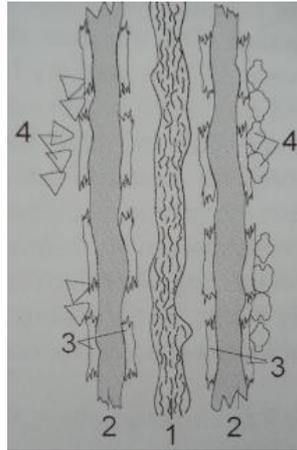


Figure 3: structure des parois des cellules amyloacées (Kunze 2014)
 (1) lamelle moyenne
 (2) couche de β -glucanes
 (3) couches d'arabinoxylanes
 (4) acides organiques

La couche à aleurone consiste en une couche de 3 ou 4 cellules d'épaisseurs, réduite à 1 cellule autour de l'embryon, très riche en protéines (1/3 des réserves) et en globules lipidiques mais dépourvue d'amidon. Ces cellules sont spécialisées dans la formation d'enzymes hydrolytiques, lors de la germination, destinées à dégrader les polymères de l'amande farineuse.

Enfin l'embryon, situé à la base du grain, est le siège des activités vitales. Il contient les différentes parties de la future plante qui sont la *tigelle*, la *radicule* et la *plumule*. Lors de la croissance, l'embryon formera des hormones (acide gibbérellique) qui atteindront la couche à aleurone, stimulant la formation des enzymes hydrolytiques en plus de celles formées par l'embryon lui-même.

L'embryon est séparé de l'albumen par le *scutellum* et l'*épithélium*. Le scutellum a une fonction de sécrétion et permet la diffusion des enzymes produites par l'embryon vers l'albumen.

- Composition en glucides

L'orge contient 78 à 85% en matière sèche (MS) de glucides, on retrouve ainsi l'amidon, les sucres simples, la cellulose, les hémicelluloses et les gommés (Allosio-Ouarnier, 1999).

L'amidon de l'orge se compose à 25% d'amylose et 75% d'amylopectine (Guiga, 2006) pour un total de 63% MS (Kunze, 2014). L'amylose est un polymère linéaire de glucoses (500-2500 unités) liés en α -(1-4) tandis que l'amylopectine se définit comme de l'amylose ramifié par des liaisons α -(1-6) (10 000-100 000 unités de glucose). L'amidon sera dédoublé lors du brassage en malto-dextrines non fermentescibles et en maltoses fermentescibles. Il constitue donc l'extrait potentiel du malt. L'amidon est stocké dans l'amande farineuse.

L'orge contient peu de sucres simples (1,1-2,2% MS), majoritairement du saccharose. Ils servent de source d'énergie pour le développement du germe et sont donc présents en plus grande quantité (6-9% MS) suites aux hydrolyses ayant lieu lors du processus de maltage. Ces sucres simples se retrouvent dans l'embryon et ont peu d'importance.

La cellulose est présente à 4-5% MS (Allosio-Ouarnier, 1999) et située exclusivement dans les enveloppes. Il s'agit d'un polymère de D-glucose lié en β -(1-4) qui n'est pas dégradé par les enzymes lors du maltage et demeure ainsi insoluble au brassage.

Les hémicelluloses se différencient de la cellulose par leur composition plus complexe et surtout plus variable. Elles représentent 8-10% MS (Allosio-Ouarnier, 1999) et ses deux constituants principaux dans l'orge sont les β -glucanes et les arabinoxylanes. Cependant, leurs proportions diffèrent selon l'endroit dans le grain, c'est pourquoi on s'en réfère séparément plutôt que de parler des hémicelluloses. Les parois des cellules de l'amande farineuse sont constituées de 75% de (1-3,1-4)- β -D-glucanes et de 20% d'arabinoxylanes tandis que les parois des cellules à aleurones sont constituées de 71% d'arabinoxylanes et 26% de (1-3,1-4)- β -D-glucanes (Jamar et al., 2011). Ces deux composés sont hydrolysés par les enzymes lors de la germination afin d'affaiblir les parois cellulaires, facilitant d'une part la migration desdites enzymes et d'autre part l'accessibilité de l'amidon. On parle de la désagrégation du malt, ces hydrolyses vont conditionner le rendement potentiel du malt via l'accessibilité de l'amidon lors du brassage.

- **Composition en matières azotées**

La teneur en protéines de l'orge brassicole doit être comprise entre 9 et 12% de la MS. Cette limite inférieure permet d'avoir suffisamment de matières azotées pour le développement des levures en fermentation et d'assurer une bonne tenue de la mousse tandis que la limite supérieure permet de limiter les troubles dans la bière et la diminution de l'extrait du malt. On peut classer les protéines de l'orge selon la méthode d'Osborne, se basant sur leur solubilité:

Les albumines sont la classe de protéines qui sont solubles dans l'eau pure mais coagulables à la chaleur. Elles représentent 11% des protéines totales (Kunze, 2014). On peut citer les protéines Z ainsi que les « *lipid transfert proteins* » (LTPs) (Loffet, 2007) qui sont toutes deux des protéines influençant fortement la tenue de la mousse (Siebert et al., 1997). En effet, ces protéines subissent des transformations telles que des glycations, des acylations dans le cas des LTPs et leur déploiement lors de l'ébullition, ce qui leur confère un caractère plus amphiphile et modifie leur comportement à l'interface air-liquide (Bobálová et al., 2010). Les principales protéines métaboliques font partie des albumines.

Les globulines sont la fraction protéique soluble dans les solutions salines, elles comptent pour 15% des protéines totales (Kunze, 2014). Ce sont des protéines de stockage de l'orge et sont surtout retrouvées dans l'amande farineuse. Ces protéines ne sont pas totalement précipitées à l'ébullition et contribuent à la formation de troubles dans la bière par réaction avec les polyphénols. Cependant, tout comme les albumines, certaines globulines participent activement à la tenue de la mousse.

Les glutelines, ou hordénines pour l'orge, sont les protéines solubles en milieu alcalin. Elles comptent pour 30% des protéines totales (Kunze, 2014). Ce sont des protéines de stockage qui semblent avoir peu d'influence sur la qualité de la bière (Hayes P.M et al., 2002) et sont surtout retrouvées dans la couche à aleurone. Il s'agit de la fraction extraite des drêches en vue de valorisation (Janneke Treimo et al., 2008)

Enfin, les prolamines, ou hordéines pour l'orge, sont les protéines solubles dans l'alcool. Elles comptent pour 35 à 50% des protéines totales (Kunze, 2014). Ce sont les principales protéines de stockage de l'orge qui sont fortement dégradées lors du maltage. Shewry et al. (1980) n'ont pas su mettre en évidence de différence de qualité brassicole selon le profil hordéique. Mais certaines études plus récentes montrent que les protéines impliquées dans les complexes polyphénol-protéine, responsables du trouble colloïdal dans la bière, dérivent des hordéines (Aron et al., 2010).

Les protéines de stockages sont hydrolysées lors de la germination pour fournir à l'embryon la source d'azote nécessaire à sa croissance. Les grands polypeptides riches en proline seront plus susceptibles

de s'associer aux polyphénols et créer des troubles dans la bière tandis que les petits polypeptides hydrophobes auront un effet positif sur la tenue de la mousse.

- **Composition en lipides**

L'orge contient en moyenne 3,5% MS de lipides (Briggs, 1998), principalement des acides gras, retrouvés dans la couche à aleurones(60%), dans l'embryon (33%) et dans l'amande farineuse (7%) (Briggs, 1998). Les principaux sont les acides linoléique (52%), oléique (28%), palmitique (11%) et, en petite quantité, stéarique et myristique (MacLeod et al., 1961). Les acides gras insaturés sont particulièrement importants pour la structure des membranes des levures mais sont plus sensibles aux lipoxygénases de l'orge ainsi qu'à l'auto-oxydation dépréciant fortement la qualité de la bière. Les lipides de plus grosse masse moléculaire restent dans les drêches après filtration, ce qui contribue à leur valeur nutritive pour le bétail. On considère qu'une moyenne de 10mg/l de lipides se retrouvent dans la bière (De Clerck, 1963).

- **Les enzymes**

Les enzymes sont des protéines majoritairement inclus dans les albumines et globulines. Il en existe une certaine proportion dans l'orge (Figure 4) mais pas suffisamment pour permettre l'hydrolyse des différentes matières. C'est lors du maltage que la majorité des enzymes seront sécrétées.

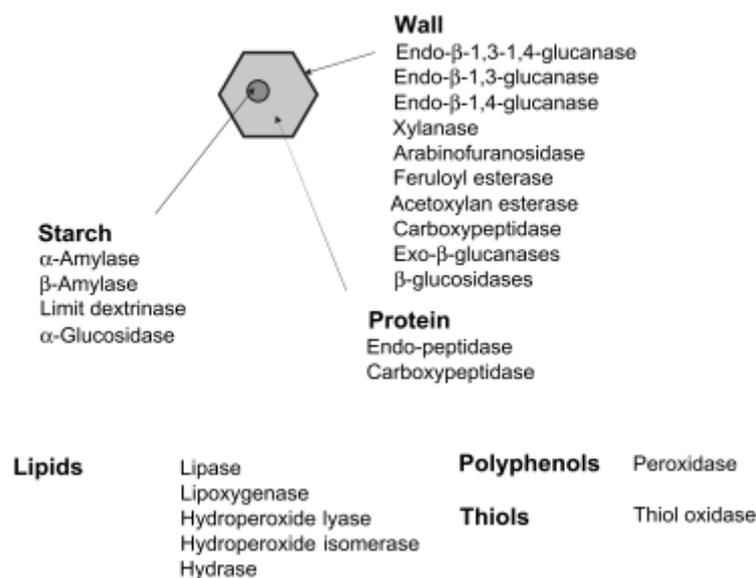


Figure 4: Enzymes clés du malt (C. W. Bamforth 2009)

Hydrolyse de l'amidon: il existe 4 principales enzymes dégradant l'amidon, l'α-amylase et la β-amylase, la limite dextrinase et l'α-glucosidase, ces deux dernières intervenant peu lors du brassage.

L'α-amylase est l'endoenzyme capable de dégrader l'amylopectine, on parle de la capacité de liquéfaction. Elle est absente de l'orge et se forme majoritairement au 3^e et 4^e jour de germination. Elle est, avec la β-amylase, exoenzyme cette fois, le principal outil du brasseur pour la saccharification de l'amidon. Son optimum de température au brassage se situe à 72°C et permet de former des dextrans non fermentescibles, donnant ainsi des bières avec plus de sucres résiduels (De Clerck 1963).

La β -amylase quant à elle permet de dégrader l'amylose et fait donc suite au travail de l' α -amylase. Elle est déjà présente en quantité importante dans l'orge mais se forme principalement à partir du 2^e jour de germination. Son optimum de température au brassage est de 63°C (De Clerck 1963) et permet de former des sucres fermentescibles, principalement du maltose. Favoriser le travail de cette enzyme au court du brassage donnera une bière plus sèche.

Une quantité insuffisante de l'une ou l'autre de ces enzymes conduira à une saccharification trop lente, voire à une perte de rendement.

La limite dextrinase permet d'hydrolyser les liaisons α -(1-6) de l'amylopectine et atteint son maximum au 5^e jour de germination (Bamforth, 2009). Cette enzyme se trouve sous une forme inactive lors du brassage ce qui la rend moins importante (MacGregor et al., 1994). Il est cependant possible de jouer sur son activité en prolongeant la germination, l'amylopectine sera alors davantage dégradée et le malt donnera plus de sucres fermentescibles.

L' α -glucosidase est la moins connue des enzymes amylolytiques. Son importance est limitée au maltage car très thermolabile (Muslin et al., 2000).

Hydrolyse des glucides structuraux: L'un des objectifs les plus importants du maltage est de désagréger le grain d'orge par l'affaiblissement des parois des cellules amyloacées afin de rendre l'amidon disponible pour le brassage. Comme nous l'avons vu plus haut, les principaux composants de ces parois cellulaires sont les β -glucanes et les arabinoxylanes.

Les arabinoxylanes sont séparés de leurs résidus d'acides organiques par l'acetoxylyl esterase et la feruloyl esterase (Sun et al., 2005) et ensuite hydrolysés par l'arabinofuranosidase qui enlève les résidus α -L-arabinofuranoses de la chaîne principale. Cette dernière est ensuite hydrolysée par 3 isozymes de type endoxylyanases en oligosaccharides de type xylanes et arabinoxylanes. Il est fort probable que les résidus xyloses soient ensuite hydrolysés et rapidement utilisés par le germe (Briggs, 1998).

Plusieurs enzymes sont impliquées dans l'hydrolyse des β -glucanes. L'endo- β -1,3-1,4-glucanase dégrade les β -glucanes pour donner des oligosaccharides portant des résidus glucosyl. Ces sous-produits sont dégradés par l'endo- β -1,3-glucanase et l'endo- β -1,4-glucanase (Bamforth, 2009). Enfin, les exo- β -glucanases et les β -glucosidase relâchent du glucose à partir des terminaisons non réductrices (Jamar et al., 2011)

On parle, pour la dégradation de ces deux composés, de cytolyse. Cette dernière conditionne la durée de germination car un grain insuffisamment désagrégé provoquera de nombreuses complications au brassage: perte de rendement, problèmes de filtration et troubles dans la bière (Cyran et al., 2002).

Hydrolyse des protéines: la composition en acides aminés libres, peptides et polypeptide a une influence primordiale sur la qualité de la bière notamment pour le développement des levures mais aussi pour le comportement de la mousse, des troubles et du moelleux de la bière. On classe les protéases en deux classes, les endoprotéases et les exoprotéases.

Les endoprotéases vont permettre de cliver les protéines et polypeptides en molécules plus petites. On les classe selon leur site d'action, le substrat et les inhibiteurs spécifiques: sérine-protéases, cystéine-protéases, aspartique-protéases et métalloprotéases (Loffet, 2007). On compte actuellement plus de 40 endoprotéases réparties dans ces 4 classes (Bamforth, 2009). Jones et al.

(2005) ont montré que, sur les 4 classes d'endoprotéases, seules les sérine-protéases n'avaient pas d'influence sur la solubilisation des protéines.

Les exoprotéases sont les carboxypeptidases et les amino-peptidases. Les amino-peptidases jouent cependant un rôle mineur car sont actives à un pH très élevé. Les carboxylpeptidases quant à elles relâchent des acides aminés libres en clivant des liaisons peptidiques C-terminal ou N-terminal en fin de chaîne. (Briggs et al., 1981)

Jones & Budde (2005) ont déterminé que 32% des protéines étaient déjà sous forme soluble dans l'orge, 46% seraient relâchées lors de la germination et les 22% restant seraient solubilisées lors de l'empâtage.

Hydrolyse des lipides: Les lipides de l'orge sont dégradés lors du maltage par la lipase en acides gras libres, principalement (poly)insaturés. Ces acides gras libres peuvent ensuite être oxydés lors de l'empâtage par les lipoxygénases en des composés intermédiaires sensibles à l'auto-oxydation, d'autant plus qu'ils comptent d'insaturations. Ces dégradations donnent lieu à des goûts indésirables et à une faible stabilité de la bière dans le temps (Kunze, 2014).

- **Les polyphénols**

Les polyphénols sont des molécules organiques présentant au moins 2 groupes phénoliques. Ils sont des métabolites secondaires des plantes retrouvés principalement dans les enveloppes en ce qui concerne l'orge. La quantité dépend donc de l'épaisseur des enveloppes qui varie fortement entre les orges de printemps et d'hiver. Ces composés ont un rôle important dans la qualité de la bière mais sont encore sujets à de nombreuses controverses. 80% des polyphénols présents dans la bière proviennent du malt, les 20% restant proviennent du houblon (Callemien et al., 2008)

On retrouve environ 80 composés phénoliques dans la bière dont les principaux sont des flavanoïdes et des proanthocyanidines (Aron et al., 2010).

Les polyphénols sont connus pour leur capacité à former des complexes avec les protéines, entraînant la formation d'un trouble colloïdal dans la bière et particulièrement à froid. Tous les polyphénols ne sont pas impliqués dans ces réactions (Lewis et al., 1979).

On attribue cependant aux composés phénoliques des propriétés anti-oxydantes notamment le flavan-3-ol et les proanthocyanidines (Floridi et al., 2003). C'est là qu'intervient la controverse car certains composés phénoliques sont quant à eux pro-oxydants s'ils subissent une réaction réduction catalysée par du fer ou du cuivre (Galati et al., 2004).

Finalement, les polyphénols sont également impliqués positivement dans la tenue de la mousse, la stabilité des arômes et de la couleur (Dvorakova et al., 2008).

On retrouve dans les bières de type *Lager*, dont la brillance est un critère primordial, de 50 à 150 mg de polyphénols/L (Aron et al., 2010).

b. Conditionnement de l'orge

Afin d'assurer le bon déroulement des étapes de maltage, il est important de préparer et de stocker l'orge dans les meilleures conditions possibles. Un mauvais stockage peut conduire à une diminution du pouvoir germinatif ou de l'énergie germinative, conduisant à une germination hétérogène et donc à un malt de mauvaise qualité.

Afin d'assurer l'homogénéité des transformations se déroulant au maltage, la dormance de l'orge doit être levée. Les paramètres liés à cette dormance diffèrent d'une variété à l'autre et selon les conditions de récolte (De Clerck, 1963) mais ne posent généralement pas de problème au maltage. La dormance est levée par une maturation de quelques semaines, or la campagne de maltage de la saison précédente (orge d'hiver et de printemps) n'est pas terminée lorsque la récolte a lieu, ce qui laisse du temps pour la levée de la dormance. De plus, le séchage et/ou refroidissement de l'orge pour son stockage ont pour effet de lever plus rapidement cette dormance.

L'orge récoltée subit dans un premier temps un nettoyage et un calibrage visant à purifier le lot avant stockage. Ces opérations incluent

- L'élimination des poussières et impuretés par tamisage et ventilation.
- L'élimination des impuretés de taille équivalente au grain à l'aide d'un trieur
- Le calibrage de l'orge nettoyé à l'aide d'un tamis (De Clerck, 1963)

A une échelle artisanale, le nettoyage et le calibrage se font par l'utilisation d'un séparateur à céréale couplé à un cyclone. Comme nous le verrons plus loin dans les analyses, cette préparation sommaire s'avère être suffisante pour la qualité du malt.

Une fois préparée, l'orge peut être stockée. Les conditions de stockage influenceront fortement la vitalité de l'embryon et donc le malt en résultant. Les 2 facteurs de stress diminuant la vitalité de l'embryon sont la respiration anaérobie et le développement de moisissures, lié à l'activité d'eau (De Clerck, 1963).

La respiration anaérobie, ou fermentation, se caractérise par un blocage des réactions de respiration aérobie à des stades intermédiaires menant à l'accumulation d'aldéhydes, alcools, acides organiques et esters affaiblissant et tuant le germe (De Clerck, 1963). On comprend donc toute l'importance de bien aérer le grain. Cependant la respiration constitue des pertes via l'utilisation des réserves d'amidon et est d'autant plus importante que le grain est humide (Tableau 1) et que la température est élevée. Le Tableau 1 illustre bien l'explosion de la respiration au-delà de 15 % d'humidité relative. On comprend donc toute l'importance d'un séchage optimal des céréales pour leur stockage (attention à la température pour ne pas attaquer la vitalité du grain).

Tableau 1: Dioxyde de carbone produit par kg de malt en 24h à 20°C en fonction de l'humidité du grain (Kunze, 2014)

Humidité (%)	CO ₂ Produit (mg)
11.0	0.3
12.0	0.4
14.0-15.0	1.4
17.0	100
19.6	123
20.5	359
30.0	2000

Au-dessus de 15% d'humidité, le grain doit impérativement être séché pour garantir une qualité constante dans le temps. La température joue également un rôle mais dans une moindre mesure si inférieure à 25°C (Tableau 2).

Tableau 2: Durée de conservation de l'orge, assurant un pouvoir germinatif supérieur à 95%, en fonction de son humidité (De Clerck, 1963)

Humidité de l'orge (%)	Durée de conservation, en semaine, à la température de					
	7°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C
22	4	2.5	1	-	-	-
21	6.5	4	2	1	1	-
20	10	6	3	2	1.5	1
19	18	10	4	2.5	2	1.5
18	30	17	6.5	3.5	2.5	2
17	>30	27	12	4.5	3	2.5
16	>30	>30	21	10	4.5	3
15	>30	>30	>30	21	12	7
14	>30	>30	>30	>30	23	17

Outre la perte de vitalité des grains, de mauvaises conditions de stockage peuvent mener à la prolifération de micro-organismes. Le microbiote de l'orge peut être séparé en 2 types, celui issu du champ et celui issu des manipulations post-récolte (ou de stockage).

Le microbiote issu du champ est principalement constitué des genres *Alternaria*, *Cladosporium*, *Epicoccum*, *Fusarium* (Campbell, 2003) et majoritairement dépendant des conditions climatiques. Ces micro-organismes se développent à la surface du grain mais également entre l'enveloppe et le péricarpe. Cependant, la plupart de ceux-ci sont non pathogènes. Le représentant le plus préoccupant ces dernières années est *Fusarium graminearum* en raison sa de recrudescence et de son impact sur la qualité du malt résultant. En effet, les mycotoxines, principalement les hydrophobines deoxynivalenol (DON) (Müller et al., 2012) produites par ce micro-organisme impactent la couleur, la saveur, la texture et les propriétés moussantes de la bière par altération des composés azotés solubles. Une présence importante de *Fusarium graminearum* lors de la récolte ou du maltage est en lien étroit avec le phénomène de « gushing » dans la bière (Laitila, 2015), bien qu'il n'en soit pas la cause exclusive. De plus, Schwarz et al. (1995) ont montré une corrélation négative entre la masse volumique des grains et la présence de DON. Il est cependant aisé de limiter le développement du microbiote issu du champ par l'abaissement de l'humidité du grain sous les 18% (Laitila, 2015).

Le microbiote de stockage, issu de contaminations croisées post-récolte, est quant à lui composé principalement des genres *Aspergillus*, *Eurotium*, and *Penicillium*. Ces micro-organismes, contrairement à ceux en provenance du champ, sont capables de se développer sur le grain à une humidité de 13-14%. Il est également prouvé que les genres *Penicillium* et *Aspergillus* sont également producteurs d'hydrophobines impliquées dans le phénomène de gushing (Sarlin et al., 2005).

Il est important d'optimiser les conditions de stockage de l'orge car ces micro-organismes sont susceptibles de se développer lors des étapes de trempage et de germination au maltage. Ils seront en grande majorité détruits lors du tourillage mais les mycotoxines alors présentes ne pourront être éliminées. Le cumul des mauvaises conditions de stockage et du développement microbien au maltage conduit inévitablement à la dépréciation du malt et de la bière obtenue.

Il est communément admis qu'un séchage à 14% d'humidité permet de conserver l'orge sur une longue période et qu'un séchage à 12.5% permet d'éviter toute croissance de micro-organismes filamenteux (Campbell, 2003).

Les teneurs maximales en mycotoxines sont spécifiées par le règlement (CE) No 1881/2006 de la commission du 19 décembre 2006 portant fixation de teneurs maximales pour certains contaminants dans les denrées alimentaires.

c. La trempe

La trempe a pour objectif d'augmenter l'humidité du grain, jusqu'à 43-44% dans le cas de malt pâle, afin d'initier la germination. Dans l'orge stockée, la quantité d'enzyme ainsi que leur activité sont très réduites, cette absorption d'eau va permettre d'activer leur synthèse et leur activité à travers le processus de germination. Il est important de noter que la capacité hydrolytique (capacité d'hydrolyser les macro-molécules de l'orge) d'un malt n'atteint pas son maximum pour une absorption d'eau maximum, il s'agit d'un optimum (Mayolle et al., 2012).

Une fois les processus vitaux enclenchés, la respiration augmente et il est important d'apporter au grain suffisamment d'oxygène et d'éliminer le CO₂ produit afin de ne pas asphyxier le germe, la trempe est donc traditionnellement composée de phases sous eau et de phases sous air. Cependant, l'aération permet la croissance du germe, augmentant les pertes dues au maltage (freinte). T-M. Enari et al. (1961) ont montré que, pour une orge dont la dormance est levée, une trempe anaérobie retarde la croissance du germe mais n'allonge pas la durée de la germination pour atteindre un malt suffisamment désagrégé. Cette technique permettrait de diminuer la freinte de 1%.

La vitesse d'absorption d'eau dépend de sa température, du temps de trempe, de la taille des grains, de leur variété et de l'année de récolte. Le malteur va donc ajuster la trempe à sa matière première en jouant principalement sur le temps et la température, les grains étant préalablement calibrés pour assurer l'homogénéité du maltage.

Au sein du grain, l'eau est absorbée principalement par le germe et évolue vers l'endosperme dans un second temps. Cette absorption n'est pas linéaire, elle est importante pendant les premières heures et diminue ensuite (Figure 5). La température de l'eau, quant à elle, va conditionner la durée de la trempe, il faudra de l'ordre de 100h à 5°C, 75h à 10°C et 50h à 15°C pour atteindre une humidité de 42% au sein du grain ((Kunze 2014). Néanmoins, des températures de trempe plus élevées sont corrélées avec des rendements plus faibles et des filtrations plus lentes (Reeves et al., 1980). De plus, la flore présente sur les grains se développera d'autant plus que la température est élevée, ce qu'il est important d'éviter. La trempe est généralement réalisée à température de puits, c'est-à-dire 12-14°C.

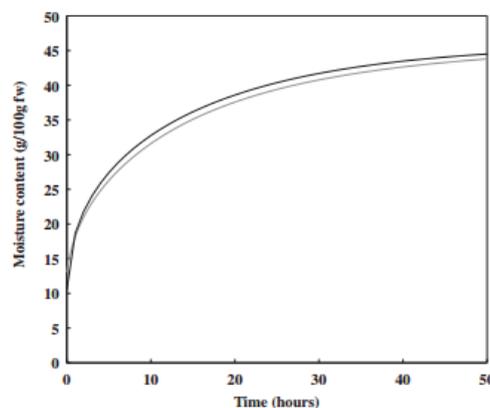


Figure 5: Exemple de courbe d'absorption pour la variété "Sebastian" (Mayolle et al., 2012)

La trempage représente 90% de la consommation d'eau d'une malterie, 4 à 7m³ d'eau sont nécessaires pour la trempage d'une tonne d'orge dont 0.94m³ seulement pénétreront dans le grain. En effet, en plus d'initier la germination, la trempage sert également à nettoyer le lot à malter. Les grains sont versés dans la cuve remplie d'eau et non l'inverse afin de séparer les impuretés par flottaison. De plus, l'eau est remplacée 2 à 3 fois lors du processus afin de laver les grains. L'eau de trempage comporte des composés issus des enveloppes (acides organiques, polysaccharides, composés phénoliques, gommages...), des mycotoxines mais aussi des composés chimiques issus des techniques culturales (Guiga 2006). Ainsi, après les 6 premières heures de trempage, le grain aura perdu entre 0.6 et 1.5% de sa matière sèche (Guiga, 2006). Rappelons-nous que le testa est semi-perméable, les pertes sont donc limitées aux enveloppes.

Comme mentionné plus haut, on compte généralement 2.9 à 4.5 kg DBO_5 /tonne de malt fini ou 3.4 à 7.95 kg DCO/tonne de malt fini (Kunze, 2014).

Une malterie recyclant ses eaux de trempage peut abaisser la consommation d'eau de trempage à 3.5m³/tonne d'orge en réutilisant l'eau du 3^e cycle voire du second, l'eau de la première trempage étant trop chargée. Ce recyclage implique cependant un risque de contamination croisée, c'est pourquoi il n'est que très peu appliqué.

d. La germination

Lors de la germination de l'orge, l'embryon va se développer en puisant dans sa réserve d'énergie qu'est l'endosperme. Cette réserve va permettre à la plante de se développer jusqu'à ce qu'elle soit en mesure de photosynthétiser. Cependant, l'amidon n'est pas si aisément accessible, c'est pourquoi il y a une production importante d'enzymes lors de cette étape qui vont permettre de dégrader les macromolécules afin de les rendre utilisables par l'embryon. Le malteur a donc recours à un processus naturel pour transformer l'orge en malt mais celui-ci doit être maîtrisé pour garantir la qualité du malt comme nous allons le voir plus loin.

L'étape de germination peut être divisée en 3 processus: la synthèse d'enzymes, les changements métaboliques et la croissance de la plante.

Suite à l'absorption d'eau, l'embryon va relâcher un facteur de croissance, l'acide gibbérellique (Figure 6). Ce dernier va migrer jusqu'à la couche à aleurone, initiant la synthèse des enzymes décrites plus haut: enzymes amylolytiques, cytolitiques, protéolytiques, lipolytiques,... Il est important de noter que l' α -amylase n'est pas présente dans le grain d'orge non germé, elle est principalement synthétisée à partir du 3^e et 4^e jour de germination (Figure 7).

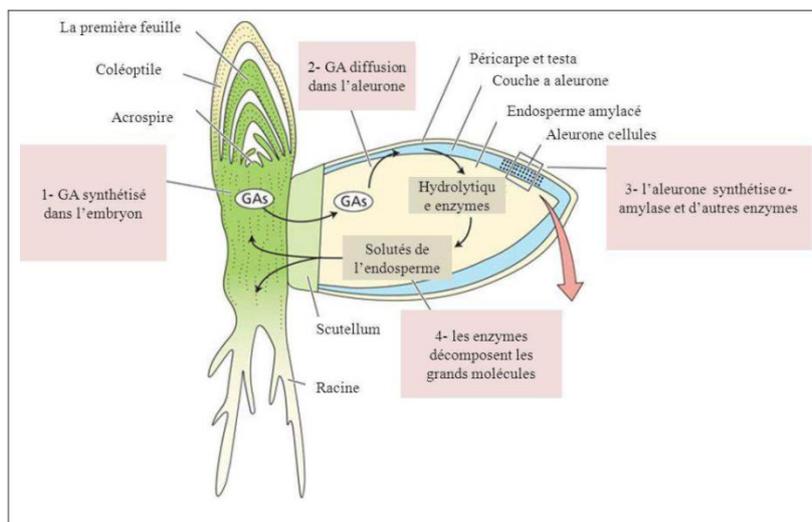


Figure 6: Structure d'un grain d'orge en germination et les processus biochimiques (Ajib 2013)

Ces enzymes vont entraîner des changements métaboliques importants, au sein de l'endosperme notamment. La transformation la plus importante et nécessitant le plus de contrôle de la part du malteur est la dégradation des parois des cellules amylicées (Figure 8). En effet, il est important que les hémicelluloses soient suffisamment dégradées pour permettre d'extraire l'amidon lors du brassage et d'éviter tout problème de filtration. Cette dégradation est progressive, elle démarre à partir du scutellum et évolue jusqu'à la pointe du grain.

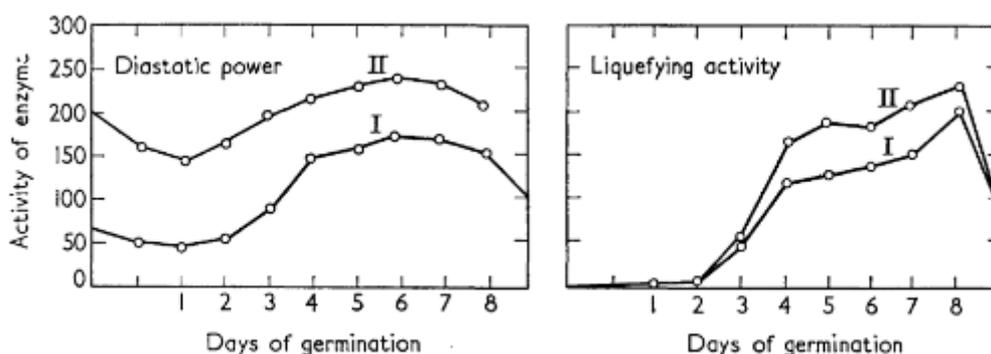


Figure 7: Evolution du pouvoir diastasique (β -amylase) et de la capacité de liquéfaction (α -amylase) de l'orge au court de la germination (Lüers et Rümmler, 1933). I- extraction par solution saline ; II-extraction à l'aide de la papaïne.

Parallèlement à ces modifications s'opèrent aussi des changements physiologiques. Les radicelles vont se développer pour atteindre environ 1.5 fois la longueur du grain en fin de germination, tandis que la plumule, que l'on verra apparaître et grandir le long de la face dorsale, entre l'enveloppe externe et le péricarpe, devrait atteindre 2/3 voire 3/4 de la longueur du grain. Ces changements ainsi que l'évolution de la dégradation de l'endosperme sont des indicateurs permettant au malteur d'adapter et de terminer les conditions de germination. Lorsque la plumule sort des enveloppes externe, le grain est appelé « hussard ». La présence de hussards indique une germination trop poussée suite à une température excessive, entraînant une freinte beaucoup trop importante.

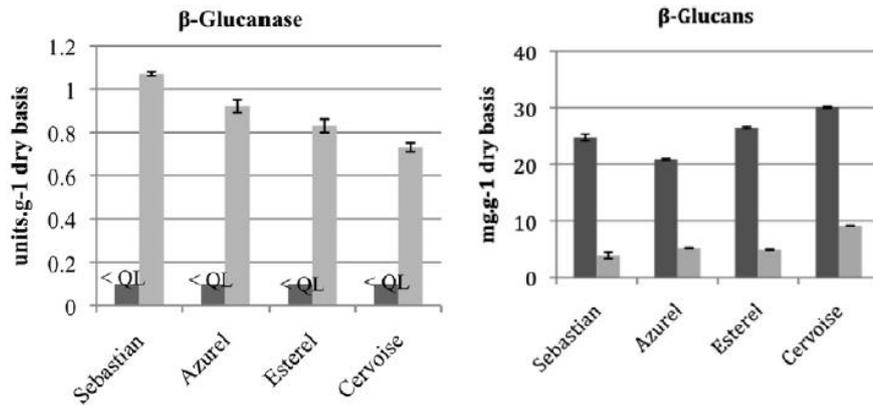


Figure 8: Evolution de la quantité de β-glucanase et des β-glucanes avant (gris foncé) et après maltage (gris clair) (Mayolle et al. 2012)

Les facteurs influençant la germination sont: la température, l'aération, l'humidité et la durée.

La germination est un phénomène exothermique. Laissé à lui-même, un tas de grains en germination de 15 cm d'épaisseur dans une atmosphère à 15°C peut aisément monter jusqu'à 28°C. Bien qu'une température élevée permette une germination plus rapide, une température plus basse assure un bon développement enzymatique, tout comme mentionné pour la trempé. On préconise pour les malts pâles de ne pas dépasser 18°C et pour les malts foncés de ne pas dépasser 23°C (De Clerck, 1963).

L'aération est, avec la température, le facteur le plus important sur lequel le malteur va jouer. Comme toujours, il est important que le germe ne soit pas asphyxié, il est donc indispensable d'aérer le grain pour évacuer le CO₂ accumulé en raison de la respiration. Cependant, la freinte augmentera d'autant plus que le germe se développe, ce que le malteur veut éviter. Une atmosphère plus pauvre en oxygène assurera donc un développement limité du germe, permettant de pousser les dégradations enzymatiques tout en limitant la freinte.

L'humidité du grain, de 43-44% après la trempé (malt pâle), décroît d'environ 0.5% par jour de germination (Narziss, 1970) mais varie fortement selon l'humidité de la pièce, la température de l'air qui se chargera d'humidité en se réchauffant au contact du grain et l'intensité de la respiration. L'activité biologique du grain participe au maintien de cette humidité car elle implique une évaporation de l'eau qui se condense dans le tas en germination, permettant de conserver une part de l'eau perdue. L'arrosage du tas peut être envisagé s'il s'assèche trop fortement.

Enfin, le temps de germination dépendra des facteurs précédents mais également de la variété d'orge utilisée. Il varie généralement de 4 à 6 jours.

Suite à ces explications, on peut aisément comprendre que mener à bien une germination est une question de compromis. De plus, lorsque la germination est menée sur le sol, comme c'est le cas pour beaucoup de microstructures, la température est régulée en retournant le tas régulièrement, ce qui a pour conséquence d'oxygéner le grain en germination et donc d'augmenter la freinte. Il n'est donc pas aisé de maintenir une température idéale.

Une importance particulière est portée sur la formation de DMS (diméthylsulphure) et surtout de ses précurseurs lors de la germination. Ce composé donne à la bière un goût indésirable de choux et doit donc être évité au maximum. Il y a deux voies de synthèse du DMS:

Durant la germination, un précurseur inactif peut être formé, le S-méthyl méthionine (SMM) qui sera transformé en précurseur actif, le DMS-P, et ensuite en DMS sous l'action de la chaleur au touraillage ou à la cuisson du moût. Cependant, le DMS est volatil et peut être évacué sous l'effet de cette même température si elle est maintenue suffisamment longtemps, ce qui peut poser problème pour les malts très pâles ou les malts diastasiques pour lesquels l'exposition thermique est limitée. Le DMS-P restant sera métabolisé par les levures en DMS, ce qui confèrera un arôme déplaisant à la bière.

La seconde voie fait intervenir le diméthyl sulphoxide (DMSO). Ce composé, beaucoup moins volatil que le DMS, peut également être formé par oxydation du DMS au touraillage (Anness et al., 1979). Etant moins volatile, le DMSO reste dans le moût après cuisson et sera réduit par la levure en DMS (Dickenson, 1983).

Les conditions favorisant la synthèse de ses précurseurs, et dans une moindre mesure du DMS lui-même, sont une humidité du grain trop importante après la trempé, couplée à une germination à température trop élevée (>25°C) (Kavanagh et al., 1976). Une grande partie de ces composés sont cependant stockés dans les radicules qui seront évacuées ultérieurement. La part restante sera en partie éliminée lors du touraillage du malt et lors de la cuisson du moût mais, comme nous le verrons plus loin, un compromis « temps-température » doit également être respecté lors du touraillage. Il est donc préférable d'éviter la formation de ces composés plutôt que de tenter de s'en débarrasser par la suite.

e. Le touraillage

Le touraillage consiste à chauffer le malt vert (issu de la germination) afin d'abaisser son humidité sous les 5%, ce qui a pour effet de stopper les réactions dues à la germination. Le profil de température, la durée, l'humidité initiale et le pH sont les facteurs influençant les caractéristiques du malt résultant en termes d'arômes et de couleur.

Le touraillage peut être décomposé en deux phases: une phase de séchage stationnaire suivie d'une phase plus courte et plus intense appelée « coup de feu ».

Lors du séchage, la température au sein de la couche ne devra pas dépasser 55°C. En effet, lorsque le grain est encore humide, une température supérieure aura pour effet de dégrader les enzymes présentes dans le malt et nécessaires lors du brassage. De plus, appliquer une température trop élevée sur l'amidon encore humide provoquera sa gélatinisation (60°C) et, après refroidissement, donnera des grains vitreux dont l'amidon ne pourra être transformé, résultant en des difficultés de broyage, saccharification, d'extraction et de filtration. On veillera donc à ne pas dépasser 55°C jusqu'à abaissement de l'humidité à 10-12%. Lors de cette étape, les enzymes seront très actives car beaucoup plus proches de leur optimum de température (Hämäläinen et al., 2007), il est donc important, pour un malt pâle, d'assurer un séchage le plus rapide possible pour ne pas sur-désagréger le malt.

Le coup de feu permet d'apporter au malt sa couleur et son arôme grâce aux réactions de Maillard faisant réagir une combinaison de sucres avec des acides aminés. Les composés aromatiques et colorés qui en résultent sont les mélanoïdines. Pour cette seconde phase, la température est montée à 80-90°C pour les malts pâles mais pouvant aller jusqu'à 220°C pour des malts torréfiés. Cette température a également pour effet de tuer le germe empêchant toute évolution de la qualité du malt. L'exposition thermique du malt se réfère à la quantité d'acide thiobarbiturique (TBA) via une valeur adimensionnelle qui doit être inférieure à 14 pour un malt pâle. Cette valeur assure une

couleur pâle, un arôme de malt léger et une stabilité organoleptique de la bière car certains composés de Maillards, comme les aldéhydes de Strecker, sont connus pour leur instabilité dans la bière finie et leur implication dans le rancissement. À la fin du coup de feu, certaines enzymes auront été totalement ou partiellement dégradées. Ainsi, on observe une diminution de l'activité enzymatique du malt fini de 40% pour la β -amylase et la limite dextrinase, de 20 à 40% pour l'endo- β -glucanase ou encore de 50 à 70% pour l'exo- β -glucanase. Cependant, l'activité des enzymes les plus thermostables sera augmentée de 15% pour l' α -amylase et de 10 à 30% pour les enzymes protéolytiques (Kunze 2014). La lipoxygénase sera, quant à elle, partiellement dégradée et la catalase le sera totalement (De Clerck 1963). Il est possible de réaliser un malt dit « diastasique » en se limitant à un séchage et un coup de feu à basse température (70-75°C). Attention cependant à l'activité lipoxygénase qui diminue normalement avec un coup de feu classique (85-90°C). Pour un malt diastasique, cette enzyme pourrait encore être suffisamment active pour oxyder des matières lipidiques lors du brassage, si un pallier à 45-50°C est prévu, conférant à la bière un goût typique de carton.

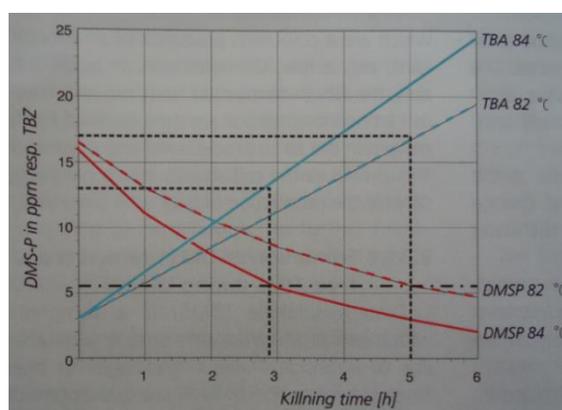


Figure 9: Evolution de l'indice TBA et de la concentration en DMS dans le malt en fonction de la température et du temps d'exposition.

Comme mentionné plus haut, le touraillage est une étape importante pour évacuer le DMS et ses précurseurs formés préalablement. Sous l'action de la chaleur, les précurseurs inactifs deviennent actifs, peuvent être transformés en DMS volatile qui sera alors évacué naturellement. Cependant, pour les malts pâles, nous avons vu qu'il était important de ne pas dépasser une exposition thermique de 14. Il s'agit de nouveau de faire des compromis. La Figure 9 illustre ce propos, on peut constater que plus la température et le temps sont élevés, plus la concentration en DMS diminue mais plus l'indice TBA augmente. On constate également sur ce graphe que pour un même abaissement du DMS, appliquer une température un peu plus élevée mais moins longtemps permet de limiter la coloration du malt. Cette constatation permet d'affirmer qu'un coup de feu de 2 à 3h à 85°C est l'idéal pour un malt pâle (Kunze 2014).

f. Conditionnement du malt

En fin de touraillage, le malt se trouve à une température de 80-85°C et possède une humidité de 4-5% et est alors très hygroscopique. Il est important de le refroidir avant stockage en sacs hermétiques. Le refroidissement est réalisé au sein de la touaille en insufflant de l'air frais à travers la couche de malt et s'achève au dégermage. Le dégermage consiste à ôter les radicules fanées du malt

en sortie de touraille. Il est important de se débarrasser de ces résidus, aussi vite que possible car très hygroscopique, qui représentent 3-4% du poids total.

Les radicules sont cependant un coproduit très intéressant de l'industrie du malt car riche en protéines (25-34%), en hémicellulose (15.6-18.9%), en cellulose (8-9%), en minéraux (6-8%), principalement potasses et phosphates, en lipides (1.6-2.2%) et en vitamines A, B et D. (Briggs 1998). Elles sont généralement valorisées en tant qu'aliment pour bétail mais peuvent également être utilisées pour la fabrication de levures boulangères car riches en enzymes et en facteurs de croissance (De Clerck 1963). Elles peuvent également être utilisées pour la formulation de pain de froment à haute valeur nutritive (Waters et al., 2013). Comme décrit plus haut, les radicules sont riches en protéines et en acides aminés et surtout en lysine, dont la teneur est faible dans les céréales. Zhang et al. (2008) ont quant à eux optimisé l'extraction de composés phénoliques antioxydant présents dans les radicules, fournissant une nouvelle source d'antioxydants d'origine naturelle au secteur de la pharmacie notamment.

Le dégermage commence généralement dans la touraille où les radicules se détachent au fur et à mesure du séchage, on les collecte alors sous la touraille. En fin de touraillage, il existe une multitude de techniques et d'appareils de dégermage qui consistent à appliquer une friction sur les grains pour en faire tomber les radicules. En micro-malterie, le système le plus avantageux est le cyclone (Figure 10). Les grains sont frictionnés par les pâles d'un ventilateur qui tourne par l'action d'une aspiration tangentielle. Cette dernière permet de séparer les particules plus légères (radicules, orgettes, poussières,...) du grain qui tombe alors sous l'appareil.

Le traitement du malt en micro-malterie se contente en général du dégermage, après quoi le malt est envoyé en silos et conditionné en sacs hermétiques. Cependant, d'autres traitements peuvent être appliqués au malt, il est possible de séparer les grains durs (non transformés ou vitreux) à l'aide d'une table à secousse et de polir le grain afin de se débarrasser des poussières à l'aide d'une polisseuse.

Pour les malts de base, il est conseillé de le laisser reposer 3 semaines avant utilisation. On constate parfois des difficultés de saccharification, de filtration, de fermentation ou l'apparition de troubles colloïdaux lorsque le malt est trop « jeune » (De Clerck 1963). Ce sont des constatations qui ne rassemblent cependant pas tout le monde.

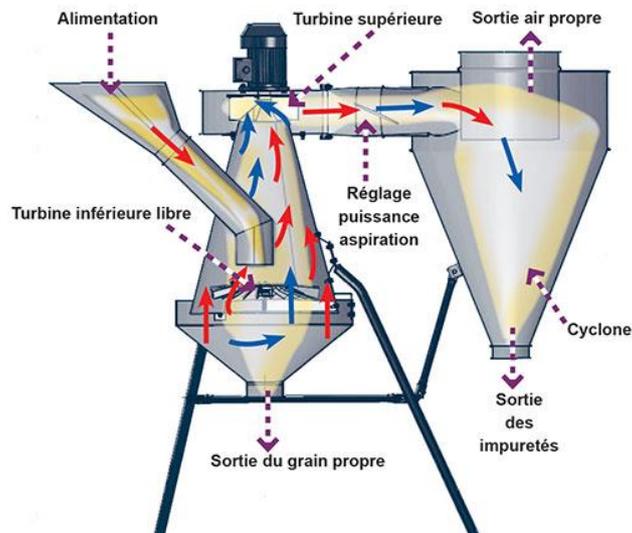


Figure 10: nettoyeur de céréales de type "cyclone"

100 kg d'orge donneront en moyenne 80kg de malt. On compte donc 20-25% de pertes pour passer de l'orge au malt fini dont environ 1% lors de la trempé, 5-6% dus à la respiration, 3.5-4.5% représentés par les radicelles et 8-10% d'abaissement d'humidité entre l'orge et le malt (Kunze 2014).

g. Les malts spéciaux

(De Clerck 1963; Kunze 2014)

Les malts de bases sont les malts qui peuvent être utilisés jusqu'à 100% dans une recette ils peuvent être pâles: Pilsen, Bohemian Pilsen, Pâle Ale et Vienna pour lesquels la température du coup de feu ne dépassera pas 95°C (couleur de 2.5 à 8 EBC) mais également légèrement foncés comme le Munich obtenu avec un coup de feu allant jusqu'à 105°C (13-15 EBC). Pour les malts de type Munich, l'humidité peut monter jusqu'à 47%, la température de germination jusqu'à 23°C et la première moitié du séchage ne doit pas descendre sous les 20% d'humidité. Ces conditions permettent de pousser la désagrégation un peu plus loin afin de former les précurseurs de mélanoidines.

Les malts spéciaux seront obtenus en adaptant les conditions de trempé, de germination et de touraillage. Il est préférable d'utiliser des orges plus riches en protéines (jusqu'à 13%) afin d'amplifier les réactions de Maillard. Chaque malt apporte une couleur et un profil aromatique bien particulier à la bière.

Malts foncés: il s'agit de malts de type Munich auxquels on applique un coup de feu allant jusqu'à 140°C, apportant une couleur plus foncée (jusqu'à 50 EBC) et un arôme plus intense. Utilisation jusqu'à 40% lors du brassage

Malt Mélanoïdin: il s'agit d'un malt de 60 à 80 EBC apportant une couleur ambré-rouge à la bière, son pH plus bas permet de stabiliser les propriétés organoleptiques. Pour sa production, l'humidité est montée jusqu'à 48%, après quoi le grain est mis à germer en tas épais et couvert d'une bâche afin qu'il s'échauffe (jusqu'à 50°C) et que l'oxygène diminue. Cela a pour conséquence de stopper la croissance du germe tout en favorisant les désagréments. Il en résulte une quantité beaucoup plus importante de sucres simples et d'acides aminés permettant les réactions de Maillard lors du touraillage. Après séchage, un coup de feu de 90 à 100°C pendant 3-4h lui est appliqué. Ce malt peut être utilisé jusqu'à 20%.

Malts caramel: ces malts apportent une couleur plus profonde, un arôme plus intense et très typé à la bière. Certains d'entre eux en améliorent le corps et la tenue de la mousse. La trempée et la germination sont menées comme pour le malt mélanoidin. Le touraillage ne se fait plus dans une touraille classique mais dans un tambour de torrification où le malt vert est constamment remué à une température de 60 à 70°C (devant être atteinte en 60 min) pendant 60 à 90 min afin de saccharifier son contenu. Ensuite, le malt est rapidement chauffé à une température pouvant aller jusqu'à 180°, selon la couleur souhaitée, pendant 1-2h tout en évacuant la vapeur afin de caraméliser son contenu et de le sécher. Enfin, le malt est rapidement refroidi, l'humidité atteinte est d'environ 6%. La gamme de malts caramel est très large car les températures de saccharification et de caramélisation, tout comme le temps d'application, peuvent toutes être modifiées. Certains malts caramel subissent un séchage à 60-65°C directement après la saccharification, sans température de caramélisation, ce qui permet d'obtenir un malt caramel de 3.5-5 EBC. On obtient donc une gamme de malts caramels allant de 3.5 à 450 EBC pouvant être utilisés de 5 à 40% selon les spécificités.

Malts acides: ces malts subissent les mêmes conditions de maltage qu'un malt pâle mais avec ajout d'acide lactique soit à la trempée soit aspergé lors de la germination. Il en résulte une concentration de 2-4% d'acide lactique dans le malt, donnant un malt à pH de 3.4 à 3.5 (5.8 à 6 pour un malt de base). Ces malts permettent d'obtenir, selon la proportion utilisée, une bière plus acide de type « berliner weiss » ou simplement d'améliorer la stabilité organoleptique de la bière. Aujourd'hui, les bières acides sont plutôt obtenues de manière biologique via une contamination contrôlée à l'aide de lactobacilles par exemple.

Malts torrifiés: ces malts sont obtenus en torrifiant un malt pâle de base après touraillage. Le malt est alors introduit dans le tambour de torrification où il est réhumidifié pendant 1.5 à 2h à 70-80°C par aspersion d'eau dans le tambour en mouvement afin d'atteindre une humidité de 10 à 15%. Ensuite, le malteur augmente la température pour atteindre 180 à 220°C, maintenue entre 1h et 1h30. Il est possible d'asperger le malt avec de l'eau pendant la torrification afin d'évacuer les arômes de brûlé avec les vapeurs mais également d'atténuer l'astringence du malt final. La gamme des malts torrifiés s'étend de 900 à 1800 EBC proposant des arômes variant du chocolat au café. La proportion de ces malts dans une recette ne devrait pas dépasser 5%.

Malts d'autres céréales: il est possible de malter beaucoup de céréales qui peuvent apporter des arômes que l'on n'obtient pas avec l'orge. Cependant, les conditions de maltage doivent être adaptées, principalement le temps de trempée et de germination. En effet, certaines céréales absorbent l'eau beaucoup plus facilement car dépourvues d'enveloppes (froment). Certaines céréales sont quant à elles difficiles à désagréger car plus riches en pentosanes (seigle). De manière générale, il faut être prudent quant à leur utilisation car ils peuvent rendre difficile la saccharification au brassage de même que la filtration en raison d'une proportion plus importante de pentosanes mais également de l'absence d'enveloppes.

Les malts peuvent également être fumés à l'aide de bois ou de tourbe (malt whisky) afin d'apporter des arômes particuliers plus ou moins prononcés.

4. Types d'installation

a. Le maltage sur aire

Le maltage sur air est la technique de maltage la plus ancienne et la moins coûteuse en matériel à mettre en place. Elle consiste à faire germer l'orge à même le sol en tas plus ou moins épais, l'inconvénient étant le contrôle des paramètres qui se révèle compliqué.

La trempe est réalisée dans une cuve dimensionnée à cet effet. Il faut un volume de cuve de 2.3 hl/100kg d'orge trempée et la hauteur ne peut dépasser 3 m ce qui asphyxierait trop vite le grain. 150 litres d'eau sont nécessaires par 100 kg d'orge et par renouvellement. L'eau est généralement renouvelée 2 à 3 fois.

La germination, comme mentionné plus haut est conduite à même le sol. La température et l'aération sont gérées en jouant sur l'épaisseur de la couche et la fréquence des retournements. En début de germination, le tas est étalé sur 18-20 cm d'épaisseur afin qu'il s'échauffe et qu'il atteigne la température de 18°C. Une fois cette température atteinte, le tas sera retourné 1 à 2 fois par jour en l'amincissant de plus en plus, jusqu'à 10 cm, afin de maintenir une température la plus constante possible. Il est possible d'installer un réseau de tuyauterie traversé par un fluide caloporteur dans le béton afin de contrôler un maximum la température. La température dans les germoirs ne doit pas dépasser les 14-15°C afin de ne pas monter au-delà de 20°C au sein de la couche et l'humidité ambiante devra être aussi élevée que possible. 3,4 m² sont nécessaires pour étaler 100kg d'orge trempée sur 10-12 cm d'épaisseur. Cette valeur prend en compte l'aménagement de couloir entre les tas en germination. L'aire de germination devrait présenter une pente de 2% afin de laisser s'écouler l'eau excédentaire. Le matériau a son importance également, bien que souvent négligé, car la porosité influencera l'assèchement plus ou moins important du tas. Il doit également résister aux contraintes mécaniques liées aux retournes. La pierre de Solenhafen (silice et quartz) est la plus adaptée mais d'autres roches siliceuses ou calcaires sont également employées avec succès, notamment la pierre d'Ecaussines (De Clerck, 1963).

Le tourillage est réalisé au sein d'une touraille. Il s'agit d'une pièce isolée thermiquement, possédant un faux-fond grillagé (33% d'ouvertures) sur lequel est étalé le malt vert. L'air chauffé est envoyé sous la couche afin de sécher celui-ci. Le tourillage représente presque la totalité de la consommation énergétique d'une malterie, il est très important de limiter les pertes de chaleur autant que possible. L'installation d'un échangeur à chaleur entre l'air entrant et l'air sortant est indispensable et permet de réduire la consommation d'énergie jusqu'à 35%. Il faut de l'ordre de 1091 kWh pour touriller une tonne de malt pâle sans échangeur à chaleur et 740 kWh avec échangeur, pour une température d'air extérieure de 8°C (Kunze 2014). Une touraille peut accueillir en moyenne 400 kg de malt/m². Plus cette charge est importante, plus la couche sera épaisse et plus le ventilateur envoyant l'air sous la couche devra être puissant. Il est déconseillé de dépasser 1 m d'épaisseur au risque de condenser l'humidité transportée par l'air au sein de la couche. La source de chaleur doit être indirecte au risque de former des nitrosamines (carcinogènes) dans le malt. Dès lors, tous les combustibles peuvent être utilisés. Le séchage démarrera à 50-55°C pendant 1 ou 2 heures et pourra être monté à 60-65°C par la suite car, en raison de la chaleur latente de vaporisation, la température au sein de la couche n'atteindra pas cette valeur. On contrôle le séchage soit à l'aide d'un hygromètre placé au-dessus de la couche, soit à l'aide d'un thermomètre, également placé au-dessus de la couche, car une fois le malt sec, la température grimpera pour atteindre celle de l'air envoyé sous la couche. Un schéma de touraille est disponible en Annexe 1.

Cette configuration permet de recycler l'air chaud et humide issu du séchage pour réchauffer l'air entrant (trappe 3), de fonctionner en circuit fermé pour le coup de feu (trappe 2) et d'évacuer directement l'air chaud pour refroidir le malt fini (trappe 1). La chaleur est fournie par des résistances contrôlées, en tout ou rien, par une sonde de type PT100 placée dans la couche. Le ventilateur, de type souffleur à céréales, quant à lui fonctionne tout au long du touraillage et sa puissance peut être réglée par un variateur de fréquence. Une puissance de 4000 W est largement suffisante pour le touraillage d'une tonne de malt fini. L'échangeur à chaleur est constitué de 3 groupes de 33 tubes de 9 cm de diamètre et de 1m de long traversé par l'air entrant qui se réchauffe grâce à l'air sortant tout autour des tubes.

Les installations décrites ici sont la base du maltage, beaucoup d'améliorations peuvent être apportées pour automatiser le processus (vanne électronique pour la trempe, retourneurs mécaniques pour la germination,...) mais également pour en améliorer les performances énergétiques. Ainsi, il existe une multitude de configurations de touraille avec chacun leurs avantages et inconvénients.

Parmi les avantages du maltage sur aire, citons les faibles investissements et la conception aisée.

Les inconvénients du maltage sur aire portant sur les paramètres difficiles à contrôler, la dépendance de la température extérieure pour la germination, la surface nécessaire importante, le risque de moisissure plus élevé qu'en maltage pneumatique car les grains sont en contact avec l'air environnant. (De Clerck, 1963)

b. Le maltage pneumatique

En maltage pneumatique, seul l'équipement pour l'étape de germination diffère du maltage sur aire. La germination est menée au sein de cases à faux-fond ou de tambours rotatifs dont la température et l'humidité peuvent être réglées en envoyant de l'air conditionné à travers la couche. Grâce à cette insufflation d'air, l'orge trempée peut être étalée sur une épaisseur allant jusqu'à 0.9 m et augmentera jusqu'à 1.3 m en fin de germination (Kunze, 2014) en raison du développement des racelles. Il est cependant important de bien saturer l'air entrant dans la couche car, étant plus frais que le malt, il aura tendance à se réchauffer, emportant avec lui une partie de l'humidité du tas. L'air passe donc à travers une chambre à chicane dans laquelle de l'eau est constamment pulvérisée. Le fonctionnement des ventilateurs est réglé par un thermomètre situé au centre de la couche. Des retourneurs mécaniques sont indispensables pour ce type de matériel, non plus pour contrôler l'aération ou la température mais pour homogénéiser et empêcher l'enchevêtrement des racelles. Il est également possible d'adapter la composition de l'air en oxygène en recyclant l'air sortant du germe, plus riche en CO₂. Attention cependant à apporter une partie d'air neuf afin de ne pas asphyxier le grain.

Les avantages du maltage pneumatique sont: le gain de place, économie de main d'œuvre, dépendance de la température extérieure nulle si l'on dispose d'eau à 12-13°C, moins de danger de moisissures.

Les inconvénients du maltage pneumatique sont: investissements importants, consommation plus importante d'énergie (De Clerck 1963)

En raison des investissements et de la faible valeur ajoutée du produit fini, le maltage pneumatique s'impose à partir d'une production de 500 tonnes/an dans nos régions.

c. Les unités « 3 en un »

Il existe aujourd'hui un grand nombre de systèmes de maltage combinant les différentes étapes dans un même outil. Peu de littérature existe pour la conception de ces unités de maltage car il s'agit d'une technologie récente que chaque constructeur développe indépendamment. Tous les constructeurs fournissent des devis sur demande pour toutes capacités. Les prix sont très différents selon la capacité, l'automatisation et le constructeur. Il faut compter de l'ordre 1 500 000 € pour une unité de maltage entièrement automatisée de marque Buhler permettant de produire 500 tonnes de malt/an. Le rapport prix/capacité étant d'autant plus élevée que la capacité souhaitée est faible. (Source: communication personnelle Emmanuel Faucillon ; Devis de la firme *Bulher*).

Les avantages des unités 3 en un sont: gestion automatique, main d'œuvre très réduite, peu d'expérience nécessaire.

Les inconvénients des unités 3 en un sont: prix exorbitants, production de malt de base uniquement.

Partie II: Analyses des orges et malts résultants

1. Matériel et méthode

a. Échantillonnage

L'échantillonnage a été réalisé en Bretagne, à Plœuc-sur-Lié, dans la micro-malterie « Maltfabrique ». Au cours d'une formation d'une durée de 1 mois, les différents lots d'orge ont été échantillonnés ainsi que les malts résultants. Il s'agit ici d'une structure certifiée bio, ne travaillant qu'en bio. 2 lots issus de la malterie Brasserie « la Piautre » s'ajoutent à ces premiers échantillons. La technique du maltage sur aire est utilisée dans ces deux structures.

L'orge est échantillonnée au sein de big-bag d'une capacité de 1 tonne. Dix prélèvements d'environ 100g ont été effectués dans la masse, répartis sur la surface et sur la hauteur.

Les malts ont été prélevés au fur et à mesure de l'ensachage. En fin de touraille, il existe des variations de qualité de malt au sein de la masse. Le passage au cyclone pour le dégermage, le stockage en silo et l'ensachage permet d'homogénéiser le malt. Une poignée d'environ 40g est prélevée à chaque sac rempli. On obtient généralement 30-33 sacs de 25kg de malt après le maltage d'une tonne d'orge. Les échantillons ont été conditionnés dans des sacs sulfurisés de type sachet à pain. La norme EBC (European Brewery Convention) prévoit les protocoles EBC 3.1 et EBC 4.1 pour l'échantillonnage de l'orge et du malt respectivement.

Aux orges bretonnes s'est ajouté un échantillon d'orge Wallon qui sera malté à l'échelle pilote par la suite afin d'isoler les paramètres importants en vue de concevoir les structures de maltage.

Aux malts bretons s'ajoutent un malt réalisé chez Dingemans pour Greenfarm, une référence anglaise de Maris Otter ainsi qu'une référence belge de chez Boortmalt. Ces références sont issues du maltage pneumatique.

Les Tableaux en Annexe 2 et 3 reprennent ces échantillons d'orge et de malt avec leur correspondance, leur origine et leur variété.

b. Analyses

Il est possible de faire faire la liste d'analyses ci-dessous, et plus encore dans certaines structures telles que l'UCL, l'IFBM ou la VLB. L'Annexe 4 fournit un exemple des prix demandés pour les différentes analyses.

L'Annexe 5 quant à elle rassemble les valeurs attendues pour les différentes analyses selon plusieurs références: IFBM, VLB, Synagra, Malteurs de France, Arvalis, EBC et Malteurs Echos. Ces valeurs seuils issues des différentes sources permettront d'évaluer la qualité des orges et des malts de manière rigide ou plus souple.

Le Tableau 3 compile les valeurs de référence utilisées dans les analyses ultérieures sur base de l'Annexe 5.

Tableau 3: Valeurs de référence pour les différentes analyses

ANALYSES	Seuil souple	Seuil strict
ORGE		
Humidité (% MH)	14.5	14
Calibre AB (g/100g)	85	90
Calibre DE (g/100g)	/	3
Poids de 1000 grains (g)	/	37-45
Protéines totales (% MS)	9-12	9.5-11.5
Energie germinative 3j	93	97
Energie germinative 5j (% germés)	95	98
Hagberg (s)	180	220
MALT		
Calibre AB (g/100g)	90	95
Calibre DE (g/100g)	/	3
Poids de 1000 grains (g)	/	28-44
Protéines totales (% MS)	9-12	9.5-11.5
Temps de saccharification (min)	/	15
Rendement sec (% MS)	76	80
Différence fine/grosse mouture (%)	5	3
pH	/	5.6-6
Couleur (EBC)	2-5	3-4
Protéines solubles (% MS)	/	3.6-4.7
FAN (mg/l)	120	160
Kolbach	/	35-45
Viscosité (mPa.s)	1.48-1.65	1.55-1.6
Polyphénols (mg/l)	/	/

- Orge

Humidité

Le séchage est important pour la qualité brassicole, il assure une stabilité de l'orge face aux modifications métaboliques ou aux infestations. Il permet aussi de lever plus rapidement la dormance, améliorant l'homogénéité de la germination.

L'humidité de l'orge est analysée à l'aide du protocole EBC 3.2. Deux répétitions par échantillon. Les échantillons sont broyés à l'aide d'un broyeur *IKA* modèle *A10 B*. Exactement environ 5g sont ensuite pesés à l'aide d'une balance analytique de marque *Sartorius* et séchés 2h à 130 °C dans une étuve *Chopin* modèle *EM10*.

Calibrage

L'orge est ensuite calibrée à l'aide de tamis de 2.2mm, 2.5mm et 2.8mm afin de déterminer les pourcentages de chaque fraction. Le calibrage est réalisé en suivant la méthode EBC 3.11.1. 4

répétitions de 150g ± 0.01g par échantillon sur un calibreur de type *VLB*. Les grains plus gros donneront plus d'extrait proportionnellement à leur taille.

Les différentes fractions sont ensuite examinées en suivant la méthode EBC 3.11.2 afin de déterminer la composition du lot. Les grains cassés diminuent le rendement et augmentent le risque de développement de moisissures tandis que les graviers et métaux abîment le matériel.

Calibre A = grains > 2.8 mm ; Calibre B = 2.5 mm < grains < 2.8 mm ; Calibre C = 2.5 mm < grains < 2.2mm ; Calibre D = grains < 2.2 mm (=orquettes) ; calibre E = grains cassés ; Calibre F = graines étangères.

Poids de 1000 grains

Il donne une information sur l'état de remplissage du grain. Plus le poids de 1000 grains est élevé, plus la proportion d'amidon est importante au sein du grain et plus l'extrait potentiel est élevé.

Evaluation à l'aide de la méthode EBC 3.4. 20g ± 0.1g par échantillon sont pesés et les grains sont comptés à l'aide d'un compteur *Numigral*. L'analyse est réalisée en double et la valeur ramenée à 13% d'humidité. Le comptage des grains est réalisé à l'aide d'un compteur *Numigral*.

Orge légère: 37 à 40g ; Orge moyenne: 41 à 44g ; Orge lourde: >45g (Kunze 2014)

$$P1000 = \frac{1000 * P * (100 - H)}{N * 87}$$

P1000: Masse de 1000 grains (g)

P: Masse des grains pesés pour le comptage (g)

H: Humidité de l'échantillon (%)

N: Nombre de grains

Protéines totales

Le taux de protéines doit permettre d'apporter suffisamment d'azote pour le développement de la levure mais pas de trop pour ne pas déprécier les caractéristiques organoleptiques de la bière.

L'azote total est quantifié via la méthode de Dumas décrite par la méthode EBC 3.3.2. 300 g ± 0.1 g d'échantillon sont broyés à l'aide d'un broyeur *Laboratory Mill 3100* muni d'un tamis de 0.8mm. 2 répétitions d'environ exactement 300 mg de broyat par échantillon sont pesés à l'aide d'une balance analytique de marque *Sartorius* et insérés dans un appareil *TruMac series* de marque *LECO* pour analyse.

Les 300 g broyés serviront également aux analyses ultérieures sur mouture.

Energie germinative

Permet d'évaluer la proportion de grains ayant germés après 72 et 120h. Il est important d'avoir un pourcentage le plus élevé possible afin d'assurer l'homogénéité de la germination et d'éviter les grains non transformés qui peuvent créer des soucis au broyage, saccharification et filtration.

Cette analyse est réalisée en suivant la méthode EBC 3.6.1. 4 répétitions de 100 grains calibrés > 2.2mm et entiers par échantillon. Les grains sont mis à germer dans une armoire thermostatée.

« Rapid Visco Analyzer (RVA) »

Le RVA pour « Rapid Visco analyzer » consiste en un programme de température et de vitesse de rotation d'une hélice au sein d'un mélange de farine de céréale et d'eau afin de caractériser un substrat amylicé et son pouvoir enzymatique. Il en résulte une courbe temps-viscosité fournissant un suivi des réactions enzymatiques. Le protocole appliqué ici utilise dans un premier temps un

mélange eau-farine permettant d'obtenir une courbe de viscosité impliquant l'amidon et les enzymes et dans un second temps un mélange AgNO₃-farine. L'AgNO₃ étant un inhibiteur d'enzyme, seule la composante « amidon » sera visible sur la courbe et la comparaison des deux nous donnera des indications sur l'activité amylasique.

Il est également possible d'évaluer la pré-germination du grain, caractéristique qui conditionnera la conservation de l'énergie de germination du grain dans le temps. Une viscosité élevée en fin de procédure indique une faible activité amylasique et donc peu de pré-germination et inversement. (Source: Commission canadienne des grains)

L'analyse a été réalisée sur un *Rapid Visco Analyzer 4500* de marque Pertens. 4.00g ± 0.01g échantillons de farines moulues sont mélangés avec 25.00g ± 0.05g d'eau et placé dans l'appareil, l'analyse est dupliquée. La procédure est ensuite réitérée avec un mélange d'AgNO₃-farine.

Un exemple de graphiques issus de cette analyse est disponible en Annexe XX

Hagberg

Le temps de chute de Hagberg permet d'évaluer la capacité enzymatique des céréales à l'aide du Falling Number. 7.0 ± 0.05 g d'échantillon broyés, prélevés dans les 300 g préparés pour l'azote total, sont mélangés dans 25 ± 0.2 ml d'eau distillée. Le tout est homogénéisé à l'aide de l'appareil *Shakematic* de la marque *Perten instrument*. Le mélange est alors introduit dans l'appareil de mesure *Falling Number FN1000* de la même marque. L'analyse consiste à chronométrer le temps de chute d'un piston dans la pâte obtenue en mélangeant l'eau et l'échantillon broyé. Plus la capacité enzymatique est élevée, plus le piston tombera rapidement. L'analyse est dupliquée.

- Malt

Les valeurs seuils proposées pour chaque analyse sont issues de l'institut français pour la brasserie et la malterie, si disponibles.

Humidité

Le malt fini et conditionné doit être compris entre 4 et 4.5% d'humidité pour garantir sa capacité enzymatique au cours du temps (Boivin, 2004). Les échantillons sont broyés à l'aide d'un broyeur *IKA* modèle *A10 B*. Exactement environ 5g sont ensuite pesés à l'aide d'une balance analytique de marque *Sartorius* et séchés 2h à 130 °C dans une étuve *Chopin* modèle *EM10*.

L'humidité du malt est mesurée à l'aide de la méthode EBC 4.2.

Calibrage

Le malt fini doit être le plus homogène possible afin de garantir un broyage optimal en début de brassage.

La méthode EBC 4.22 décrit le protocole pour le calibrage et l'inspection des différentes fractions afin d'en déterminer la proportion de grains cassés et de graines étrangères. 4 répétitions de 150g par échantillon sur un calibre de type *VLB*.

Les catégories de calibres sont les mêmes que celles décrites pour les orges.

Poids de 1000 grains

De nouveau, le poids de 1000 grains informe sur la densité des grains et donc l'extrait potentiel.

Le poids de 1000 grains est mesuré via la méthode EBC 4.4. 20g par échantillon sont pesés et les grains sont comptés à l'aide d'un compteur *Numigral*. L'analyse est réalisée en double et la valeur ramenée à 4.5% d'humidité. Un malt moyen se trouve entre 28 et 38 g/1000 grains (Kunze 2014).

$$P1000 = \frac{1000 * P * (100 - H)}{N * 95.5}$$

P1000: masse de 1000 grains (g)

P: masse d grains pesés pour le comptage (g)

H: Humidité de l'échantillon (%)

N: Nombre de grains

Protéines totales

La méthode utilisée est décrite dans l'EBC 4.3.1. 2 répétitions par échantillons. 300 g ± 0.1 g d'échantillon sont broyés à l'aide d'un broyeur *Laboratory Mill 3100* muni d'un tamis de 0.8mm. 2 répétitions d'environ exactement 300 mg de broyat par échantillon sont pesés à l'aide d'une balance analytique de marque *Sartorius* et insérés dans un appareil *TruMac series* de marque *LECO* pour analyse.

Brassin conventionnel

Le brassin conventionnel est réalisé pour évaluer l'aptitude du malt à être transformé par le brasseur en simulant un brassin. D'autres analyses seront réalisées, autre que l'évaluation technologique du malt, sur les moûts obtenus. Il est réalisé en 2 répétitions sur chaque échantillon via la méthode EBC 4.5.1. Des informations telles que le temps de saccharification (<15min), le temps de filtration et le pH (5.7≤pH≤6.0) sont mesurés au cours de la procédure. Les moûts obtenus sont analysés à l'aide l'appareil *DMA4500 density meter* de la marque *Anton Paar* fournissant les valeurs de densité (g/cm³) et de degré Plato (°P), ce dernier permettant, avec la mesure d'humidité du malt, de calculer le rendement à l'aide des formules présentes dans la méthode EBC 4.5.1. Les objectifs de rendement sont de 79 à 82%.

- Couleur: méthode EBC 4.7.1. L'analyse consiste en une mesure d'absorbance du moût à 430 nm à l'aide d'un spectrophotomètre. L'appareil utilisé est un *Spectronic GENESYS 6*.
- Viscosité du moût: dépend de la teneur en β-glucanes et en arabinoxylanes et donne donc une information sur la désagrégation du malt. Des valeurs trop élevées engendrent des problèmes de filtration. La méthode EBC 4.8.4 est appliquée en utilisant le *Microviscosimètre Lovis 2000M* de la marque *Anton Paar*.
- Protéines solubles: Elles impactent la tenue de la mousse et la fermentabilité et dépend de la désagrégation appliquée par le malteur. Evaluation par la technique de Dumas via la méthode EBC 4.9.3. Exactement environ 2 g de moût sont pesés sur une balance analytique de marque *Sartorius*, concentrés par séchage 45 min à 85° dans une étuve ventilée de marque *Memmert* et introduit dans l'appareil *TruMac series* de marque *LECO* pour analyse. L'analyse est dupliquée.
- Azote α-aminé: Il est la source d'acides aminés pour le développement de la levure. La quantification a été effectuée à l'aide de la méthode EBC 4.10 avec duplicats. L'analyse consiste en dosage colorimétrique à la ninhydrine. Lecture par spectrophotométrie à 570 nm. L'appareil utilisé est un *Spectronic GENESYS 6*.
- Profils en sucres: Il permet de déterminer les des proportions des différents sucres présents dans le moût et donne une indication sur le travail conjoint des amylases α et β. Méthode EBC 8.7. L'appareil utilisé est un *Waters 515 HPLC pump* équipé d'un *Waters 2414 refractive index detector* à 30°C. La colonne utilisée est une *Prevail Carbohydrate ES, 5µm 250 x 4.6mm* (Part No. 35101) de la firme *Grace*. Le solvant utilisé est un

mélange acétonitril/eau (75v/25v) injecté à un débit de 1ml/min à une température de 60°C.

- Polyphénols: Comme expliqué dans le paragraphe plus haut, le sujet est assez controversé. Il est dès lors difficile d'établir des seuils de concentration dans le moût. La méthode utilisée est l'EBC 9.11 en duplicat. L'analyse consiste en une réaction entre les polyphénols et des ions ferriques en milieu alcalin suivie d'une lecture de densité optique par spectrophotométrie à 600nm. L'appareil utilisé est un *Spectronic GENESYS 6*.

α-amylase

L'activité α-amylasique est mesurée à l'aide du kit *α-Amylase Assay Kit (Ceralpha Method)* de la firme *Megazyme*. La première étape consiste à extraire les α amylases à l'aide d'une solution de NaCl, de CaCl₂ et de NaN₃. L'extrait α-amylasique est ensuite utilisé pour hydrolyser un substrat constitué de « *non-reducing-end blocked p-nitrophenyl maltoheptaoside* » (BPNPG7) en présence d'un excès d'α-glucosidase. L'α-glucosidase est incapable d'hydrolyser le substrat BPNPG7 mais est capable d'hydrolyser de manière instantanée et quantitative le 4-nitrophenyl maltosaccharide résultant de l'activité α-amylase. Il en résulte du glucose et du 4-nitrophenol. La réaction est terminée par l'ajout d'une solution basique (pH 11) colorant le 4-nitrophenol en jaune. L'absorbance est mesurée à 400 nm et permet le calcul de l'activité α-amylasique à l'aide de la formule fournie avec le kit. L'analyse est réalisée sur exactement environ 0.5 g des 300 g broyés pour la mesure des protéines totales.

Le résultat est exprimé en unité Ceralpha qui représente la quantité d'enzyme nécessaire pour relâcher une micromole de 4-nitrophénol à partir du substrat BPNPG7, en présence d'un excès d' α-glucosidase thermostable, en une minute et sous les conditions décrites dans la méthode.

β-amylase

L'activité β-amylasique est mesurée à l'aide du kit *β-Amylase Assay (Betamyl-3 method)* de la firme *Megazyme*. Le principe est similaire à la méthode Ceralpha mais le substrat est ici du *4-nitrophenol maltotrioside*, rapidement et spécifiquement hydrolysé par les β-amylases. La suite de la réaction est identique à la méthode précédente, et abouti à la coloration jaune provenant du 4-nitrophenol en solution alcaline.

Le résultat est exprimé en unité Betamyl-3® qui représente la quantité d'enzyme nécessaire pour relâcher une micromole de 4-nitrophénol à partir du substrat PNPβ-G3, en présence d'un excès d' α-glucosidase thermostable, en une minute et sous les conditions décrites dans la méthode.

Friabilité

La friabilité permet une rapide évaluation de la désagrégation du malt. 50 g de malt sont introduits dans l'appareil constitué d'un tambour grillagé rotatif pendant 8 minutes. La masse de la partie abrasée est multipliée par 2 pour donner un pourcentage. La partie non abrasée est analysée visuellement pour en déterminer la proportion de grains vitreux et partiellement non modifiés (méthode EBC 4.15). L'appareil utilisé est friabilimètre standardisé EBC de marque *Pfeuffer*.

c. Statistiques

Les résultats d'analyses sont compilées en une data base exploitable sur le programme de traitement « R studio », la version 3.4.1 de « R ». Des scripts ont ensuite été élaborés afin de mettre en œuvre un traitement de données reproductible fournissant les résultats de statistique descriptive, d'analyse de la variance et d'analyses en composantes principales.

Les résultats de statistique descriptive permettent de mettre en forme tous les résultats obtenus, en prenant en compte les répétitions selon les analyses. Ces résultats sont représentés sous forme d'histogrammes.

Des analyses de la variance à 1 critère fixe (ANOVA 1), complétées par des tests de Tukey-Kramer, ont été réalisées sur l'ensemble des paramètres étudiés afin de réaliser la structuration des moyennes pour chaque type d'analyse. Cela permet de différencier statistiquement les différents échantillons et de les grouper selon leurs valeurs respectives. (Critère 1 = échantillon)

Des analyses de la variance à 2 critères fixes (ANOVA 2) ont été mises en œuvre sur les orges 01 à 09 et malts résultants pour mettre en évidence les éventuelles différences entre le grain avant et après maltage. Cette analyse est donc réalisée sur les calibres (sans le froment car pas soumis à cette analyse), les poids de 1000 grains (sans le froment car pas soumis à cette analyse) et la teneur en protéines (critère 1 = échantillon ; critère 2 = malté ou pas). Cette analyse a également été réalisée pour les énergies germinatives après 3 et 5 jours (critère 1 = échantillon ; critère 2 = nombre de jours).

Les résidus de chaque modèle ont été analysés afin de s'assurer de leur validité. Pour ce faire, la linéarité-additivité, l'égalité des variances et la distribution normale de résidus pour chaque modèle a été vérifiée visuellement. Un exemple de graphique permettant ce contrôle visuel est représenté à la Figure 11.

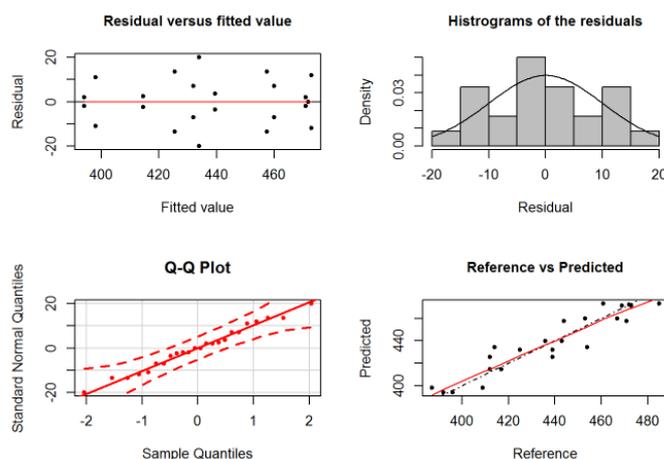


Figure 11: Analyse des résidus du modèle « temps de chute de Hagberg »

Enfin, des analyses en composantes principales (ACP) ont été réalisées sur les orges et les malts. Ce type d'analyse permet de prendre en compte simultanément l'information contenue dans plusieurs variables et de la synthétiser dans les composantes principales. Ces composantes sont classées en ordre décroissant de la variabilité du jeu de données qu'elles expliquent. L'ACP permet de mettre en évidence des groupes d'échantillons avec des propriétés physico-chimiques semblables et les échantillons extrêmes. Cette analyse a également été appliquée pour relier les propriétés physico-chimiques à la qualité de l'orge ou du malt et pour sélectionner les propriétés physico-chimiques ayant le plus de poids dans les premières composantes principales. La sélection des variables a été effectuée par un processus itératif où les variables ayant le moins de poids dans les premières composantes principales ont été exclues. Ce processus a été arrêté juste avant que l'ACP ne permette plus de séparer les principaux groupes d'échantillons avec des propriétés physico-chimiques semblables et les échantillons extrêmes. Ce processus permet d'exclure les paramètres

donnant de l'information redondante afin de limiter le nombre de variables vu que le jeu de données est constitué de relativement peu d'échantillons par rapport au nombre de variables.

L'échantillon 15, référence industrielle, nous permet de valider les analyses et de vérifier le biais. En effet, un tableau d'analyse par l'industrie a été fourni avec l'échantillon.

d. Maltage pilote

L'objectif ici est de recréer les conditions de maltage artisanal, au départ de l'orge 13, afin de reproduire des maltages par batch de 13kg d'orge mis en trempé avec le matériel disponible dans les différents laboratoires de GxABT et du CRA-W.

La trempé est réalisée dans une cuve inox de 40L avec fond filtrant, améliorant les phases d'aération, et robinet de vidange. L'eau de distribution trop chaude en cette période de l'année est refroidie à l'aide de glace pilée afin d'en abaisser la température à 10°C. Le pourcentage d'humidité est mesuré à l'aide d'une boule à thé remplie au préalable avec exactement 10.0g (attention le grain augmente de volume d'environ 33% de son volume initial (De Clerck 1963)) de grains dont l'humidité est connue. Des pesées successives de ces grains essorés permettent par la suite de connaître le pourcentage d'humidité dans le grain

$$\text{Humidité du grain (\%)} = \frac{100*(A+B*100)}{C}$$

A = Humidité initiale (%)

B = Masse d'eau absorbée (g)

C = Masse totale de l'échantillon après absorption(g)

La trempé est conduite comme suit: 12h sous eau; 10h30 sous air; 4h sous eau ; 4h sous air ; sous eau jusqu'à 43% d'humidité. Après vidange de la dernière eau de trempé, l'humidité continuera à augmenter légèrement, grâce à l'eau présente à la surface des grains, pour atteindre 44%.

La germination est effectuée dans une pièce fraîche (12-14°C) sur une dalle de pierre d'Ecaussine de 1m sur 0.5m sur 0.01m, inclinée de 2% et munie d'un cadre de 25cm de hauteur permettant de limiter les effets de bords importants pour de si petits volumes. Les grains trempés sont mis à germer en couche de 18cm afin d'élever légèrement la température. Cette dernière est contrôlée à l'aide d'une sonde placée au milieu de la couche de grains. La couche est ensuite retournée à l'aide d'une ramassette toute les 12h afin de refroidir la masse et d'oxygéner le germe. La couche est étalée au fur et à mesure de la germination pour terminer à 10 cm, dans le but de maintenir la température autour de 18°C tout au long de la germination. La durée de germination dans ces conditions est de 4 jours et demi.

Le touraillage est réalisé à l'aide d'un lit fluidisé, à une température de 50°C jusqu'à une humidité de 10% après quoi la température est augmentée jusqu'à 85°C et maintenue pour une durée de 2h30. Le grain est ensuite refroidi par insufflation d'air frais jusqu'à 25°C, le tamisage ultérieur permettra d'abaisser encore un peu cette température. L'humidité du malt vert au court du séchage du premier lot est mesurée par séchage en étuve 2h à 130-133°C afin d'évaluer la durée du séchage. L'humidité des lots suivants est évaluée par analyse infrarouge. Le séchage en lit fluidisé permettant la friction entre les grains, le lot est dégermé au fur et à mesure du processus. Il est a noté que le premier lot fut séché en étuve ventilée de marque *Mettler* à 50°C avant montée à 85°C. Cependant, l'air chaud

n'étant pas insufflé dans la couche, le touraillage total a pris plus de 48h, favorisant de manière importante le travail des amylases et se rapprochant donc d'un malt de type caramel.

Le lot malté est finalement passé dans un nettoyeur/trieur de céréales de type nettoyeur *MLN* de marque *Chopin* et stocké en sac de malt hermétique.

2. Résultats et discussion

Comme décrit plus haut, les valeurs utilisées pour appliquer les seuils aux différents paramètres sont issues d'une compilation de références, synthétisé dans le Tableau 3. Les traits orange représentent les valeurs les plus souples (filière artisanale) assurant la qualité du malt tandis que les traits rouges représentent les valeurs attendues les plus strictes. Une réflexion est faite sur la pertinence de la limite, c'est pourquoi il ne s'agit pas rigoureusement des minima et maxima de l'Annexe 5. Ces traits représentent, selon les graphiques, un maximum, un minimum ou un intervalle. Les traits bleus sont utilisés, dans le cas de certaines analyses, pour représenter des intervalles dans lesquels l'échantillon devrait se trouver mais dont les valeurs ne constituent pas un critère bien défini par la littérature. La couleur de chaque bâtonnet indique la variété d'orge.

1. Humidité des orges

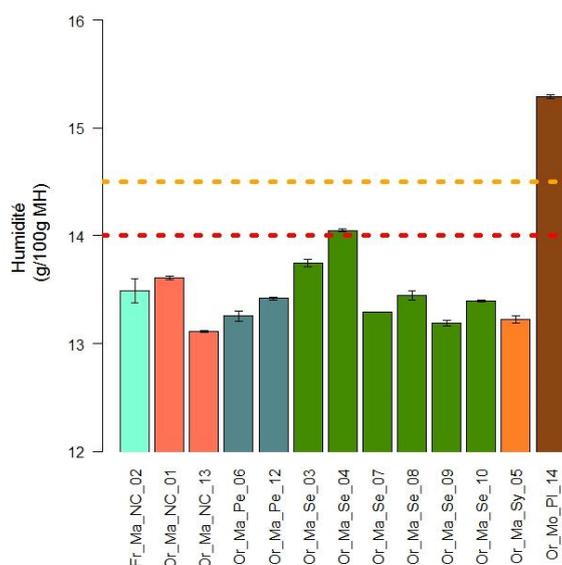


Figure 12: Humidité des échantillons d'orge

Tableau 4: Résultats ANOVA 1 pour l'humidité des échantillons d'orge

Échantillon	13	09	05	06	07	10	12	08	02	01	03	04	14
Valeur	13.11	13.19	13.22	13.26	13.29	13.40	13.42	13.45	13.49	13.61	13.74	14.05	15.29
Groupe	i	hi	hi	ghi	fgh	efg	ef	def	de	cd	c	b	a

On constate que tous les échantillons ont une teneur en humidité acceptable à l'exception de l'orge **14** (Figure 12 ; Tableau 4) qui nécessiterait un séchage plus intense pour assurer sa conservation. L'humidité ne garantit pas à elle seule la qualité du stockage. En effet, malgré son humidité adéquate, l'orge **01** présentait une odeur de poussière et de moisissures, témoignant de mauvaises

conditions de stockage. La mesure de l'humidité d'un lot est rapide, demande peu de ressource et donne une information importante pour la qualité du maltage.

2. Energie germinative

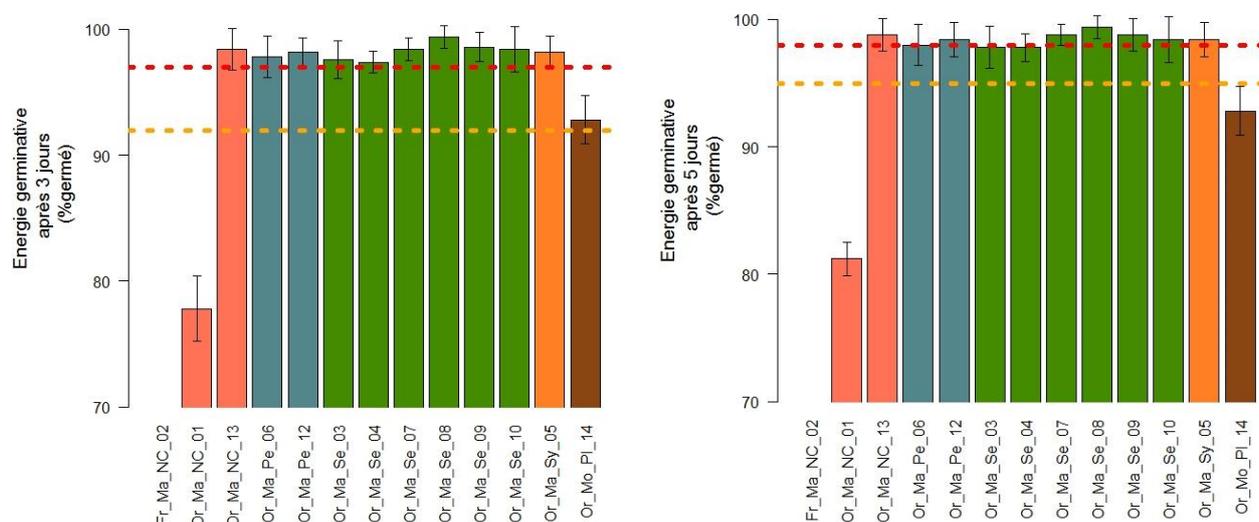


Figure 13: Energies germinatives des échantillons d'orge après 3 jours (gauche) et après 5 jours (droite)

Tableau 5: Résultats ANOVA 1 pour l'énergie germinative des échantillons d'orge après 5 jours

Échantillon	01	14	04	03	06	05	10	12	09	07	13	08
Valeur	81.2	92.8	97.8	97.8	98	98.4	98.4	98.4	98.8	98.8	98.8	99.4
Groupe	c	b	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a

Tableau 6: Résultats ANOVA 1 pour l'énergie germinative des échantillons d'orge après 5 jours

Échantillon	01	14	04	03	06	05	12	10	07	13	09	08
Valeur	77.8	92.8	97.4	97.6	97.8	98.2	98.2	98.4	98.4	98.4	98.6	99.4
Groupe	c	b	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a

L'énergie germinative reflète la qualité du travail du cultivateur et du stockeur ainsi que l'aptitude du grain à germer lors du maltage. Ce dernier point est essentiel pour le malteur. Il s'agit d'une analyse importante mais qui nécessite la levée de la dormance. La Figure 13 et les résultats de tukey-kramer sur base de l'ANOVA 1 (Tableau 5 et 6) au sujet de l'énergie germinative montrent que les échantillons **01** et **14** sont significativement différents des autres. Comme mentionné plus haut, l'échantillon **01** présentait de mauvaises odeurs malgré son humidité correcte, ce qui témoigne de mauvaises conditions de stockage, résultant ici en une diminution de l'énergie germinative. L'échantillon **14** a quant à lui souffert de son humidité trop élevée.

Une analyse des mycotoxines nous indiquerait probablement des teneurs plus élevées pour le lot 01. Cependant, d'un point de vue technique, les analyses ultérieures ne montrent pas de sérieux problèmes pour le malt résultant, ce qui indique qu'un seuil plus bas (93% après 5 jours) pourrait suffire à assurer la qualité du malt.

La p-value de 0.085 obtenue pour l'ANOVA 2 nous montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les résultats après 3 et 5 jours. Un gain de temps pourrait être obtenu en ne mettant en œuvre la méthode que pour 3 jours avec un seuil de 90%. Cette constatation est due à la sélection des

variétés qui a poussé vers des variétés germant plus facilement et dont la dormance est moins longue. La comparaison 3 jours/5 jours permettait avant de voir une éventuelle hétérogénéité dans la germination.

3. RVA-Hagberg

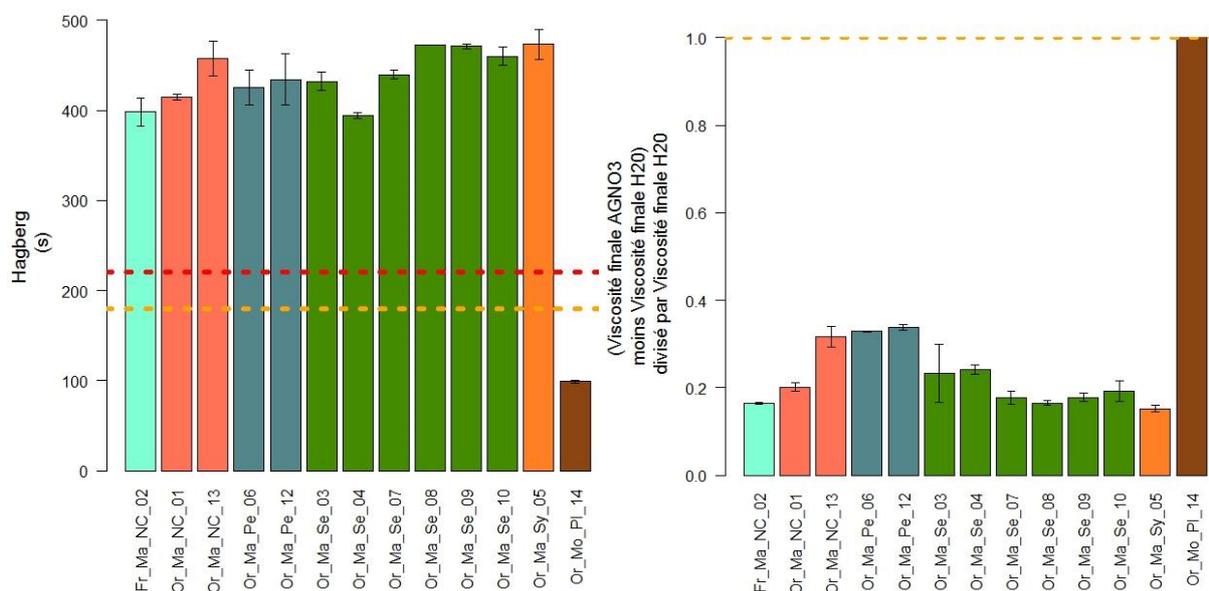


Figure 14: Temps de chute de Hagberg (gauche) et RVA (droite) pour les échantillons d'orge

Tableau 7: Résultat ANOVA pour le temps de chute de Hagberg des échantillons d'orge

Échantillon	14	04	02	01	06	03	12	07	13	10	09	08	05
Valeur	99	394	398	414	425	432	434	439	457	460	471	472	473
Groupe	**	c	c	bc	abc	abc	abc	abc	ab	ab	a	a	a

Tableau 8: Résultats ANOVA pour le paramètre RVA repris dans la Figure 14

Échantillon	05	02	08	07	09	10	01	03	04	13	06	12	14
Valeur	0.152	0.163	0.164	0.177	0.178	0.193	0.202	0.232	0.242	0.316	0.329	0.338	39.160
Groupe	d	d	d	d	d	d	d	cd	bcd	abc	ab	a	**

Les limites minimums proposées pour le temps de chute de Hagberg sont celles appliquées pour les froments les années jugées bonnes (seuil sévère) ou mauvaises (seuil souple). Elles ne sont présentes que pour informer grossièrement de l'activité enzymatique. Une étude devrait être menée pour adapter ces seuils à l'orge. L'échantillon **14** a été éliminé du test de Tukey-Kramer sur base de l'ANOVA 1 car il montre une valeur extrême et cache les différences, plus faibles, des autres échantillons. Le test ne définit donc pas de groupe d'appartenance, il n'est donc pas référencé par une lettre mais par « ** » dans le Tableau 7.

Ces deux analyses donnent des résultats similaires sous cette forme et renseignent sur la pré-germination d'un lot. Cette pré-germination peut être liée à un stockage non optimal de l'orge ou à une récolte de l'orge trop tardive à cause d'une météo trop pluvieuse. L'analyse RVA, bien que plus longue, devrait être privilégiée en cas de choix car la différence entre un lot standard et pré-germé est bien plus important que dans le temps de chute de Hagberg. En effet, il est probable que la limite

entre « capacité enzymatique élevée » et « pré-germination », dans certains cas, ne soit pas si catégorique dans le cas du temps de chute de Hagberg. D'autant plus que le RVA fournit plusieurs paramètres contrairement au temps de chute de Hagberg.

Ces graphiques et le test de Tukey-Kramer sur base de l'ANOVA 1 (Figure 14 et Tableaux 7 et 8) montrent que l'échantillon **14** présente un fort taux de pré-germination, probablement dû à son humidité de stockage.

4. Protéines totales

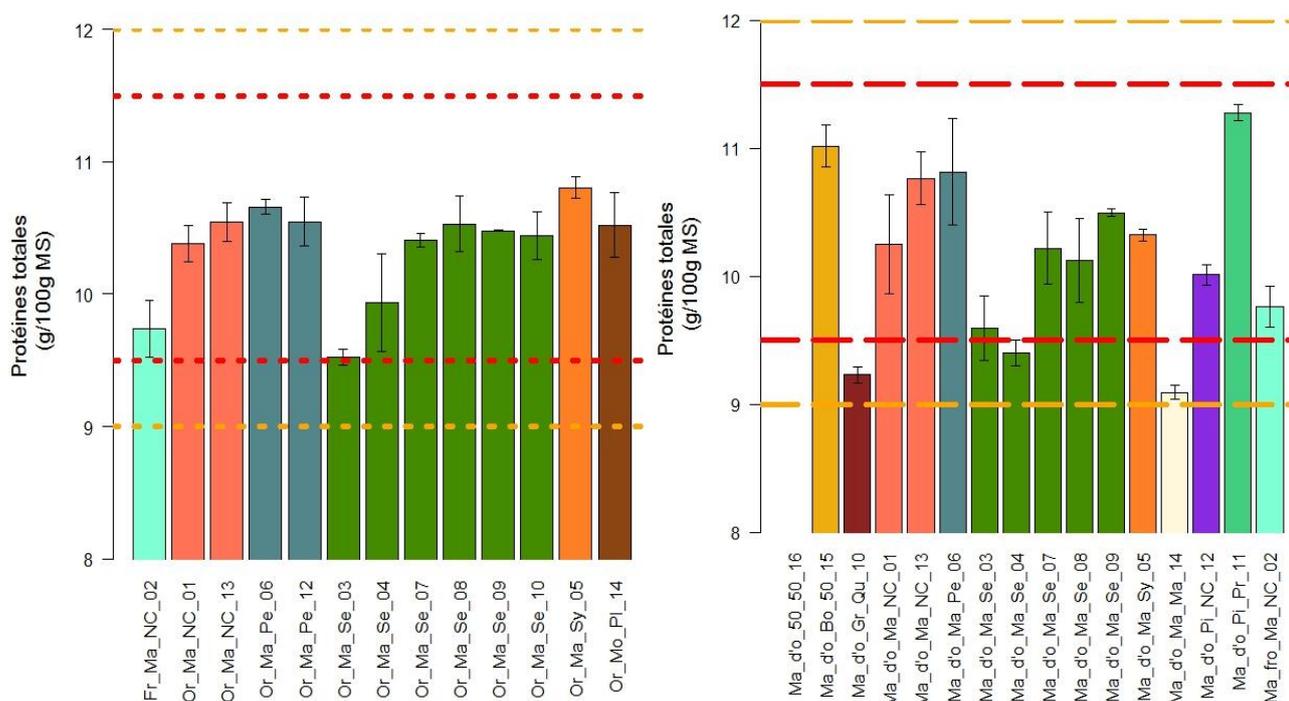


Figure 15: Teneur en protéines totales des échantillons d'orges (gauche) et de malts (droite)

Tableau 9: Résultats ANOVA 1 pour la teneur en protéines totales des échantillons d'orge

Échantillon	03	02	04	01	07	10	09	14	08	13	12	06	05
Valeur	9.52	9.74	9.94	10.38	10.41	10.44	10.48	10.52	10.53	10.54	10.55	10.66	10.80
Groupe	d	cd	bcd	abc	abc	abc	ab	ab	ab	ab	ab	a	a

Tableau 10: Résultats ANOVA 1 pour la teneur protéines totales des échantillons de malt

Échantillon	14	10	04	03	02	12	08	07	01	05	09	13	06	15	11
Valeur	9.09	9.23	9.40	9.60	9.76	10.01	10.13	10.22	10.25	10.32	10.5	10.76	10.82	11.02	11.28
Groupe	h	gh	fgh	efgh	defgh	cdefg	cdef	bcdef	bcdef	bcde	abcd	abc	abc	ab	a

Tous les échantillons d'orge respectent le cahier des charges le plus sévère pour les teneurs en protéines (Figure 15 gauche). Les teneurs en protéines sont bonnes. Il s'agit de nouveau du travail de sélection des variétés mais également la maîtrise de la fertilisation qui permet aujourd'hui d'obtenir des teneurs en protéines adéquates.

Sur la Figure 15 droite, certains malts sont sous la limite la plus sévère mais il s'agit de malts industriels, ce qui laisse à penser que le seuil le plus sévère n'est pas adapté.

L'ANOVA 2 donne une p-value de 0.044, annonçant une différence faiblement significative de la teneur en protéines dans les orges par rapport à celle dans les malts. Cette analyse est ramenée à 100 g de matière sèche, la proportion relative en protéines reste donc relativement stable malgré les modifications subies par le grain lors du maltage. Cela est dû au transfert de matières azotées vers les radicules, qui sont retirées en fin de processus, conjointement à la diminution du poids du spécifique du grain.

La teneur en protéines n'a pas d'impact technologique sur le brassage mais sur la bière finie. Les seuils sont donc présents pour assurer les propriétés organoleptiques de la bière. Un seuil minimal de 9% est cependant plus pertinent que les 9.5% préconisés par l'industrie. Au-delà de la discussion sur la quantité de protéines, il est important de parler de leur qualité. En effet, comme décrits en Partie I de ce travail, il existe plusieurs familles de protéines présentant des propriétés technofonctionnelles différentes. Elles réagiront différemment au maltage ainsi qu'au brassage pour aboutir à un profil en matières azotées fortement impliqué dans les propriétés organoleptiques de la bière.

5. Poids de 1000 grains

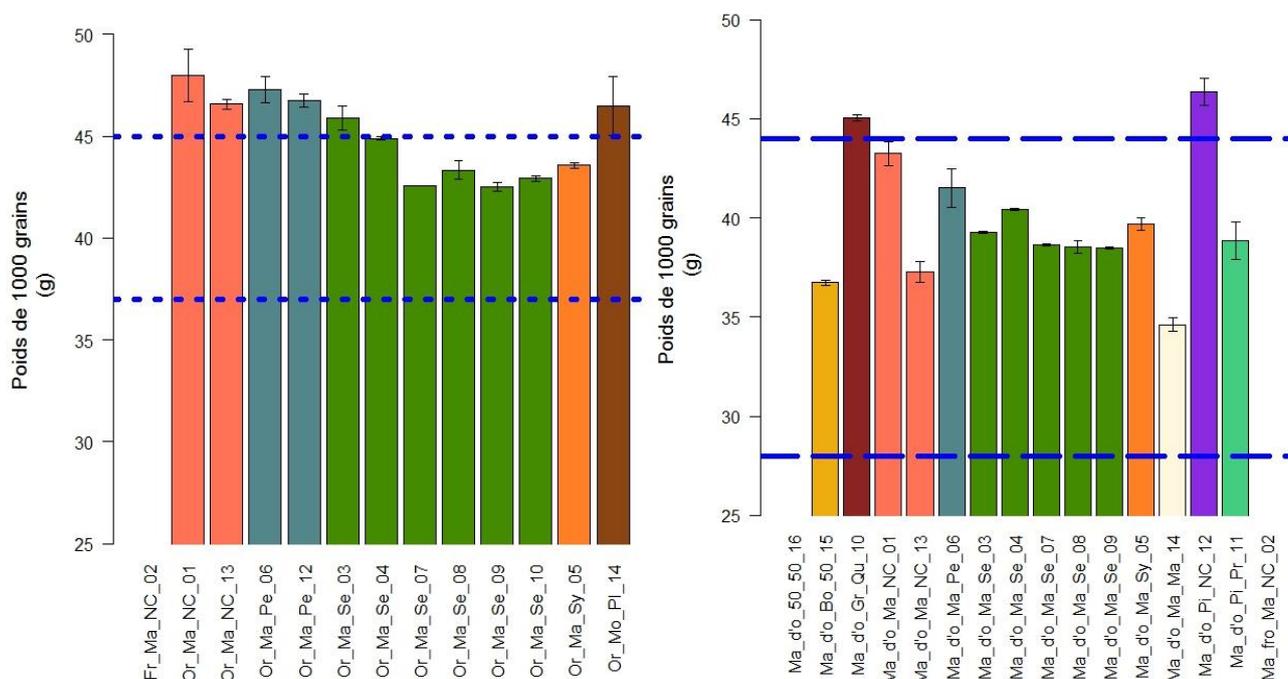


Figure 16: Poids de 1000 grains des échantillons d'orge (gauche) et de malt (droite)

Tableau 11: Résultats ANOVA 1 pour les poids de 1000 grains des échantillons d'orge

Échantillon	09	07	10	08	05	04	03	14	13	12	06	01
Valeur	42.5	42.5	42.9	43.3	43.6	44.9	45.9	46.5	46.6	46.7	47.3	48.0
Groupe	d	d	d	cd	cd	bcd	abc	ab	ab	ab	ab	a

Tableau 12: Résultats ANOVA 1 sur les poids de 1000 grains des échantillons de malt

Échantillon	14	15	13	09	08	07	11	03	05	04	06	01	10	12
Valeur	34.6	36.7	37.3	38.5	38.5	38.6	38.8	39.2	39.7	40.4	41.5	43.2	45.0	46.4
Groupe	h	g	fg	efg	efg	efg	ef	e	de	de	cd	bc	ab	a

Cette mesure ne fait pas partie du cahier des charges des malteurs de manière générale. Le poids de 1000 grains d'orge se trouve souvent entre 37 et 45 g/1000 grains. Le poids de 1000 grains d'orge dépend principalement de la variété et des conditions climatiques au cours de la croissance. Des grains bien remplis donneront potentiellement plus d'extrait car le grain sera d'un calibre plus grand, c'est-à-dire plus d'amidon, moins de protéines et moins de polyphénols. Les orges présentées à la Figure 16 (gauche) sont tous prometteurs.

Le poids de 1000 grains de malt dépend évidemment du poids de 1000 grains des orges initiales mais également du processus de maltage. En effet, une valeur trop élevée peut résulter d'une sous désagrégation et inversement.

La Figure 16 (droite), accompagné des résultats de Tukey-Kramer sur base de l'ANOVA 1 (Tableau 12), montrent une différence significative du malt **10** et **12**. N'ayant pas d'analyse de l'orge initiale pour ces deux échantillons, il est important de commenter ces différences en lien avec d'autres analyses informant sur la désagrégation du malt.

L'ANOVA 2 donne une p-value $< 10^{-15}$ indiquant une différence très significative avant et après maltage ce qui se justifie par le gonflement de l'orge au trempage et à la germination qui ne sera pas totalement rattrapé par le touraillage. Cette affirmation se confirme par la mesure du poids de 1000 grains qui diminue d'environ 10% en moyenne au cours du maltage alors que le poids à l'hectolitre diminue d'environ 20%. Les grains prennent donc plus de place pour un même poids une fois maltés.

6. Calibre

6.1. Calibrage supérieur à 2.5 mm (AB)

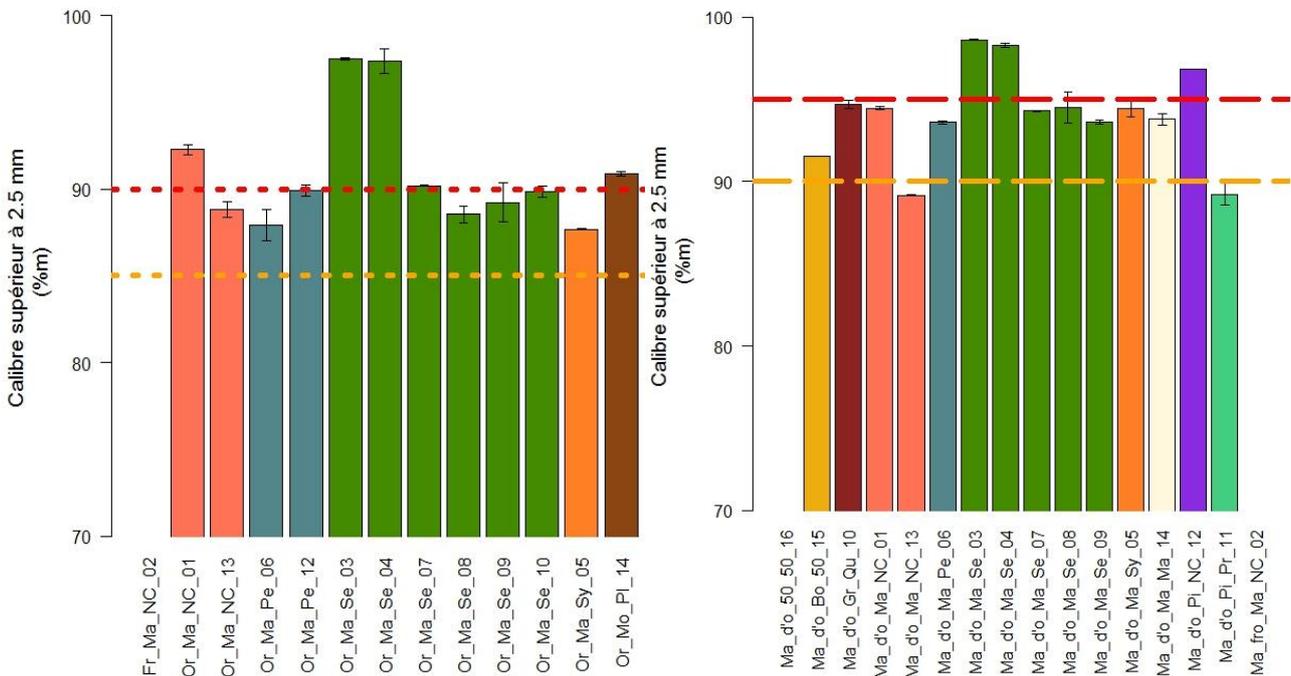


Figure 17: Calibre supérieur 2.5 mm des échantillons d'orge (gauche) et des échantillons de malt (droite)

Tableau 13: Résultats ANOVA 1 pour le calibrage supérieur à 2.5 mm des échantillons d'orge

Échantillon	05	06	08	13	09	10	12	07	14	01	04	03
Valeur	87.7	87.9	88.5	88.8	89.2	89.8	89.9	90.2	90.9	92.3	97.4	97.5
Groupe	f	ef	def	def	cdef	cde	Cde	cd	bc	b	a	a

Tableau 14: Résultats ANOVA 1 sur le calibrage supérieur à 2.5 mm des échantillons de malt

Échantillon	13	11	15	06	09	14	07	05	01	08	10	12	04	03
Valeur	89.2	89.2	91.5	93.6	93.6	93.8	94.3	94.4	94.4	94.5	94.7	96.8	98.3	98.6
Groupe	e	e	d	c	c	c	c	c	c	c	c	b	a	a

Le calibrage aux Figure 17 gauche et droite nous montre que les échantillons d'orge et de malt sont globalement sous la limite sévère appliquée par l'industrie. Au vu des résultats ultérieurs, les limites souples s'avèrent suffisantes pour assurer la qualité du malt résultant, d'autant plus que nos références de malts industriels (**10**, **14** et **15**) n'atteignent pas cette limite. Les lots numéro **03** et **04** ont subi un travail de prétraitement exemplaire.

Les résultats du test de Tukey-Kramer sur base de l'ANOVA 1 (Tableau 14) nous montrent que les lots de malts **11** et **13** sont statistiquement différents des autres même si, en pratique, il est difficile de percevoir une différence entre 89.2% et la limite souple de 90%

Les résultats de l'ANOVA 2 quant à eux donnent un P-value de 2.035e-08, indiquant qu'il existe une différence très hautement significative entre le calibre avant et après maltage, ce qui confirme l'hypothèse du gonflement du grain au cours du processus. C'est cette hypothèse qui explique les seuils plus sévères pour le malt que pour l'orge.

6.2. Calibrage inférieur à 2.2mm et grains cassés (CD)

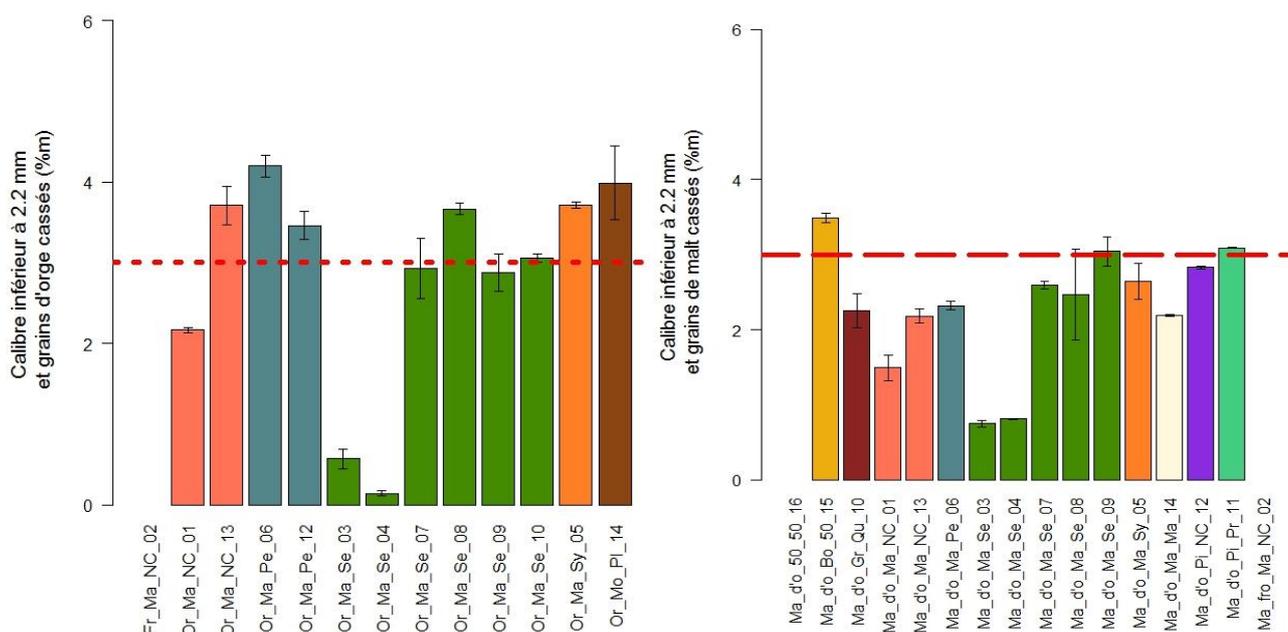


Figure 18: Proportion de grains inférieur à 2.2 mm ou cassés dans les échantillons d'orge (gauche) et de malt (droite)

Tableau 15: Résultats ANOVA 1 sur les proportions de grains inférieur à 2.2 mm ou cassés dans les échantillons d'orge

Échantillon	04	03	01	09	07	10	12	08	13	05	14	06
Valeur	0.14	0.57	2.17	2.88	2.93	3.06	3.46	3.67	3.71	3.71	3.98	4.20
Groupe	e	e	d	cd	bcd	bc	abc	abc	abc	ab	a	a

Tableau 16: Résultats ANOVA 1 sur les proportions de grains inférieur à 2.2mm ou cassés dans les échantillons de malt

Échantillon	03	04	01	13	14	10	06	08	07	05	12	09	11	15
Valeur	0.75	0.81	1.49	2.18	2.19	2.25	2.32	2.47	2.60	2.64	2.83	3.04	3.09	3.49
Groupe	f	f	ef	de	de	cde	bcd	bcd	bcd	bcd	abcd	abc	ab	a

La Figure 18 (gauche) montre la proportion de grains inférieure à 2.2 mm ou cassés, ce qui permet d'évaluer un peu plus en profondeur la qualité des lots d'orge. Une trop grande hétérogénéité dans la distribution des calibres peut entraîner des pertes de rendement au brassage due à un broyage inadapté dû à la fixation des réglages du moulin mais également à l'hétérogénéité des désagréments. Les grains cassés quant à eux seront les principaux sites de développement des moisissures lors du maltage, il est important d'en limiter la présence. Au total, 7 des échantillons dépassent la limite des 3%, ce qui n'empêchera pas leur maltage car les valeurs sont raisonnables en pratique. Cette analyse devrait être mise en lien avec une analyse des mycotoxines.

Pour ce qui est des malts, cette analyse permet d'informer sur la présence de grains qui ne seront pas ou peu broyés car trop petits et pourraient générer des pertes de rendement au brassage. On voit cependant que la référence industrielle (malt 15) surpasse les autres de manière significativement différente, ce qui permet d'affirmer que les lots de malt sont globalement propres.

Les résultats de l'ANOVA 2 nous donnent un p-value de 0.008 soit une différence significative entre les lots avant et après maltage. En effet, une partie des particules plus légères sont évacuées au cours du maltage par flottaison à la trempe ou lors du dégermage.

7. Brassins conventionnels

7.1. Brassins conventionnels: Temps de saccharification

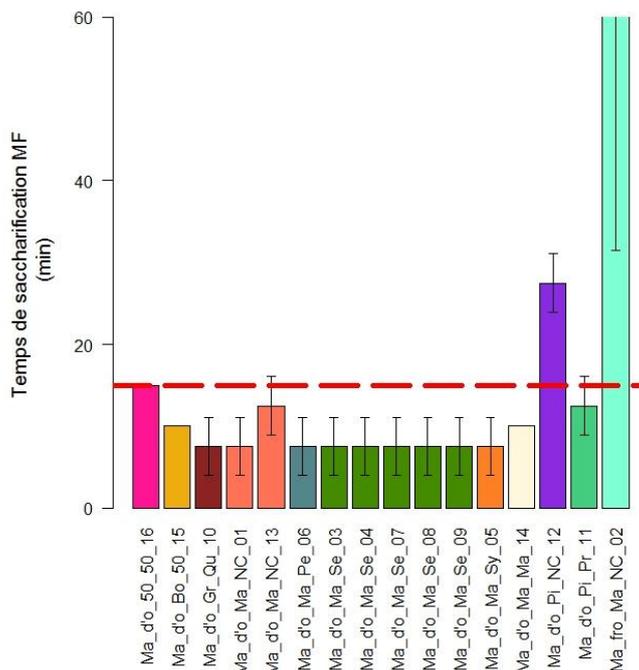


Figure 19: Temps de saccharification des échantillons de malt lors du brassin conventionnel

Tableau 17: Résultats ANOVA 1 sur les temps de saccharification des échantillons de malt

Échantillon	05	09	08	07	04	03	06	01	10	14	15	11	13	16	12	02
Valeur	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	10	10	12.5	12.5	15	27.5	77.5
Groupe	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	b	ab	a	**

Le temps de saccharification (Figure 19) informe sur la capacité enzymatique du malt. L'analyse de la variance à 1 critère (Tableau 17) fixe a été réalisée en excluant le froment (échantillon **02**) de la liste. En effet, sa valeur considérablement plus élevée empêche le test statistique de bien distinguer les temps de saccharification plus courts. Le malt de froment n'est jamais utilisé à 100% dans une recette de brasseur et les valeurs limites proposées ne sont pas adaptées au malt de froment. De ce fait, il ne faut pas s'attarder sur cet aspect pour ce malt. Il est ici sous-désagrégé ce qui explique les problèmes rencontrés lors des brassins conventionnels. En revanche, l'échantillon **16**, correspondant à 50% de malt référence et 50% de malt de froment ne montre pas de problème. Cette proportion représente un maximum d'utilisation du froment, les limites présentées ici peuvent donc lui être appliquées mais il faut rester critique quant à leur interprétation.

L'échantillon **12** présente un temps de saccharification anormalement long (Figure 19 et Tableau 16). Il laisse apparaitre une sous désagrégation empêchant les enzymes, probablement peu développées, d'accéder correctement au contenu amylacé. Ce résultat concorde avec un poids de 1000 grains élevé résultant d'une sous désagrégation. Ce n'est cependant pas le cas pour l'échantillon **10** qui laisse penser que les grains d'orge étaient initialement plus lourds.

Cette méthode est très importante car elle renseigne sur un problème technique fréquemment rencontré en brasserie, il est important que la saccharification se déroule sans problème.

7.2. Brassins conventionnels: Rendements secs et différences fines/grosses moutures

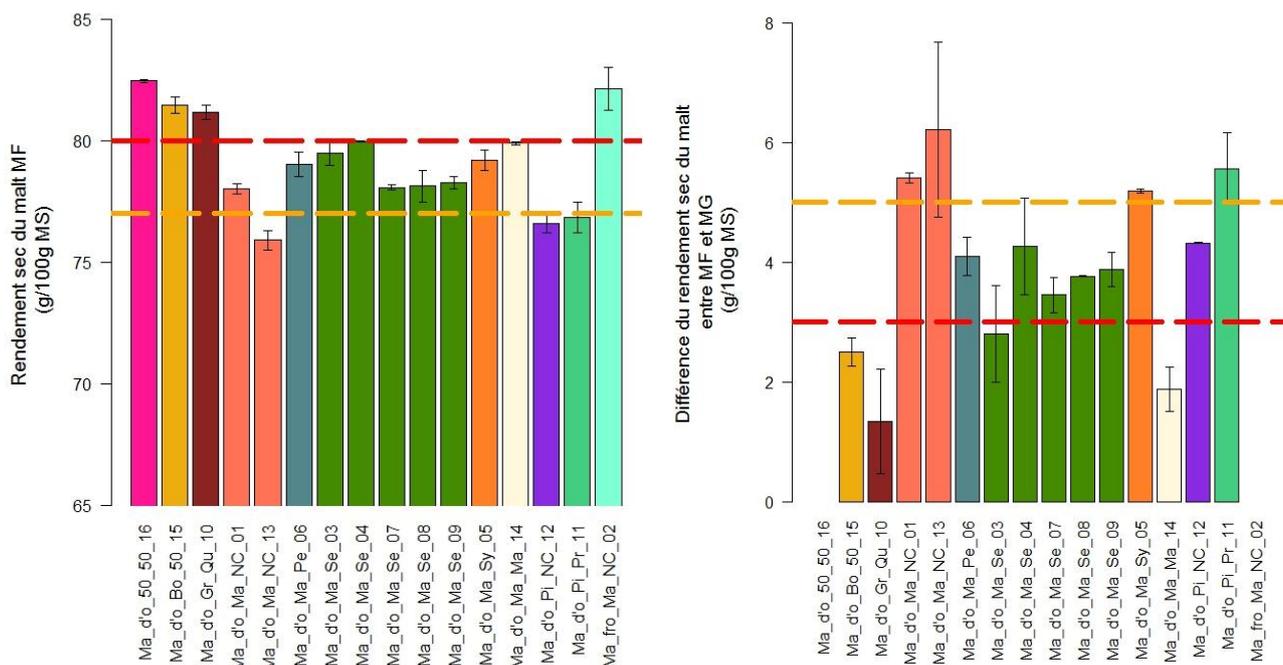


Figure 20: Rendements rapportés à la matière sèche des échantillons de malt calculés sur base de l'extrait contenu dans le moût et l'humidité du malt (gauche) et différence de rendement entre fine et grosse mouture (droite)

Tableau 18: Résultats ANOVA 1 sur les rendements secs des échantillons de malt

Échantillon	13	12	11	01	07	08	09	06	05	03	14	04	10	15	02	16
Valeur	75.9	76.6	76.8	78.0	78.1	78.1	78.3	79.0	79.2	79.5	79.9	80.0	81.1	81.5	82.1	82.4
Groupe	h	gh	fgh	efg	efg	efg	def	de	de	cde	bcd	bcd	abc	ab	a	a

Tableau 19: Résultats ANOVA 1 sur les différences de rendements secs entre moutures fines et grossières

Échantillon	10	14	15	03	07	08	09	06	04	12	05	01	11	13
Valeur	1.3	1.9	2.5	2.8	3.4	3.8	3.9	4.1	4.3	4.3	5.2	5.4	5.6	6.2
Groupe	f	ef	def	cdef	bcdef	bcde	abcde	abcde	abcde	abcd	abc	ab	ab	a

La figure 20 gauche montre que les rendements secs se distribuent sur une large gamme de valeurs. Les échantillons **02** et **16** offrent de très bons rendements secs (Tableau 18), ce qui permet d'affirmer que le froment augmente le rendement sec, et cela en raison de l'absence d'enveloppes qui augmente la proportion d'amidon. Ces deux échantillons sont suivis par le malt de chez Boortmalt, de chez Greenfarm et enfin un malt artisanal. Ces 5 échantillons sont les seuls à passer le seuil de 80%. Les malts offrant des rendements inférieurs à 76% sont les malts **11**, **12** et **13**. L'échantillon 12 sort encore une fois des limites. Les échantillons 11 et 13 sont ceux présentant des calibres supérieurs à 2.5 mm plus faibles. Cela peut s'expliquer par une proportion d'amidon plus faible lorsque le volume du grain diminue.

La différence entre l'extrait obtenue avec fine ou grosse mouture doit être aussi faible que possible. Les seuls malts respectant le seuil le plus strict sont les 3 malts industriels (Figure 20 droite). Le malt **13** a posé un problème de rendement perceptible par le brasseur en pratique, ce qui se confirme avec cette différence fine/grosse mouture (Tableau 19) en plus du rendement initialement inférieur (Tableau 18).

Les limites proposées ici pourraient être ramenées à 4% pour satisfaire aux exigences du brasseur et à la technologie du maltage artisanal. Cependant, il est important de noter que ce paramètre est issu du rapport entre 2 autres paramètres, il y a donc une propagation de l'erreur dans la valeur finale. Ce paramètre renseigne sur l'hétérogénéité du maltage et devrait être discuté en comparaison avec l'analyse de friabilité, plus rapide (8min) et moins couteuse à mettre en place.

7.3. Brassins conventionnels: pH et couleur des moûts

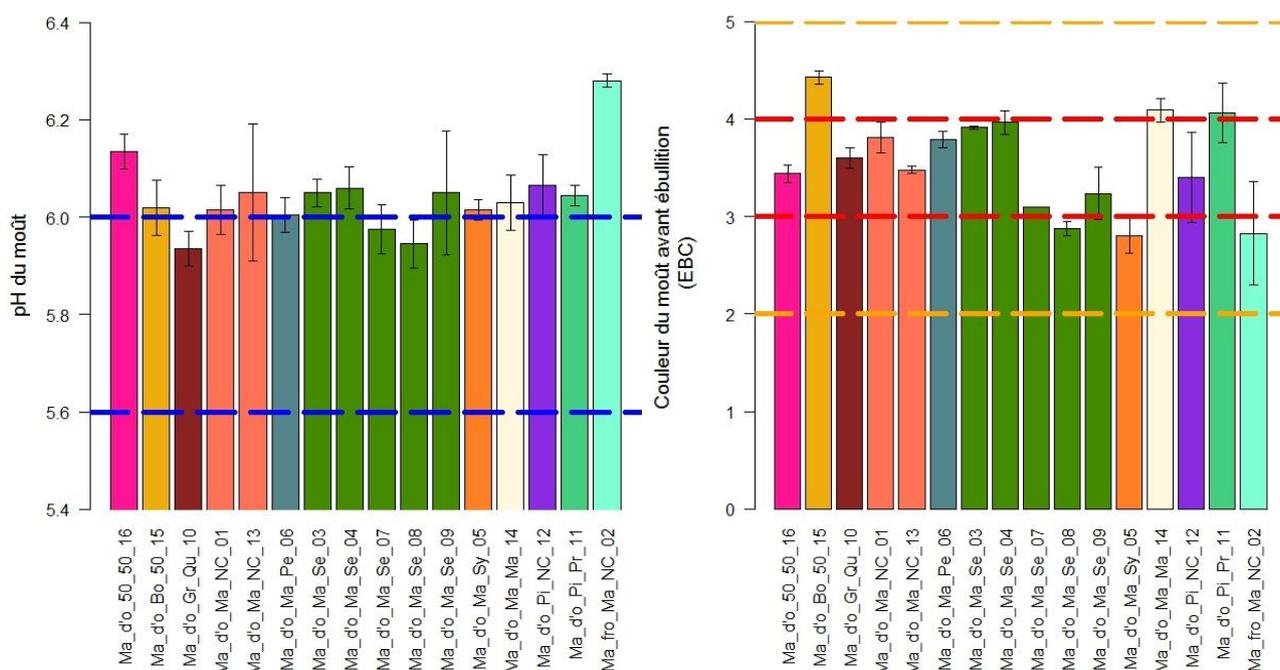


Figure 21: pH (gauche) et couleur (droite) des moûts issus des échantillons de malt

Tableau 20: Résultats ANOVA 1 sur les pH issus des échantillons de malt

Échantillon	10	08	07	06	05	01	15	14	11	09	03	13	04	12	16	02
Valeur	5.93	5.94	5.97	6.00	6.01	6.02	6.03	6.04	6.05	6.05	6.05	6.05	6.06	6.06	6.13	6.28
Groupe	b	b	b	b	b	b	b	b	ab	a						

Tableau 21: Résultats ANOVA 1 sur la couleur des moûts issus des échantillons de malt

Échantillon	05	02	08	07	09	12	16	13	10	06	01	03	04	11	14	15
Valeur	2.80	2.82	2.87	3.10	3.24	3.40	3.44	3.47	3.60	3.79	3.81	3.91	3.96	4.06	4.09	4.42
Groupe	d	d	d	cd	bcd	bcd	bcd	bcd	abcd	abc	abc	abc	abc	ab	ab	a

Les amylases du malt ont un optimum d'efficacité pour un pH de 5.7, c'est pourquoi le moût obtenu devrait s'en rapprocher le plus possible. La figure 21 gauche montre que peu d'échantillons présentent un pH inférieur à 6.0, notamment le malt de référence de chez Boortmalt. Cependant, l'analyse de la variance ne montre pas de différence statistique entre les échantillons à l'exception du malt de froment (Tableau 20).

La couleur des moûts (Figure 21 droite) permet d'évaluer l'exposition thermique lors du touraillage. Il ne constitue pas un critère de qualité pratique d'autant plus qu'entre 3 et 4 EBC, la différence n'est pas perceptible. Elle l'est un peu plus entre 2 et 5 EBC mais la couleur finale de la bière dépendra beaucoup de l'étape d'ébullition appliquée par le brasseur.

Ces deux mesures constituent des paramètres garants du bon déroulement du procédé de maltage dans le sens où elles ne peuvent pas s'éloigner de ces valeurs sans qu'il n'y ait une grosse différence dans le processus de maltage. La méthode est pertinente pour s'assurer qu'on ne passe pas à côté d'un gros défaut, d'autant plus qu'une fois le brassin conventionnel réalisé, ces deux mesures ne prennent que 10 minutes.

7.4. Brassins conventionnels: Azote α -aminé dans les moûts et indice de Kolbach des malts

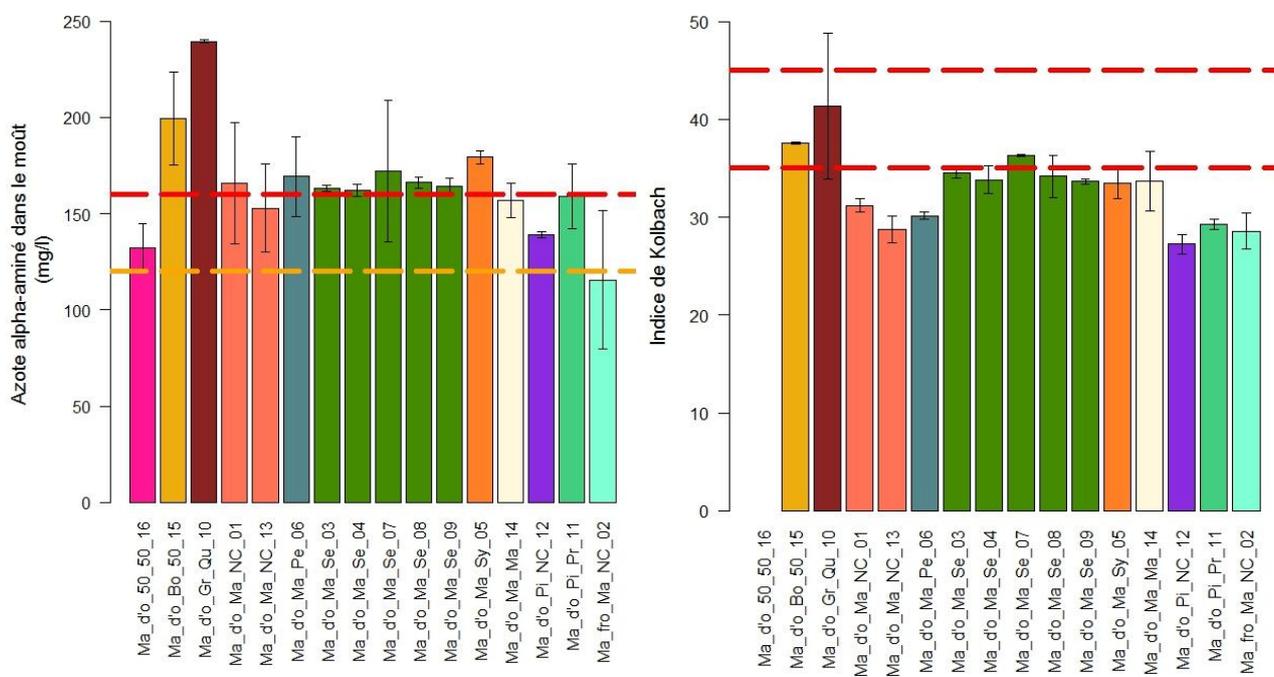


Figure 22: Quantité d'azote α -aminé dans les moûts issus des échantillons de malt (gauche) et indice de Kolbach de ces malts (droite)

Tableau 22: Résultats ANOVA 1 sur les quantités d'azote α -aminé dans les moûts issus des échantillons de malt

Échantillon	02	16	12	13	14	11	04	03	09	01	08	06	07	05	15	10
Valeur	115	132	139	153	157	159	162	163	164	166	166	169	172	179	199	239
Groupe	e	de	cdz	cdz	bcdz	bcdz	bcd	bc	ab	a						

Tableau 23: Résultats ANOVA 1 sur les indices de Kolbach des échantillons de malt

Échantillon	12	02	13	11	06	01	08	14	05	09	03	04	07	15	10
Valeur	27.4	28.2	28.4	29.2	29.3	32.1	33.4	33.5	33.6	33.7	33.9	34.1	35.6	37.2	41.1
Groupe	e	e	e	de	de	cde	bcd	bcd	bcd	bcd	bcd	bcd	bc	ab	a

Les seuils d'azote α -aminé (Figure 22 gauche) représentent la limite nécessaire pour le développement de la levure. Hormis l'échantillon **02**, qui n'est de toute façon pas utilisé à 100% pour le brassage, tous les échantillons fournissent une quantité suffisante de FAN pour assurer le bon déroulement de la fermentation selon le seuil le plus souple. Il faudrait procéder à une fermentation des moûts pour évaluer la pertinence de ces limites. Le résultat pour le malt **10** annonce une désagrégation plus avancée que les autres échantillons. Des seuils maximum devraient également être investigués car, en présence d'une quantité trop importante de nutriments, la levure peut se développer exagérément et fournir des métabolites non désirés.

L'indice de Kolbach informe sur la dégradation des protéines durant le processus de maltage. La Figure 22 droite, en lien avec les résultats de Tukey-Kramer sur base de l'ANOVA 1 (Tableau 23), montre que les échantillons **02**, **12** et **13** sont significativement différents des autres ce qui permet d'affirmer qu'ils sont sous désagrégés. Une sous désagrégation des protéines peut impliquer la présence de protéines « gels » posant des problèmes de saccharification et/ou de filtration. Dans le cas de l'échantillon **12** cette sous-désagrégation se reflète dans le manque de développement enzymatique, le rendement, le temps de saccharification et le poids de 1000 grains. Dans le cas de l'échantillon **13**, des problèmes sont constatés au niveau de la différence de rendement et la différence de rendement entre fine et grosse mouture. L'échantillon **02** présente quant à lui des problèmes à tout niveau étant donné qu'il s'agit de froment et que la désagrégation n'a pas été menée à bien lors du maltage Ces résultats confirment aussi que le malt **10** est particulièrement bien désagrégé.

Malgré la distribution plutôt basse des autres malts, ces seuils assurent, en plus des caractéristiques pratiques, des qualités organoleptiques importantes. Le maltage artisanal devrait se trouver dans ces limites, quitte à allonger un peu le temps de germination.

Ces deux analyses sont très pertinentes pour déterminer la désagrégation des protéines. Les analyses en composantes principales nous renseigneront sur la corrélation entre les deux et la possibilité de se contenter de l'une des deux.

7.5. Brassins conventionnels: viscosité des moûts

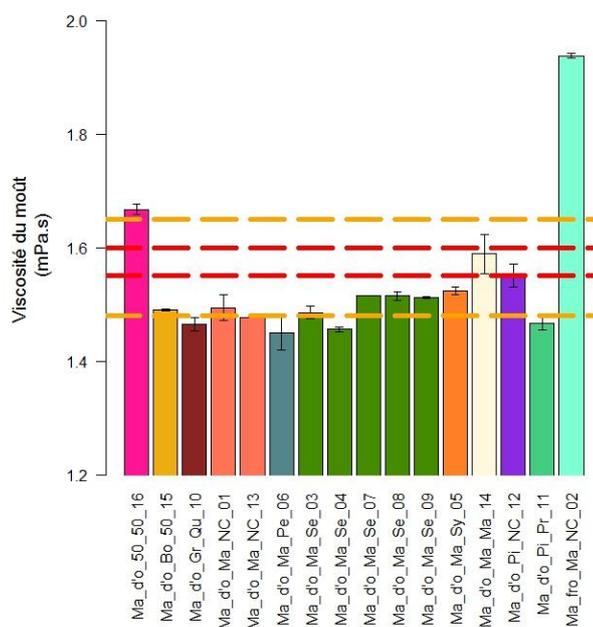


Figure 23: Viscosité des moûts issus des échantillons de malt

Tableau 24: Résultats ANOVA 1 sur la viscosité des moûts issus des échantillons de malt

Échantillon	06	04	10	11	13	03	15	01	09	07	08	05	12	14	16	02
Valeur	1.45	1.456	1.465	1.466	1.477	1.486	1.49	1.494	1.512	1.515	1.515	1.524	1.551	1.588	1.668	1.938
Groupe	g	fg	efg	efg	efg	efg	efg	defg	def	def	def	de	cd	c	b	a

La viscosité du moût est due à la présence de bêta-glucanes et d'arabinoxylanes insuffisamment dégradés. D'ailleurs les échantillons **02** et **16** (Figure 23) donnent des moûts beaucoup plus visqueux

car le froment n'est que peu désagrégé. Contrairement aux analyses précédentes, le malt **12** ne présente pas de différence significative et se trouve dans les limites les plus sévères. Les problèmes liés à cet échantillon ne sont donc pas issus d'une mauvaise dégradation des hémicelluloses mais plutôt de la présence de protéines gels insuffisamment dégradées.

Au vu du travail de sélection appliqué aux orges ces dernières décennies, il serait intéressant de vérifier si un seuil n'a pas été atteint dans la proportion des hémicellulose, rendant obsolète, ou du moins non probante, cette analyse. D'ailleurs le malt **14**, issu d'une ancienne variété (sortie en 1965), est un peu plus visqueux que les autres malts alors qu'il ne se distingue pas des autres dans les analyses antérieures.

7.6. Brassins conventionnels: polyphénols dans les moûts

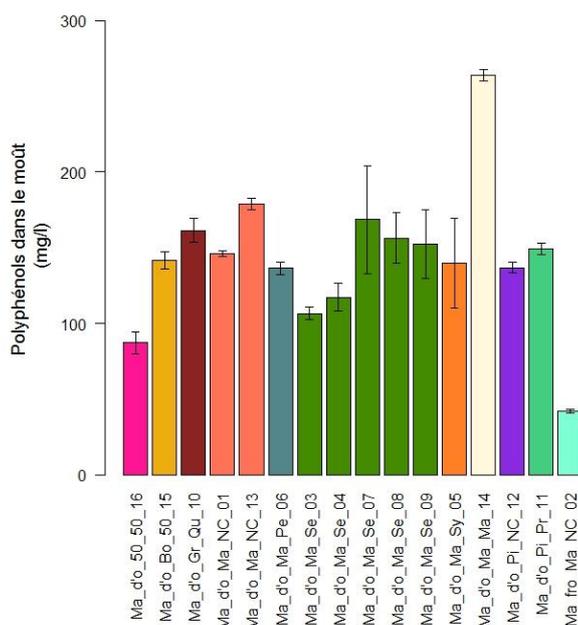


Figure 24: Quantité de polyphénols présents dans les moûts issus des échantillons de malt

Tableau 25: Résultats ANOVA 1 sur la quantité de polyphénols présents dans les moûts issus des échantillons de malt

Échantillon	02	16	03	04	06	12	05	15	01	11	09	08	10	07	13	14
Valeur	42	87	107	117	136	137	140	141	146	149	1522	156	161	169	179	264
Groupe	h	g	fg	efg	def	def	cde	cde	cde	bcd	bcd	bcd	bcd	abc	b	a

Comme mentionné plus haut, la problématique des polyphénols n'est pas catégorique. Aucun seuil n'est appliqué mais il est néanmoins intéressant de comparer les échantillons entre eux.

Sur la Figure 24, en se référant aux malts **10** et **15** qui sont des malts industriels, il s'avère que les malts artisanaux ne sont pas significativement différents excepté pour les échantillons **02** et **16**, très pauvres en enveloppes externe, source principale de polyphénols. Comme mentionné plus haut, il persiste une polémique autour des polyphénols. Des études plus poussées pourraient permettre d'établir des seuils critiques du caractère antioxydant et pro oxydant. Ces valeurs serviraient aux sélectionneurs et non aux malteurs et brasseurs qui n'ont peu d'impact sur la teneur finale en polyphénols (additifs à la trempé ou temps d'empâtage).

Le malt **14** quant à lui est une variété d'orge d'hiver rustique dont les enveloppes sont bien plus épaisses. Il est intéressant de noter que cette variété n'a pas subi de pression de sélection depuis les

années 60 contrairement à l'échantillon 05, également une orge d'hiver mais de sélection récente et donc à enveloppes plus fines. Les échantillons 03 et 04 quant à eux présentent de faibles teneurs en polyphénols, probablement dû à un calibre important et donc une proportion de polyphénols plus faible pour une masse donnée.

8. Activités des amylases

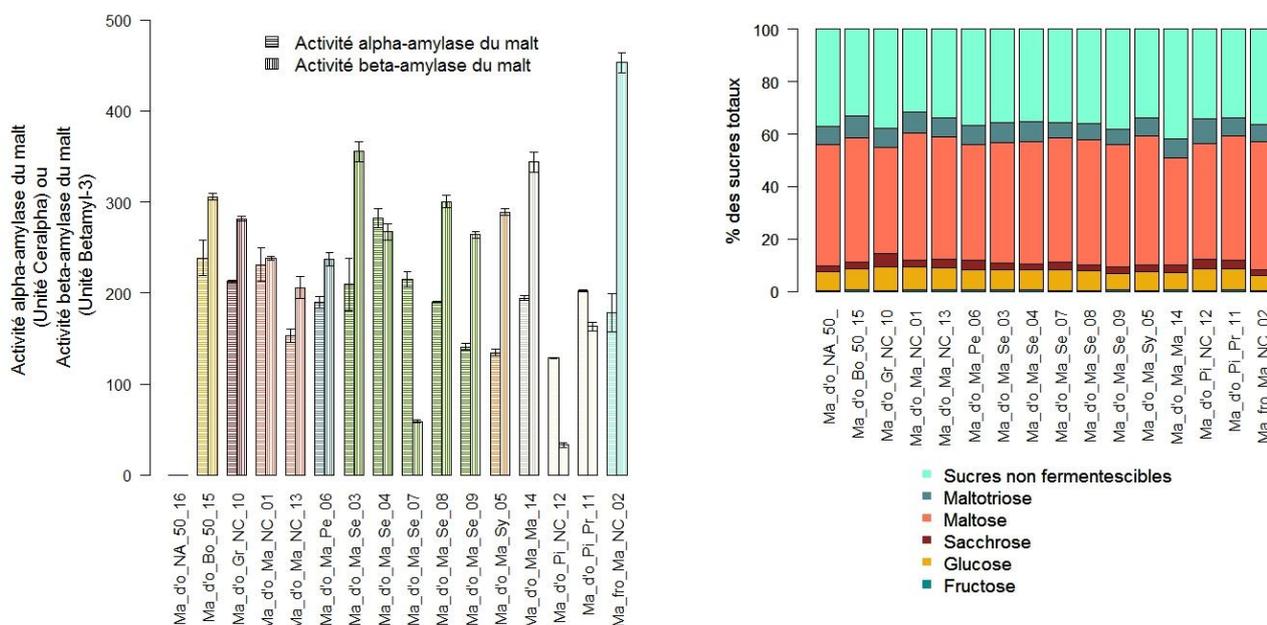


Figure 25: Activités α et β -amylases des échantillons de malt (gauche) et profils en sucres des moûts (droite)

Tableau 26: Résultats ANOVA 1 sur les activités α -amylases des échantillons de malt

Échantillon	12	05	09	13	02	06	08	14	11	03	10	07	01	15	04
Valeur	128	134	141	153	178	190	190	194	203	209	213	215	231	239	282
Groupe	g	fg	efg	defg	cdef	bcde	bcd	bcd	bc	bc	bc	bc	b	ab	a

Tableau 27: Résultats ANOVA 1 sur les activités β -amylases des échantillons de malt

Échantillon	12	07	11	13	06	01	09	04	10	05	08	15	14	03	02
Valeur	33	59	163	206	237	238	264	267	282	289	300	304	344	355	453
Groupe	h	h	g	f	e	e	de	d	cd	cd	c	c	b	b	a

L'activité conjointe des deux amylases permet au brasseur de transformer l'amidon en sucre plus ou moins complexes. La Figure 25, appuyé par les résultats de tukey-kramer sur base de L'ANOVA 1 (Tableau 26 et 27), montre que le malt **12** pose problème aussi bien pour l' α -amylase que pour la β -amylase, ce qui concorde avec le temps de saccharification observé. Les malts numéro **05** et **09** sont également pauvres en α -amylases mais aucun problème n'a été constaté sur le temps de saccharification ce qui peut s'expliquer par une bonne dégradation des parois (hémicelluloses et protéines) en comparaison avec le malt **12**. Les malts **05** et **09** présentent d'ailleurs des indices de Kolbach significativement plus élevés que le malt 12. Cette supposition concorde avec les résultats obtenus pour le malt de froment (**02**) qui, malgré ses activités amylases élevées, montre un temps de saccharification très long du fait de sa faible désagrégation.

La Figure 25 droite nous montre qu'il y a peu de différence dans les proportions des différents sucres issus des activités amylasiques. Cette constatation soulève l'hypothèse que le profil en sucres dépend fortement du profil de température appliqué lors du brassage plus que de la proportion de chacune des amylases.

Les analyses des capacités α et β -amylases sont assez chronophages et les résultats obtenus pour les temps de saccharification et les profils en sucres proposent des interprétations similaires. Les analyses en composantes principales nous informeront sur la redondance d'informations vis-à-vis des paramètres déjà étudiés.

3. Analyses en composantes principales

1. Orges

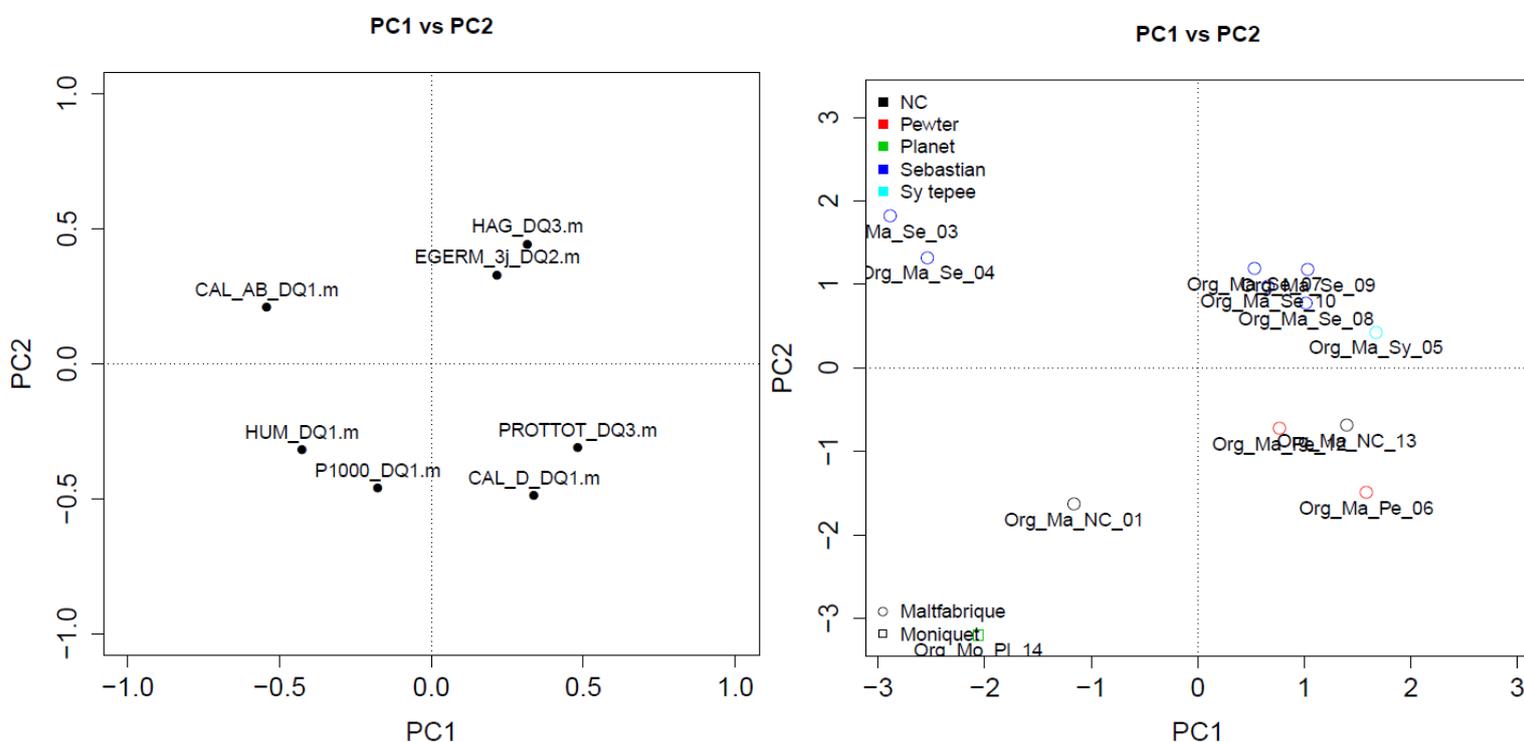


Figure 26: Résultats des ACP pour les échantillons d'orge et les variables explicatives

A gauche : Cercle des corrélations des variables explicatives dans le plan formé par la première (PC1) et la seconde (PC2) composante principale

A droite : représentation des individus dans le plan formé par la première (PC1) et la deuxième (PC2) composante principale

Tableau 28: Variance expliquée par chaque composante principale

	Standard.deviation	Proportion.of.Variance	Cumulative.Proportion
PC1	1,68	0,403	0,403
PC2	1,53	0,334	0,736
PC3	1,07	0,164	0,901
PC4	0,78	0,088	0,989

Cette ACP (Figure 26 droite) montre qu'il y a des groupes d'échantillons d'orge présentant des propriétés physico-chimiques semblables mais également des échantillons extrêmes (**01**, **03**, **04**, **14**). La composante principale 1 (PC1) explique 40.3% de la variance totale. Elle est fortement corrélée

positivement avec la teneur en protéine et fortement corrélée négativement avec le calibre supérieur à 2.5 mm (Figure 26 gauche). La PC1 nous permet donc de séparer les échantillons sur base du calibre (et indirectement la teneur en protéines). La Figure 26 droite nous montre des échantillons de calibre supérieur à 2.5 mm élevé, à gauche de l'axe et inversement vers la droite. Cela confirme que les échantillons **03** et **04** ont une proportion de grains supérieurs à 2.5 mm plus élevée que les autres en raison d'un prétraitement des lots exemplaire. Ils présentent par ailleurs des teneurs en protéines plus faibles ce qui est également expliqué par la PC1. Les vecteurs expliquant les composantes principales pour sont disponibles en Annexe 7.

La composante principale 2 (PC2) explique 33.7% de la variance totale, elle est fortement corrélée positivement avec l'énergie germinative et négativement corrélée avec le calibre inférieur à 2.2 mm. La PC2 permet donc de séparer les échantillons sur base de l'énergie germinative. Les échantillons présentant une mauvaise énergie germinative se retrouvent plus bas sur l'axe vertical. Les meilleurs échantillons d'orge se retrouvent donc en haut à gauche du graphique car ils présentent de bons calibres et une bonne énergie germinative.

En effet, l'échantillon **14**, très pré-germé, se trouve très isolé des autres échantillons. L'échantillon **01**, dont l'énergie germinative est faible également, se trouve lui aussi à l'écart du groupe homogène.

Hormis la séparation des échantillons extrêmes, la Figure 26 droite nous montre une séparation des échantillons en fonction des variétés. Cette information pourrait être exploitée pour adapter le procédé de maltage à une variété non usuelle en fonction de sa position dans l'ACP.

Cette ACP permet de vérifier la qualité d'un lot d'orge pour répondre aux attentes des malteurs.

2. Malts

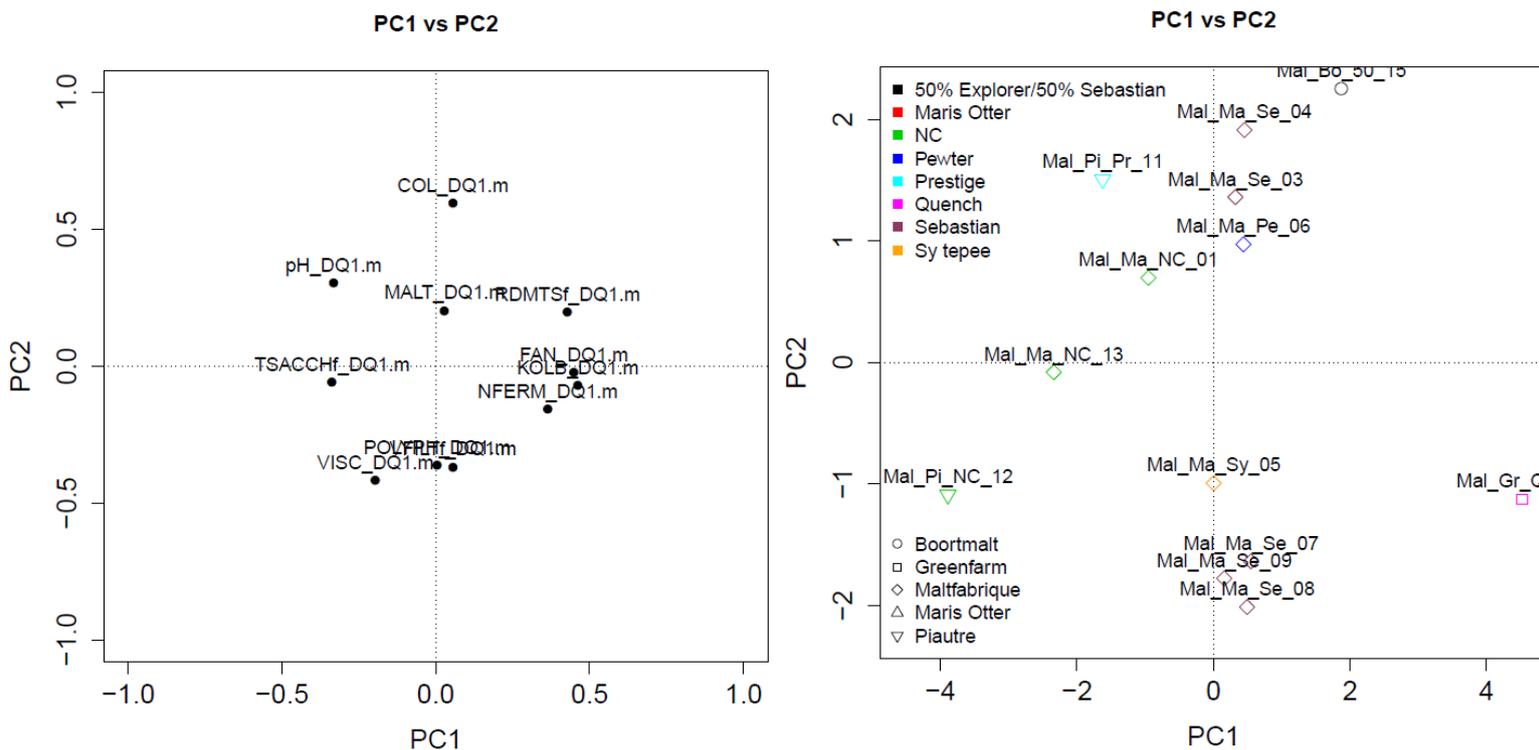


Figure 27: Résultats PCA pour les échantillons de malts et leurs paramètres

Tableau 29: Explication de la variance

	Standard.deviation	Proportion.of.Variance	Cumulative.Proportion
PC1	2,11	0,344	0,344
PC2	1,72	0,227	0,571
PC3	1,33	0,136	0,707
PC4	1,11	0,094	0,801

Cette PCA a été réalisée sans l'échantillon **14** trop riche en polyphénols. En effet, la PC2 était majoritairement corrélée avec les polyphénols, ce qui avait pour conséquence de séparer les échantillons sur ce critère et de cacher la variabilité des autres échantillons vis-à-vis d'autres paramètres. Cette PCA permet de mettre en évidence la différence des malts **10**, **12**, **13** et **15** et de séparer 2 groupes d'échantillons présentant des propriétés physico-chimiques semblables (Figure 27 droite).

La PC1, explique 34.4% de la variabilité (Tableau 29) et est corrélée positivement avec le rendement et l'indice de Kolbach et négativement avec le temps de saccharification (Figure 27 gauche), ce qui a du sens quant à la désagrégation et la disponibilité de l'amidon lors du brassin. Nous avons, pour ce qui est de ces paramètres, les meilleurs malts à droite et les plus mauvais à gauche. L'échantillon **12** se trouve donc le plus à gauche car il présente un temps de saccharification long et un indice de Kolbach faible. L'échantillon **10** quant à lui présente l'indice de Kolbach le plus élevé et se situe donc à droite sur l'axe horizontal. L'échantillon **13** quant à lui présente le plus faible rendement et un indice de Kolbach relativement faible également. La référence industrielle **15** est bien située sur la droite, indiquant un bon rendement et une bonne désagrégation.

La PC2 quant à elle, expliquant 22.7% de la variabilité, est corrélée négativement avec la viscosité et la teneur en polyphénols et positivement avec le pH et la couleur. La PC2 exprime donc en partie la désagrégation des parois et de l'amidon mais comme mentionné plus haut, les viscosités présentent peu de variabilité, probablement en raison du travail de sélection des orges ces dernières décennies. Concernant le pH et la couleur, il est possible de les relier car le pH dépend en partie de la composition en acides aminés tandis que la couleur dépend des réactions de Maillard entre des acides aminés et des sucres. Mais de nouveau, ces analyses présentent peu de variabilité et il est difficile d'interpréter correctement cette composante.

Cette ACP permet de vérifier la qualité d'un lot de malt pour répondre aux attentes des brasseurs.

Les valeurs des vecteurs attribués aux composantes principales sont disponibles en Annexe 7.

4. Discussion générale

Nous avons vu au cours de ces résultats qu'il n'est pas compliqué de détecter un problème pour un malt donné au vu de la redondance des informations. Il est en revanche plus compliqué d'en trouver la source à l'aide d'analyses classiques. Il est à noter que tous les lots à l'exception du malt 14 et peut-être du 15, sont issus des orges récoltés en 2016 qui se trouvaient être une très mauvaise année en France comme en Belgique, en termes de quantité et de qualité des orges.

Dans cette optique, les analyses de routines peuvent être restreintes afin de s'assurer de la conformité d'un lot. Les lots non conformes doivent cependant subir des analyses ciblées afin d'identifier la source du problème et de remonter jusqu'au processus de maltage afin de l'adapter en conséquence.

Il est important de préciser que les échantillons de malt étaient, malgré l'hétérogénéité, globalement de bonne qualité étant donné la mauvaise année pour l'orge brassicole. Peu de problèmes pratiques (rendement, saccharification, filtration,...) ont été observés et les analyses complémentaires sur les caractéristiques plus chimiques (FAN, Polyphénols,...) n'ont pas non plus montré de résultats catastrophiques.

Les analyses en composantes principales des orges et malt ainsi que les Tableaux de corrélations résultants disponibles en Annexe 7 et 8 respectivement pour les échantillons d'orge et de malt doivent être envisagés comme un outil d'aide à la décision pour cibler les analyses et éviter la redondance des informations. Ces Tableaux de corrélations permettent de mettre en lien toutes les analyses et d'identifier les informations redondantes. Cependant, notre base de données n'étant pas très importante, il faut rester critique quant aux corrélations mises en évidence par le test statistique.

Les lots d'orges sont généralement soumis à une mesure d'humidité, de protéines et de calibre supérieur à 2.5 mm. Ces informations permettent d'adapter le maltage pour optimiser mais ne sont pas suffisantes pour garantir la qualité du malt résultant. La mesure de l'énergie germinative est très importante pour l'homogénéité du maltage tandis que l'analyse RVA permet de quantifier la pré-germination du lot. Sur base de ces deux dernières analyses, il est difficile pour le malteur de garantir la conformité du lot de malt résultant mais il peut ainsi décider d'accepter le lot d'orge ou pas. Ces analyses permettent également, en cas de maltage à façon, de se prémunir contre les plaintes du client qui aura été informé à l'avance des risques encourus. Nous avons également pu constater, pour les échantillons 03 et 04, qu'un prétraitement sévère accroissait la qualité du malt résultant. En circuit court, une bonne communication entre l'agriculteur et/ou le brasseur permet de pousser un

peu plus le tri des céréales. De plus, les déchets de tris sont valorisables en fourrage, l'agriculteur est donc rarement réticent quand il s'agit d'améliorer la qualité de l'orge destiné à la micro-malterie.

Pour ce qui est des malts, certaines analyses simples permettent de confirmer la conformité d'un lot. Un lot non conforme devra subir d'autres analyses pour détecter la source du problème. Le Tableau 30 montre la corrélation des différentes analyses avec la proportion d'amidon, la désagrégation des hémicelluloses et la désagrégation des protéines. Ce tableau se lit donc comme suit : « *plus le temps de saccharification est élevé, moins les hémicelluloses sont dégradées* » et cette corrélation négativement est très élevée. Il est à noter que pour l'activité amylasique, le temps de saccharification et le rendement, les corrélations sont faites avec la désagrégation de l'amidon et non la proportion d'amidon dans le grain. En effet, plus les amylases seront développées dans le malt, plus l'amidon aura été dégradé par le processus de maltage et au plus le temps de saccharification sera réduit.

Le poids de 1000 grain avant et après maltage permet déjà de faire des suppositions quant aux différentes désagréations du processus de maltage. De plus cette mesure est rapide et peu coûteuse. Il est donc intéressant pour un malteur travaillant principalement avec une variété de réaliser systématiquement cette mesure afin de détecter un problème majeur dans un lot. En effet la combinaison d'un processus constant (avec un matériel donné) et d'une variété donnée doit présenter une régularité, entre les lots, dans la réduction du poids de 1000 grains avant et après maltage. Il s'agit donc d'une différence de poids de 1000 grains avant et après maltage qui doit être régulière d'un lot à l'autre.

Tableau 30: Corrélations mises en évidence des différentes analyses avec la proportion d'amidon, la désagrégation de hémicelluloses et la désagrégation des protéines

Analyse	Amidon	Protéines	Hémicelluloses
Poids de 1000 grains	+++	-	-
Calibre AB	+++	--	--
Calibre DE	-	+	+
Temps de saccharification	--	--	---
Temps de filtration	/	--	---
Activité α et β -amylase	++	/	/
Profil en sucre	/	/	/
Rendement	+++	++	++
Différence F/G mouture	/	--	--
Viscosité	/	/	---
Protéines totales	--	/	/
Protéines solubles	/	++	+
Indice de Kolbach	/	+++	++
FAN	/	++	+
Polyphénols	/	/	/
pH	/	++	/
Couleur	/	+++	/

* / = pas d'affirmation ** - = corrélation négative *** + = corrélation positive

Le brassin conventionnel, comprenant temps de saccharification, de filtration, rendement, différence de rendement fine/grosse mouture, viscosité, couleur et pH est évidemment la base d'une analyse. Il renseigne sur les caractéristiques technologiques du malt. Le pH et la couleur peuvent donner une indication sur la dégradation des protéines de par le relargage des acides aminés impliqués dans les réactions de Maillard et dans la variation du pH.

Concernant la viscosité, il a été mentionné plus haut l'éventuelle obsolescence de cette mesure pour évaluer la désagrégation des hémicelluloses. Une autre analyse permettrait probablement d'apporter cette information : la friabilité. Cette méthode a été décrite dans la partie matériel et méthode mais n'a pas donné de résultats cohérents. En effet, cette analyse doit être réalisée sur du malt entre 4 et 5 % d'humidité, alors que les échantillons de malt, manipulés pendant des mois, présentaient des humidités entre 8 et 10%.

L'indice de Kolbach, bien corrélé avec les FAN permet d'évaluer fidèlement la désagrégation des protéines

Le profil en sucre quant à lui permet de vérifier, avec le temps de saccharification, les capacités conjointes des α et β -amylases. Au vu des proportions des différents sucres et du temps de saccharification, il est possible de détecter un problème enzymatique sans devoir passer par les analyses, plus lourdes, des activités α et β -amylasiques.

Le poids de 1000 grains, le brassin conventionnel, l'indice de Kolbach et le profil en sucres constituent une base solide d'analyse d'un lot de malt et ne devraient être complétée qu'en cas de soucis dont la source est difficile à identifier. Les tableaux de corrélation en annexe 9 nous indique :

- Une corrélation de 0.86 entre les FAN et l'indice de Kolbach mais également de -0.71 entre les FAN et la différence de rendement fine/grosse mouture. Un bon indice de Kolbach et une différence de rendement fine/grosse mouture faible permettent donc de dire que la quantité de FAN est bonne
- L'activité α et β -amylase montrent une corrélation de -0.45 et -0.66 respectivement avec le temps de saccharification. Un temps de saccharification court laisse à penser que l'activité amylasique du malt est suffisante.
- Les protéines totales présentent une corrélation de -0.82 avec le calibre AB et de 0.89 avec le calibre C (orgettes) ce qui confirme qui confirme l'hypothèse concernant la grosseur du grain et la proportion de protéines.
- La vitesse de filtration également corrélé d'une valeur de -0.64 avec le Calibre C, confirmant l'importance de l'homogénéité des calibres
- Une corrélation de -0.68 entre le pH et les FAN laissant penser que les acides aminés relâchés sont globalement acides.

Les analyses des différents malts nous ont montré une diversité importante sur base de laquelle toutes ces interprétations ont été possibles. Il est intéressant de noter que le travail de sélection des orges ressort également de ces analyses. En effet, l'échantillon de malt 14, issus d'une ancienne variété, nous montre une proportion plus importante de polyphénols ainsi qu'une viscosité plus élevée, et ce malgré l'origine industriel de ce malt. Ceci nous indique que les variétés ont été sélectionnées en vue d'amincir les enveloppes et de réduire la proportion d'hémicelluloses.

Les maltages pilotes, n'ayant subi qu'un brassin conventionnel, ont permis de mettre en évidence une homogénéité bien plus élevée entre les lots et ce grâce une reproductibilité des conditions de température, de temps et d'humidité plus aisée et plus poussée. Ce n'est pas un malt parfait que l'on

a cherché à obtenir mais des informations sur l'importance des différents paramètres du maltage, en lien également avec la qualité de l'orge initiale. En effet, les maltages ont été réalisés sur l'échantillon d'orge 14, présentant un taux de pré-germination élevé. Au cours du maltage, malgré la température maintenue sous 18°C et le temps de germination restreint de 4.5 jours, des hussards étaient présents, montrant l'importance de la qualité de l'orge initiale. De plus, malgré cette croissance importante du germe, des problèmes importants de filtrations ont été constatés pendant le brassage, sans répercussion sur la viscosité. Ceci indique que les protéines n'étaient pas assez désagrégées. En revanche, le temps de saccharification, le rendement, la couleur, le pH et la couleur était très bons et très constant, excepté pour le premier lot ayant subi un touraillage en étuve. Les différences de rendement entre fine et grosse mouture étaient très bonnes, ce qui s'explique par la vitalité du germe qui était encore élevé, le maltage a ainsi pu être homogène malgré une forte sous-désagrégation de certaines protéines. Les résultats de ce brassin conventionnel sont disponibles en annexe XX. En connaissant le taux de pré germination et l'énergie germinative de ce lot, un malteur aurait pu accepter un contrat de maltage à façon tout en informant le client du risque. En effet, en maltage pneumatique, il est possible d'abaisser la température de germination et d'augmenter la proportion en CO₂ de l'air afin de limiter le développement du germe tout en laissant les dégradations enzymatiques se dérouler. Il aurait ainsi été possible de limiter grandement les défauts du malt issu de ce lot d'orge.

Les maltages pilotes nous ont donc permis de mettre en évidence l'importance de la gestion de ces paramètres au cours du maltage mais surtout entre les maltages afin d'assurer la production de malts de qualité constante, d'où l'intérêt de s'émanciper au maximum des conditions climatiques. Ces apprentissages permettront de concevoir de manière plus réfléchie les scénarii présentés dans la partie suivante.

Partie III: Approche économique

Il ne sera pas question ici d'unités de production clé sur porte mais de pistes à explorer pour pouvoir produire du malt en quantité restreinte tout en optimisant un maximum de paramètres. Les malts résultants sont des malts de bases ou des malts foncés. Des adaptations sont envisageables pour la production de malts plus spéciaux mais ne seront pas prises en compte ici. Les structures présentées ci-dessous nécessitent une grande part d'auto construction et de réhabilitation d'outils non destinés à priori à la malterie. Ces conceptions permettent de limiter les coûts de production de malt qui reste un produit de faible valeur ajoutée.

1. 25 T/an

La production de 25 tonnes de malt par an permet de brasser environ 1000 hectolitres de bière spéciale. Cette structure peut facilement être mise en place par une ou deux microbrasseries désireuses de produire leur matière première. La charge de travail est d'ailleurs assez complémentaire aux activités de brassage et ne sera pas intégrée dans les coûts fixes de fonctionnement. En outre, cette production, limitée à 25 semaines par an, permet de produire du malt sans avoir à réguler la température de l'air dans les germoirs. Comme expliqué plus haut, le maltage sur aire est dépendant des conditions climatiques et devient compliqué de mai à novembre car le tas en germination doit alors être refroidi. Dans ce cas-ci, la production est limitée aux 25 semaines les plus fraîches de l'année. La configuration présentée ici consiste à malter 2 lots de 650 kg d'orge par semaines afin d'obtenir une tonne de malt par semaine.

Le bâtiment accueillant la malterie doit être isolé mais équipé de grilles d'aération situé au niveau du sol et en hauteur afin de permettre à l'air de circuler au sein des germoirs. Ceci permettra au malteur de profiter de conditions extérieures quand elles lui sont favorables pour refroidir ou réchauffer les aires de germination.

Afin de mieux adapter le processus, il est important de contrôler, au minimum, l'humidité du lot à malter. Il est intéressant de contrôler également le taux de protéines afin de mieux orienter le maltage. On sait maintenant qu'une orge avec un taux de protéine plus élevé conviendra mieux à la réalisation de malt foncé. Du matériel d'analyse est donc comptabilisé dans le Tableau fourni en Annexe.

La trempe est réalisée dans une cuve en inox de 1600 litres munie d'un fond filtrant facilitant la diffusion de l'air, d'une vanne 3 voies en sortie de cuve et d'une trappe latérale pour vider le malt trempé. L'orge, stockée en big bag, est acheminée dans la cuve de trempe via une vis à grains classique. La gestion des temps de trempe et de germination dépendra beaucoup de la température du grain, il est donc intéressant d'utiliser une eau de trempe qui soit toujours à la même température. Pour ce faire, un tank à lait de 1 500L peut être converti en bêche d'eau thermostatée à 10-12°C. L'absorption d'eau est contrôlé de la même manière que décrite pour le maltage pilote, à l'aide d'une balance de précision de 0.01g et d'un tube perforé contenant une quantité connue de grains d'humidité initiale connue également. La cuve doit être placée sur un cadre sur roues afin de pouvoir la déplacer vers les 2 germoirs.

Le maltage de 2 lots de 650 kg d'orge par semaine nécessite 2 germoirs de 17 m² chacun. Ces germoirs sont des simples dalles de béton inclinées de 2%. Au bout de ces germoirs doit être installée une rigole qui accueillera une vis de transport souple qui acheminera le malt vert à la touraille, malt

qui sera poussé dans cette rigole à l'aide d'une simple pelle à neige. Les retournements lors de la germination sont réalisés à l'aide d'une motobineuse. Les températures des tas sont mesurées à l'aide de sondes placées dans la couche.

Le matériel le plus couteux de la malterie est la touraille. Pour les 3 structures proposées, la conception de la touraille sera celle présentée en Annexe 1 et décrite dans le paragraphe 4.a, rencontrée à la brasserie-malterie « La Piautre » et d'un coût d'environ 10 000 euros. Comme expliqué plus haut, une touraille à un plateau, peut accueillir jusqu'à 400kg de malt vert/m². Une touraille légèrement surdimensionnée de 4m² sera utilisée dans ce scénario. Une vis à céréale sur le côté ouvrable de la touraille permet d'acheminer le malt vers la prochaine étape.

Le malt touraillé est alors transporté jusqu'à un cyclone permettant d'en ôter les radicules. Une vis de transport souple permet ensuite d'amener le malt nettoyé vers un silo de stockage en attendant le conditionnement en sacs. Il est intéressant de placer un aspirateur à poussière juste à côté de l'arrivée du malt dans le silo afin d'éliminer les poussières produites. Le silo d'une capacité de 1 100 litres environ est réalisé en panneaux marins. Ce matériau, plutôt que l'acier ou l'inox, permet de limiter la potentielle condensation du grain encore tiède entrant en contact avec le métal froid. Le conditionnement en sacs de 25kg ne nécessite plus que des sacs, une balance et une machine à coudre spéciale pour serrer les sacs.

La configuration décrite ci-dessus constitue une base suffisamment solide pour la production de petites quantités de malt et sera améliorée pour les seconds scénarii afin de permettre de malter toute l'année. Toute installation peut être améliorée par la gestion de plus en plus optimale des paramètres de température, d'humidité et de temps pour chaque étape, et notamment par l'automatisation des installations.

2. 100 T/an

Ce scénario permet de produire du malt en quantité toujours faible, mais suffisante pour approvisionner plusieurs micro-brasserie. La conception est similaire au scénario précédent et fait également appel au maltage sur aire.

La production est ici assurée toute l'année via le maltage de 2 lots de 1 300 kg d'orge par semaine ce qui résulte en 2 tonnes de malt produits par semaine.

La cuve de trempage est similaire au scénario précédent mais d'une capacité de 2 500 litres.

Les germoirs quant à eux doivent être d'une surface de 43m² chacun et situés dans une pièce isolée et capable de tenir une température de 10-12°C. Il est judicieux de sur dimensionner légèrement cette « chambre de germination » afin d'y placer la cuve de trempage ainsi que 4 citernes en plastique de 1m³ chacune. Ces citernes contiendront l'eau maintenue à 10-12°C nécessaire pour la trempage.

La touraille est sensiblement la même que pour le scénario précédente et constitue à nouveau un coup de 10 000€.

La suite du processus est également similaire mais 2 silos d'une capacité de 2 000 litres chacun seront comptabilisés afin de disposer de plus de flexibilité pour l'ensachage.

Pour assurer cette production, une autre alternative existe afin d'éviter d'investir dans une chambre thermostatée. Il est possible d'aménager un réseau de tuyaux dans les dalles des germoirs afin d'y faire circuler de l'eau froide. Il est cependant primordial que le bâtiment soit suffisamment isolé pour ne pas accentuer les écarts de températures lors des mois les plus chauds, ce qui conduirait à une

germination hétérogène et a un malt de moindre qualité. Cette configuration implique également l'achat de deux tanks à lait, l'un pour l'eau de trempe, l'autre pour le liquide de refroidissement des germoirs. Cette conception ne sera pas explorée ici, la chambre thermostatée offrant beaucoup plus de contrôle de la température.

3. 500 T/an

La production de 500 tonnes de malt par an devient compliquée avec le maltage sur aire, comme expliqué dans la partie 4.b. Le maltage pneumatique est plus adapté. Ce scénario l'envisage, toujours dans une idée d'auto construction.

La structure est ici conçue pour malter 2 lots de 6300kg par semaine.

La cuve de trempe nécessaire pour un tel volume d'orge est de 15000 litres. La cuve sera cylindrique, de 2.5 m de haut et de 1.4 m de rayon. L'eau doit pouvoir recirculer de bas en haut pendant la trempe. Un fond filtrant et une trappe de déchargement sont toujours nécessaires. Étant donné les volumes d'eau de trempe, il est intéressant de penser au forage d'un puits qui permettra de fournir une eau de température stable et en grande quantité. Il faut compter environ 70 €/m pour le forage d'un puit.

Le germoir pneumatique peut être réalisé à base d'un conteneur frigo d'occasion. Cette conception permet d'avoir une pièce thermostatée mais surtout facilement adaptable à l'installation d'un système d'insufflation d'air sous la couche. En effet, un faux-fond doit être aménagé à l'aide de tôles perforées en lignes sous laquelle l'air froid pourra être insufflé. Des retourneurs automatiques de type « Saladin » devront être installés dans la partie supérieure. Deux évacuations d'air isolées reliées à des ventilateurs seront installées au départ du toit à un tiers et à deux tiers de la longueur du germoir, jusque sous la couche afin de faire recirculer l'air déjà refroidis. Les ventilateurs sont similaires à celui de la touraille et d'une puissance de 4000 W. Deux conteneurs sont utiles pour malter deux lots par semaine. Ce type de germoir permet d'entasser l'orge trempée sur 60 cm de hauteur, ce qui représente environ 300kg d'orge non trempée par m², soit une surface de germination de 21m². Les conteneurs frigorifiques de 40 pieds proposent une surface d'environ 29m² ce qui correspond bien à ce que nous cherchons. En maltage pneumatique, l'air insufflé sous la couche doit être humidifiée pour ne pas assécher l'orge en germination, un système de brumisateurs en partie inférieure du conteneur, voire au-dessus étant donné que l'air de la soufflerie recircule pour permettre de fournir cette humidité.

La touraille nécessaire pour le séchage de 6300kg d'orge initial est de 16m² soit 4 fois la dimension de la touraille de référence en Annexe 1. Des adaptations en termes de puissance de chauffe et de ventilation sont donc nécessaires.

La suite du processus est similaire. Quatre silos de 15 000 litres sont nécessaires pour stocker le malt avant ensachage tout en permettant une certaine flexibilité de main d'œuvre. Ce scénario comprend une ensacheuse dont le prix est annoncé dans le Tableau. Il s'agit du prix pour une machine neuve car peu de ces outils sont disponibles d'occasion.

Il s'agit ici d'une conception bien différente de celles visitées au cours de ce travail et les installations décrites ici ne sont qu'une des nombreuses conceptions possibles. Les malteurs artisanaux produisant plus de 300 tonnes par an ont bien souvent recours au maltage pneumatique via des installations conçues par leur soin et faisant donc office de prototypes, c'est notamment le cas de la malterie du Vieux Silo en France. Dans une idée d'auto construction, le malteur devra concevoir ses

installations de la manière qui lui semble la plus judicieuse compte tenu de son environnement et du matériel dont il peut disposer aisément.

4. Comparaison et Discussion

Il est important de noter que l'approche technico-économique proposée ici n'est qu'une première approche globale et ne faisant pas intervenir de projections pluriannuelles. Il s'agit ici d'un outil permettant d'établir les bases d'un plan financier plus concret.

Les Tableaux détaillés des plans d'investissement pour les différentes structures sont disponibles en Annexes. Le calcul d'amortissement retenu est progressif à intérêt dégressif et à annuités constantes. La formule est : $\text{capital} \cdot \text{taux} / (1 - (1 + \text{taux})^{\text{exposant}} (-\text{durée}))$.

Le Tableau 3 montre une prédiction du bilan annuel de chaque malterie pour un prix de vente du malt de 705 €/tonne, ce qui représente une augmentation de 15% par rapport au malt industriel. Il est à noter, selon l'enquête préliminaire réalisée auprès de 30 brasseries par la SoCoPro, que 17 d'entre elles seraient prêtes à payer 10 à 20 % plus cher un malt local et 4 brasseries seraient prêtes à payer plus de 20% de plus pour un malt local. Ce prix de 705 €/tonne comprends le prix d'achat de l'orge à 250 €/tonne ainsi que 35 €/tonne de stockage-préparation-transport et donc un prix de prestation de maltage de 420 €/tonne de malt produit. Dans le Tableau 31, on constate que la malterie de 25 T n'est pas viable économiquement et serait à priori exclue. Pour la seconde, les bénéfices engendrés sont positifs mais anecdotiques. Le 3^e scénario est quant à lui beaucoup plus intéressant et optimiste quant à sa viabilité économique mais une réserve pour imprévus, une rémunération des investisseurs et un autofinancement doivent encore être soustrait du bénéfice.

Tableau 31: Rentabilité économique des différentes structures en filière conventionnelle

	25 T/an	100T/an	500T/an
Coût de production (€/an)	25 882	69 270	273 306
Chiffre d'affaire (€/an)	17 625	70 500	352 500
Bénéfice avant impôts (€/an)	-8 257	1 230	79 194

Cependant, il est important de nuancer la pertinence de chaque structure.

Tel que présentée dans le Tableau ci-dessus, la structure de 25 T/an se voit exclue d'une possible réalisation. Cependant, cette capacité de production correspond bien à la consommation d'une ou de 2 microbrasseries et comme mentionné plus haut, la charge de travail est complémentaire à celle de la ou des brasseries concernées, un tiers d'équivalent temps plein est compris dans les frais fixes de cette structure. Dans une optique d'auto-provisionnement en malt, les chiffres doivent être intégrés au bilan comptable de la ou des brasseries impliquées dans le projet. Le Tableau 32 montre la répercussion du prix du malt produit par les 3 structures sur le prix d'une bouteille de 33cl de bière spéciale en comptant 25 kg de malt/100 L de bière. Le prix de production résulte de la somme des frais fixes et variables. Dans le cas du scénario 25 T, on soustrait de cette valeur le prix moyen du malt pâle industriel de 613 €/T (moyenne Soufflet, Château, Dingemans 2017), on obtient l'augmentation du prix du malt pour le brasseur. Dans le cas des 2 autres scénarii, c'est au prix de vente que l'on soustrait le prix du malt industriel. Ces différences de prix peuvent être rapportés à une bouteille de 33 cl sachant que 1 tonne de malt permet de produire environ 4 000 litres de bière spéciale.

Tableau 32: Répercussion de la différence de prix du malt local avec les prix appliqués par l'industrie sur 33 cl de bière spéciale

	25 T/an	100 T/an	500 T/an
Coût de production (€/T):	1 035	693	547
prix de vente (€/T):	/	705	705
Différence prix indus (€/T):	422	92	92
Répercussion 33cl bière (€):	0.035	0.008	0.008

La plus petite structure n'ayant pas une vocation commerciale, il s'agit du coût de production du malt qui est comparé avec les prix pratiqués par l'industrie. Dans ce cas, on voit une augmentation du prix d'une bouteille de 33cl de 0.035 €. Pour les microbrasseries désireuses de raccourcir leurs circuits d'approvisionnement afin de travailler avec des producteurs locaux et de proposer un produit plus fidèle à la notion de terroir, cette différence de prix est une contrainte tout à fait discutable. Il est évident que l'on entre ici dans un cadre plus philosophique mais c'est le propre des brasseries artisanales que de mettre en avant des valeurs et une philosophie bien plus variée que la simple rentabilité financière. Cependant, cette démarche ne se limite pas à forcément à des valeurs. En effet, il est aisé de concevoir qu'une bonne communication sur cet aspect de malt « homemade » peut apporter une valeur ajoutée importante au produit fini, d'autant plus en considérant l'évolution actuelle des habitudes de consommation.

Les valeurs obtenues pour les secondes malteries permettent de constater que pour un brasseur, l'achat de malt à 700 €/T ne représente finalement une augmentation de prix que de 0.008 € pour une bouteille de 33cl de bière. Il est certes peu concevable qu'une brasserie importante ne puisse pas se permettre un tel coût de matière première une fois rapporté aux volumes annuels de malt consommés mais une brasserie artisanale de petite échelle n'aura pas de mal à valoriser cette nouvelle façon de travailler.

Le scénario de production de 100 T/an, intermédiaire et inintéressant en termes de rentabilité et de croissance de l'entreprise, pourrait être très intéressante en revanche pour une collectivité d'agriculteurs désireux d'investir dans une structure leur assurant la valorisation de leur orge au prix de 250 €/T et non plus de 170 €/T, comme le prévoit l'état actuel du marché.

Le scénario de production de 500 T/an est quant à lui le plus pertinent si l'on veut développer une malterie en tant qu'activité principale.

La même démarche peut être effectuée pour la filière bio ce qui nous donne des résultats nettement plus intéressants (Tableau 33 et 34). Les calculs prennent en compte un prix de l'orge bio de 445 €/T (dont 35 €/T de stockage-préparation-transport) et un prix du malt bio industriel de 1 065 €/T. Le prix de vente du malt artisanal bio est fixé ici à 1 150 €/T soit une augmentation du prix de 8% par rapport à l'industrie.

Tableau 33: Rentabilité financière des différents structures en filière bio

	25 T/an	100T/an	500T/an
Coût de production (€/an)	31 082	90 070	372 506
Chiffre d'affaire (€/an)	28 750	115 000	575 000
Bénéfice avant impôts (€/an)	-2 332	24 930	202 494

Tableau 34: Répercussion de la différence de prix du malt bio et local avec les prix appliqués par l'industrie sur 33 cl de bière spéciale

	25 T/an	100 T/an	500 T/an
Coût de production (€/T):	1243	901	745
prix de vente (€/T):	/	1150	1150
Différence prix indus (€/T):	178	85	85
Répercution 33cl bière (€):	0.015	0.007	0.007

On constate en effet que les chiffres sont plus prometteurs. D'autant plus que l'on applique ici une augmentation du prix du malt bio de 8 % et qu'une enquête préliminaire menée par la SoCoPro indique que, sur 30 brasseries interrogées, 21 seraient prêtes à payer au minimum 10 à 20 % plus cher un malt bio et local

La répercussion du prix du malt sur la bière reste semblable en bio et en conventionnel pour les scénarii 100 et 500 T/an mais diminue du conventionnel au bio pour la structure de 25 T/an. Le prix moyen des bières bio étant plus élevé, ce scénario d'auto-provisionnement en bio est plus avantageux qu'en conventionnel.

Cette analyse financière constitue une base de travail et ne doit surtout pas être prise comme définitive. Beaucoup d'aspects ne sont pas approfondis, notamment que la source de chaleur pour la touraille. De plus, il est possible de faire du malt à l'aide de structures plus basiques encore mais le travail en devient plus compliqué tant physiquement qu'au niveau des connaissances requises.

Partie IV: Conclusion et perspectives

Depuis plusieurs décennies, le secteur de la malterie a évolué vers l'industrialisation, plus viable économiquement étant donné la faible valeur ajoutée des produits. Cependant, l'évolution actuelle du marché favorisant les circuits courts et la production locale remet à jour la faisabilité économique des microstructures de maltage. La Belgique est un petit pays et pèse peu dans la production mondiale d'orge brassicole et il est important de développer des filières locales afin de valoriser nos productions.

Les analyses réalisées sur les orges et les malts de différentes provenances ont permis de mettre en lumière les paramètres importants des orges brassicoles, du processus de maltage et du malt résultant afin de fournir des bases solides au développement d'une filière capable de satisfaire aux exigences et besoins de ses intervenants. Les statistiques appliquées à ces analyses fournissent des informations intéressantes quant à la pertinence de certaines analyses et de la redondance des informations fournies afin de mieux cibler les analyses nécessaires à un suivi de production et celles qui sont complémentaires en cas de lots problématiques.

Nous avons vu que certaines analyses ne donnent pas forcément l'information pour lesquelles elles ont été mises en œuvre. Les protocoles EBC ont été mis en place dès 1946 mais ont peu évolué avec le temps, il serait intéressant de remettre à jour ces références analytiques afin de mieux correspondre à l'évolution des orges dont la pression de sélection fut importante ces dernières décennies. Nous avons déjà parlé de la viscosité, reflet de la désagrégation des hémicellulose et de sa pertinence au vu des sélections génétiques visant à réduire leur proportion au sein des différentes variétés. C'est également le cas des protocoles de dévaluation de capacités enzymatiques obsolètes en comparaison avec de nouvelles méthodes telles que celles proposées par la firme *Megazyme* et mises en œuvre dans ce travail. D'autres aspects sont quant à eux peu expliqués et ne bénéficient pas de seuils bien déterminés, c'est le cas de la teneur en polyphénols.

Les lots analysés dans le cadre de ce travail présentaient peu d'hétérogénéité du point de vue de l'humidité notamment. Il serait intéressant d'évaluer l'aptitude au maltage de différentes variétés, stockées à des humidités différentes (de 14.5 à 16%) et pendant des durées différentes afin de limiter les déclassements systématiques si problématiques pour nos agriculteurs. Cela permettrait entre autre de mettre la priorité sur certains lots afin d'éviter leur dépréciation au cours du temps. Ce genre de démarche est évidemment plus facile à mettre en œuvre dans de petites structures où le fonctionnement de la filière se base sur la coopération entre l'agriculteur, le malteur et le brasseur.

En Bretagne, la filière tourne autour d'une asbl (« *De la Terre à la Bière* ») mettant autour de la table tous les intervenants de la filière. A l'échelle d'une micro-malterie, ce travail peut être réalisé afin de mieux gérer les volumes de production et de déterminer un cahier des charges correspondant aux attentes des différents acteurs. Ainsi il est possible de fixer, une année à l'avance, les volumes produits sur base des besoins de brasseurs clients. Le malteur peut également s'accorder avec l'agriculteur sur des détails techniques tels que la variété, les conditions de stockage et même la pression de prétraitement appliquée. Il est aisé pour un agriculteur ou même pour le brasseur de se munir d'un trieur à céréales. Dès lors il est possible d'améliorer considérablement les calibres et la propreté des lots destinés au maltage. D'autant plus que, comme mentionné plus haut, les rebuts issus du tri seront au minimum valorisés en tant que fourrage. Il s'agit là d'une manière de faire efficace pour le fonctionnement d'une microstructure en local.

Un autre aspect peu abordé dans ce travail mais présentant de belles perspectives est l'évaluation de la qualité des orges et des malts à l'aide de techniques infrarouges. Il existe actuellement peu de modèles pour expliquer les différents paramètres des orges et des malts par infrarouges. Hors il s'agit d'une technologie permettant des analyses rapides et faciles à mettre en œuvre. Des modèles fiables pourraient grandement améliorer le fonctionnement de la filière car permettrait au négoce et au malteur d'évaluer rapidement beaucoup de paramètres. Cette technologie pourrait également permettre au malteur de suivre la qualité de ses malts sans avoir recours à de lourdes dépenses en analyses de laboratoire. Des modèles pourraient être conçus à l'aide de bases de données beaucoup plus conséquentes qu'ici afin d'évaluer des paramètres similaires à l'indice de Kolbach, à la teneur en polyphénols, la dégradation des hémicelluloses,...

Il serait également intéressant de développer un critère sur base de la différence de poids de 1000 grains avant et après maltage pour une variété donnée, permettant un autocontrôle facile, efficace et rapide au sein des malteries.

Nous avons vu plus haut qu'un état de pré-germination de l'orge pouvait mener à une croissance trop importante du germe par rapport aux désagréments ayant lieu dans le grain, entraînant une freinte trop importante si l'on veut obtenir des désagréments correctes. Il existe déjà des solutions pour limiter la croissance du germe consistant à ajouter des additifs divers à l'eau de trempage. Cependant, un paramètre intéressant est la concentration en CO₂ dans la couche de grain en germination. Il serait intéressant de mener une étude visant à réduire la vitalité du germe sur base de la concentration en CO₂ tout en le gardant suffisamment actif pour la production d'enzymes. Dès lors, il serait possible en maltage pneumatique de contrôler cette concentration afin de permettre aux désagréments de se faire tout en limitant la croissance du germe. Cette perspective est d'autant plus intéressante que les conditions climatiques belges peuvent facilement mener à une humidité trop élevée dans un lot. A cela s'ajoute le fait que peu de négociants/stockeurs acceptent encore de travailler avec les orges brassicoles. Les lots concernés par ce défaut doivent bien entendu avoir une énergie germinative suffisante pour assurer l'homogénéité du maltage, ce qui était le cas pour l'orge 14 maltée à l'échelle pilote et montrant des différences de rendement entre fines et grosse mouture bien en dessous de la limite la plus stricte. Cette technique appliquée de manière générale pourrait également limiter la freinte et augmenter le rendement de maltage.

Les analyses financières quant à elles nous ont montré la faible rentabilité financière des microstructures de maltage mais que, intégrée à une production agricole ou brassicole, leur mise en œuvre restait pertinente. La filière bio montre cependant de bien meilleurs chiffres. Bien que les bières bio soient peu présentes en Wallonie, une microstructure de maltage indépendante n'aurait aucun mal à trouver des brasseries partenaires, étant donné les volumes limités de production, et serait donc un choix plus judicieux en terme de rentabilité financière.

Ces analyses financières sont très sommaires et il est important de penser aux perspectives susceptibles d'influenceraient les chiffres présentés. Il s'agit notamment du coup de l'énergie. Une analyse plus approfondie devrait étudier la source d'énergie et les technologies disponibles les plus pertinentes à mettre en œuvre. En France, où l'électricité est peu coûteuse, les tourailles fonctionnent à l'électricité. En Belgique cependant, l'électricité est probablement solution la moins adaptée pour procéder au touraillage. Il faut également tenir compte des énergies vertes telles que la géothermie ou l'énergie solaire. Il serait entre autre très intéressant de prévoir l'installation d'une micro-malterie à proximité d'une centrale de bio-méthanisation.

Un autre aspect à prendre en compte est le traitement des eaux rejetées par la structure. Ce travail ne fournit pas suffisamment d'informations sur la nécessité et la mise en place d'un système de traitement des eaux de trempe. La thèse de Wafa Guiga (« Identification des inhibiteurs de la germination de l'orge et Mise au point d'un procédé de traitement des eaux de trempe en malterie en vue de leur recyclage ») donne des informations très intéressantes sur le sujet et doit servir de référence pour une étude plus poussée du sujet.

Bibliographie

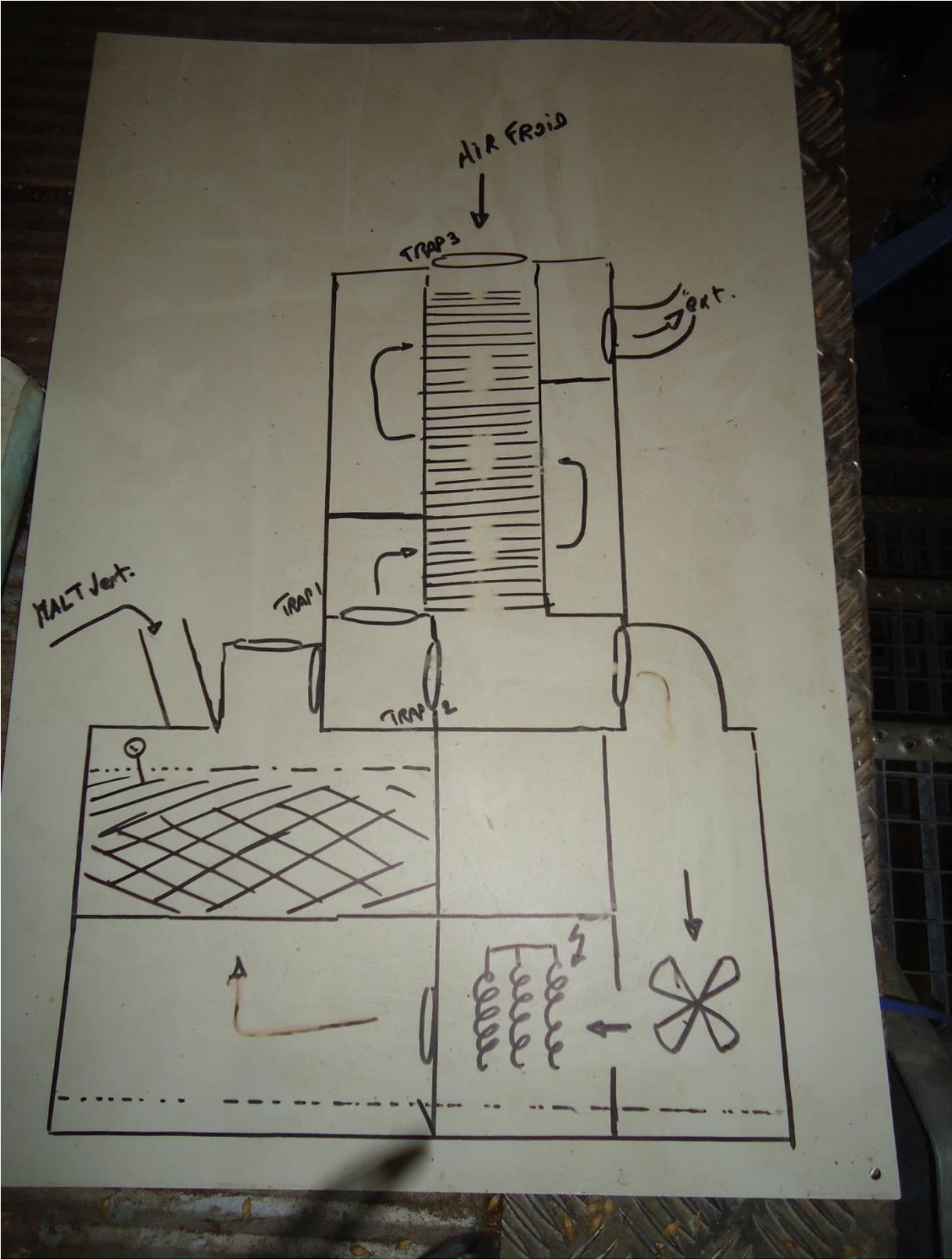
- Ajib, Budour. 2013. "Contribution À La Modélisation de La Qualité de L'orge et Du Malt Pour La Maîtrise Du Procédé de Maltage." Université de Lorraine.
- Allosio-Ouarnier, N. 1999. "Caractérisation de La Transformation de L'orge En Malt Par Des Méthodes de Spectroscopie Vibratoire." Institut national polytechnique de Lorraine.
- Anness, B. J., C. W. Bamforth, and T. Wainwright. 1979. "The Measurement of Dimethyl Sulphoxide in Barley and Malt and Its Reduction To Dimethyl Sulphide By Yeast." *Journal of the Institute of Brewing* 85(6): 346–49.
- Aron, Patricia, and Th Shellhammer. 2010. "A Discussion of Polyphenols in Beer Physical and Flavour Stability." *Journal of the Institute of Brewing* 116(4): 369–80.
- Bamforth, C. W. 2009. "Current Perspectives on the Role of Enzymes in Brewing." *Journal of Cereal Science* 50(3): 353–57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcs.2009.03.001>.
- Bamforth, Charles W., and Makoto Kanauchi. 2001. "A Simple Model for the Cell Wall of the Starchy Endosperm in Barley." *Journal of the Institute of Brewing* 107(4): 235–40.
- Baxter, E.D, S.G Reeves, and C.W Bamforth. 1980. "The Effects of Increased Steeping Temperatures on Enzyme Development in." 86: 182–83.
- Bobálová, Janette, Inga Petry-Podgórska, Markéta Laštovičková, and Josef Chmelík. 2010. "Monitoring of Malting Process by Characterization of Glycation of Barley Protein Z." *European Food Research and Technology* 230(4): 665–73.
- Boivin, Patrick. 2004. *Analyse Du Malt*.
- Briggs, D.E., Stevens, R., Young, T.W., Hough, J.S. 1981. *Malting and Brewing Science: Malt and Sweet Wort, Volume 1*.
- Briggs, D. E. 1998. *Malts and Malting*.
- Buiatti, Stefano. 2009. "Beer Composition: An Overview." In *Beer in Health and Disease Prevention*, Elsevier Inc., 213–26.
- De Clerck, J. 1963. *Cours de Brasserie, Vol 1*. 2ème édit.
- Crepel, Stephane. 1997. "Les Matières Azotées Des Matières Premières À La Bière." Université catholique de Louvain.
- Cyran, M., M. S. Izydorczyk, and A. W. MacGregor. 2002. "Structural Characteristics of Water-Extractable Nonstarch Polysaccharides from Barley Malt." *Cereal Chemistry* 79(3): 359–66.
- D, Callemien S, Collin. 2008. "Use of RP-HPLC-ESI(-)-MS/MS to Differentiate Various Proanthocyanidin Isomers in Lager Beer Extracts." *Journal of the American Society of Brewing Chemists* 66 (2)(0): 109–15.
- Dickenson, C J. 1983. "Dimethyl Sulphide - Its Origin and Control in Brewing." *J. Inst. Brew* 89: 41–46.
- Dvorakova, Marketa et al. 2008. "Characterization of Monomeric and Oligomeric Flavan-3-Ols from Barley and Malt by Liquid Chromatography-Ultraviolet Detection-Electrospray Ionization Mass Spectrometry." *Journal of Chromatography A* 1189(1–2): 398–405.
- Floridi, S., Montanari, L., Marconi, O. and Fantozzi, P. 2003. "Determination of Free Phenolic Acids in Wort and Beer by Coulometric Array Detection." *Journal of agricultural and food chemistry* 51 (6): 1548–54.
- Galati, Giuseppe, and Peter J. O'Brien. 2004. "Potential Toxicity of Flavonoids and Other Dietary Phenolics: Significance for Their Chemopreventive and Anticancer Properties." *Free Radical Biology and Medicine* 37(3): 287–303.

- Gillot, Franck. 2000. *Guide de Bonnes Pratiques Hygiéniques En Malterie*. ed. FRANCE Institut national polytechnique de Lorraine, Vandoeuvre les Nancy.
- Guiga, W. 2006. "Identification Des Inhibiteurs de La Germination de L'orge et Mise Au Point D'un Procédé de Traitement Des Eaux de Trempe En Malterie En Vue de Leur Recyclage." Université de Lorraine.
- Hall, R. D., G. Harris, and R. W. Ricketts. 1959. "Studies on Non-Biological Hazes of Beers V. Role of Hop and Malt Tannins." *Journal of the Institute of Brewing* 65(3): 247–51.
- Hämäläinen, Jari J, Pekka Reinikainen, and J Inst Brew. 2007. "A Simulation Model for Malt Enzyme Activities in Kilning." 113(2): 159–67.
- I.Campbell, F.G.Priest, ed. 2003. *Brewing Microbiology*.
- Jamar, C., P. du Jardin, and M. L. Fauconnier. 2011. "Cell Wall Polysaccharides Hydrolysis of Malting Barley (*Hordeum Vulgare* L.): A Review." *Biotechnol Agron Soc Environ* 15(2): 301–13.
- Janneke Treimo, Stein Ivar Aspomo, Vincent G.H. Eijsink, Svein J. Horn. 2008. "Enzymatic Solubilization of Proteins in Brewer' S Spent Grain." *journal of agricultural and food chemistry* (56): 5359–65.
- Jones, Berne L, and Allen D Budde. 2005. "How Various Malt Endoproteinase Classes Affect Wort Soluble Protein Levels." *Journal of Cereal Science* 41: 95–106.
- Kavanagh, By T E et al. 1976. "DIMETHYL SULPHIDE FORMATION IN MALT — EFFECT OF MALTING CONDITIONS." 82: 270–72.
- Kunze, Wolfgang. 2014. *Technology Brewing and Malting*. 5th editio. ed. Berlin: VLB.
- Laitila, A. 2015. "6 - Toxigenic Fungi and Mycotoxins in the Barley-to-Beer Chain." In *Brewing Microbiology*, Elsevier Ltd, 105–39.
- Lewis, M. J., Muhleman, D. J. and Krumland, S. C. 1979. "Beer Colloid: Studies with Model Systems." *journal of american society of brewing chemists* 37 (2): 61–65.
- Loffet, François. 2007. "Analyse D'un Critère de Qualité Brassicole: La Teneur En Protéines. Etude Génétique et Analyse de Polymorphisme." Faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux.
- MacGregor, A.W., L.J. Macri, S.W. Schroeder, and S.L. Bazin. 1994. "Purification and Characterisation of Limit Dextrinase Inhibitors from Barley." *Journal of Cereal Science* 20(1): 33–41.
- Mayolle, J E et al. 2012. "Water Diffusion and Enzyme Activities during Malting of Barley Grains : A Relationship Assessment." *Journal of Food Engineering* 109(3): 358–65.
- Mcmurrough, By I, G P Roche, and K G Cleary. 1984. "Phenolic Acids Beers and Worts." *Journal of the Institute of Brewing* 90(60 ml): 181–87.
- Monfort, Bruno. 2004. *Le Malt D'orge de Brasserie Locale et de Qualité Différenciée*.
- Müller, Volker, Anne Besier, Reinhard Pätz, and Jürgen Fröhlich. 2012. "Method for the Treatment of the Phenomenon Gushing in Beer and Malt Beverages." : 1–9.
- Muslin, Elizabeth H., Agnes M. Kanikula, Suzanne E. Clark, and Cynthia A. Henson. 2000. "Overexpression, Purification, and Characterization of a Barley α -Glucosidase Secreted by *Pichia Pastoris*." *Protein Expression and Purification* 18(1): 20–26.
- Narziss, L. et G. Friedrich. 1970. "Influence of Air Rests during Steeping on Malt Enzyme Activity." *Brauwelt*: 229–34.
- Reeves, S.G., Baxter, E.D., Bamforth, C.W. 1980. "The Effect of Increased Steeping Temperature on Malt Properties." 86: 226–29.
- Sarlin, Tuija et al. 2005. "Fungal Hydrophobins as Predictors of the Gushing Activity of Malt." *Journal of the Institute of Brewing* 111(2): 105–11.
- Schwarz, PB., Casper, H.H. and Bar, J.M. 1995. "Survey of the Occurrence of Deoxynivalenol

- (Vomitoxin) in Barley Grown in MN, ND and SD during 1993." *Technical Quarterly of the Master Brewers Association of America* 32(4): 190–94.
- Shewry, PR. 1980. "The Extraction Solubility and Characterization of Two Group of Barley Storage Polypeptidase." *journal of experimental botany* 31: 393–407.
- Siebert, Karl J, and P Y Lynn. 1997. "Mechanisms of Beer Colloidal Stabilization." *Journal of the American Society of Brewing Chemists* 55(2): 73–78.
- Stevens, By R. 1959. "Studies on the Non-Biological Hazes of Beer IV*. 'testinic Acid.'" *Journal of the Institute of Brewing* 65(3): 470–76.
- Sun, Alberto, Craig B. Faulds, and Charles W. Bamforth. 2005. "Barley Contains Two Cationic Acetylxyylan Esterases and One Anionic Feruloyl Esterase." *Cereal Chemistry* 82(6): 621–25.
- T-M. Enari, T. Linnahalm and M. Linko. 1961. "Effects of air and carbon dioxide in the steeping of barley." *Journal of the Institute of Brewing* 67: 358–61.
- Vanderhaegen, Bart, Hedwig Neven, Hubert Verachtert, and Guy Derdelinckx. 2006. "The Chemistry of Beer Aging - A Critical Review." *Food Chemistry* 95(3): 357–81.
- Waters, Deborah M et al. 2013. "Wheat Bread Biofortification with Rootlets , a Malting by-Product." *Journal of Science of Food an Agiculture* (August).
- Zhang, Jianhua, Wei-bao Kong, Y A N Lin, and Lian-ju Shan. 2008. "Optimization of extraction conditions for antioxidant phenolic compounds from malt." 33(2009): 291–305.

Annexes

Annexe 1



Annexe 2

Echantillon	Commentaire
Orge 1	Correspondance malt 01; Bretagne bio
Froment 2	Correspondance malt 02; Bretagne Bio
Orge 3	Correspondance malt 03; Bretagne Sebastian 2RP Bio
Orge 4	Correspondance malt 04; Bretagne Sebastian 2RP Bio
Orge 5	Correspondance malt 05; Bretagne Sy tepee 2RH Bio
Orge 6	Correspondance malt 06; Bretagne Pewter 2RP Bio
Orge 7	Correspondance malt 07; Bretagne Sebastian 2RP Bio
Orge 8	Correspondance malt 08; Bretagne Sebastian 2RP Bio
Orge 9	Correspondance malt 09; Bretagne Sebastian 2RP Bio
Orge 10	Pas de correspondance; Bretagne Sebastian 2RP Bio
Orge 11	Pas de correspondance; Bretagne Pewter 2RP Bio
Orge 12	pas de correspondance; Bretagne Bio
Orge 13	Pas de correspondance; RGT planet 2RP conventionnel

Annexe 3

Echantillon	Commentaire
Malt 01	Correspondance orge 01; « Maltfabrique » Bio
Malt 02	Correspondance froment 02 ; « Maltfabrique » Bio
Malt 03	Correspondance orge 03; « Maltfabrique » Sebastian 2RP Bio
Malt 04	Correspondance orge 04; « Maltfabrique » Sebastian 2RP Bio
Malt 05	Correspondance orge 05; « Maltfabrique » Sy tepee 2RH Bio
Malt 06	Correspondance orge 06; « Maltfabrique » Pewter 2RP Bio
Malt 07	Correspondance orge 07; « Maltfabrique » Sebastian 2RP Bio
Malt 08	Correspondance orge 08; « Maltfabrique » Sebastian 2RP Bio
Malt 09	Correspondance orge 09; « Maltfabrique » Sebastian 2RP Bio
Malt 10	Pas de correspondance; "Greenfarm" Quench conventionnel
Malt 11	Pas de correspondance; "Brasserie-malterie la Piautre" Bio
Malt 12	Pas de correspondance; "Brasserie-malterie la Piautre" Bio
Malt 13	Pas de correspondance; "Brasserie de Launay" Bio
Malt 14	pas de correspondance; Maris Otter conventionnel
Malt 15	Pas de correspondance; "Boortmalt"; 50% Explorer/50% Sebastian 2RP conventionnel
Malt 16	50% malt 15/50% malt 02, uniquement brassin conventionnel

Annexe 4

PRICE LIST OF BARLEY ANALYSIS (2017) All prices are in Euro

MOISTURE

> Moisture (%) 17,6

CHEMICAL ANALYSIS

> Total proteins (%) 39,5
 > Beta glucans (colorimetric method) (mg/100g) 154,3
 > Cation (Pb, Cd, As, Hg, Zn or Fe) *by cation 39,6
 > Fatty substances 32,7
 > Ashes 32,7

> Sieving test

- x > 2,8 (%)
 - 2,8 > x > 2,5 (%)
 - 2,5 > x > 2,2 (%)
 - Waste (%) 26,4
 - x > 2,5 (%)
 - x < 2,5 (%) 26,4

GERMINATION

> Germinal capacity (TTZ coloration) 26,4
 > Germinal energy (Aubry method) 22,1

> Broken seeds (%) 5,3
 > Entire seeds (%) 5,3
 > Impurities (%) 5,3
 - Total impurities 5,3
 - Foreign seeds 5,3
 - Foreign material 5,3
 - Insects 5,3
 - Dust 5,3

KERNELS

> Weight
 - 1000 Kernel weight (g) 26,4
 - Hectolitre weight (g/hl) 33,7

- Vitreous seeds at 100% 5,4
 - Modified seeds at 100% 5,4

> Length of acrospire (%)
 - between 0 - 1/4
 - between 1/4 - 1/2
 - between 1/2 - 3/4
 - between 3/4 - 1
 - >1 44,1
 > Hussards (%) 29,6
 > Ungerminative Kernels 5,4
 > Unmodified seeds 26,5

MYCOTOXINS

> Mycotoxins and contaminaton indicators (%)
 - Aflatoxines B1 (ELISA) 548,4
 - Zearalenone (ELISA) 548,4
 - Gushing (methode Carlsberg) 66,0
 - DON (ELISA) 548,4
 - Ergosterol 223,6
 - Ochratoxine (HPLC-UV) 148,2

KERNELS

> 1000 Kernel weight 26,5
 > Sieving test
 - x > 2,8 (%)
 - 2,8 > x > 2,5 (%)
 - 2,5 > x > 2,2 (%)
 - Waste (%) 26,5
 - x > 2,5 (%)
 - x < 2,5 (%) 26,5
 > Naked seeds (%) 5,4
 > Broken seeds (%) 5,4
 > Entire seeds (%) 5,4
 > Impurities (%) 5,4
 - Total impurities 5,4
 - Foreign seeds 5,4
 - Foreign material 5,4
 - Insects 5,4

MISCELLANEOUS

> Cations on malt without treatment
 - Pb, Cd, As, Hg, Cu, Zn or Fe (per element) 41,1
 > Cations on wort without treatment
 - Pb, Cd, As, Hg, Cu, Zn or Fe (per element) 41,1
 > Liquids on wort (FAME)
 - Fatty acid spectrum (Detailed list in annex)
 - Total lipids (mg/L) 295,1
 > Anions composition (mg/L)
 - Cl, SO4, PO4, NO3, SIO2 (per element) 97,6
 > Fatty substances 32,7
 > Ashes 32,7
 > Ferulic and coumaric acids 281,2
 > Phenolic acids 281,2

PRICE LIST OF MALT (including special malts and adjunct) AND WORT ANALYSIS (2017)

MOISTURE			FILTRATION	
> Moisture (%)	17,6		> Filtration speed (min)	
			- EBC method	5,4
EXTRACT	30,8		- 100 - 200 mL fine grind	5,4
			- 100 - 200 mL coarse grind	5,4
> Fine grind			> Wort viscosity (cP)	30,8
- Extract fine (EBC mashing) (%)		→	> Beta glucans (colorimetric method)	154,3
- Extract fine (Dry basis) (%)	70,4		> Filtration Teparl	175,9
- Hot water extract	70,4			
> Extract, fine and coarse grind (EBC mashing) (%)		→	PROTEIN CONTENT	
> Difference fine and coarse grind	39,6		> Total protein (dry basis) (%)	42,0
> Description			> Soluble protein (%)	39,6
- Color of wort (visual method) (*EBC)	15,9		> Kolbach index	79,3
- Color of wort (photometric method) (SRM)	15,9		*Gratis if total and soluble protein are request	
- Color of boiled wort (visual method) (*EBC)	37,4		> Hartong at 45°C	39,6
- Color of boiled wort (photometric method) (SRM)	37,4		> Free amino nitrogen (Ninhydrin method) (mg/L)	65,8
- Odor of mash	5,3		> PDMS (HPLC method) (µg/g)	162,6
- Clarity of wort	5,3		> Amino acid on wort (mg/L)	352,3
- Turbidity of wort (*EBC)	19,9		*Detailed list in annex	
- pH of wort	16,0			
> Fermentability test			MALT MODIFICATION	
- Limit attenuation (%)	44,1		> Friability (%)	
> Fermentable sugars on wort (g/100mL)	115,3		- Friability index (%)	19,9
*Detailed list in annex			- Homogeneity index	19,9
			- Entire seeds	5,4
SACCHARIFICATION			> Modification (Calcofluor method) (%)	
> Saccharification rate (min)	4,3		- Modification index	37,4
> Diastasic power (EBC method)	70,5		- Homogeneity index	10,6
> Alpha Amylase (Enzymatic method)	39,6			

Annexe 5

Orge

	M.E. à façon		M.E. en propre		IFBM	FRAB	Arvalis	Matleur de France	VLB	Synagra A	S
	Conseillé	Exclusion	Conseillé	Exclusion							
Humidité	10-14%	>14.5%	<14.5%	>14.5%	<14.5%	<14.5%	<14.5%	<14.5%	<14%	<14%	
Protéines	9.5-11,5%	8-11.5%	9.5-11.5%	8-11.5%	9.5-11.5%	8.5-11.5%	8.5-11.5%	entre 10 et 11	10-11.5%	<11.5%	
Pré-germination	/	/	/	/	/	/	<2%	/	/	/	
Calibrage AB	> 85%	/	>95%	<85%	> 90%	> 90%	>90%	/	>85%	>90%	
Calibrage D	/	/	/	/	2% < 2.2mm	<3.0%	/	/	/	/	
Calibrage D+E	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
Calibrage E	/	/	/	/	<0.5%	/	/	/	/	/	
Calibrage E+F	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
Calibrage G	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
Calibrage E+F+G	/	/	/	/	/	/	/	/	/	<2.5%	
Impuretés G	/	/	/	/	/	/	<0.5%	<0.5%	/	<0.5%	
E germin. 3j	/	/	/	/	/	/	>98%	>97%	>92%		
E germin. 5j	>90%	<75%	>97%	<95%	/	>95%	/	/	>98%	>95%	>
P 1000											37-45 g

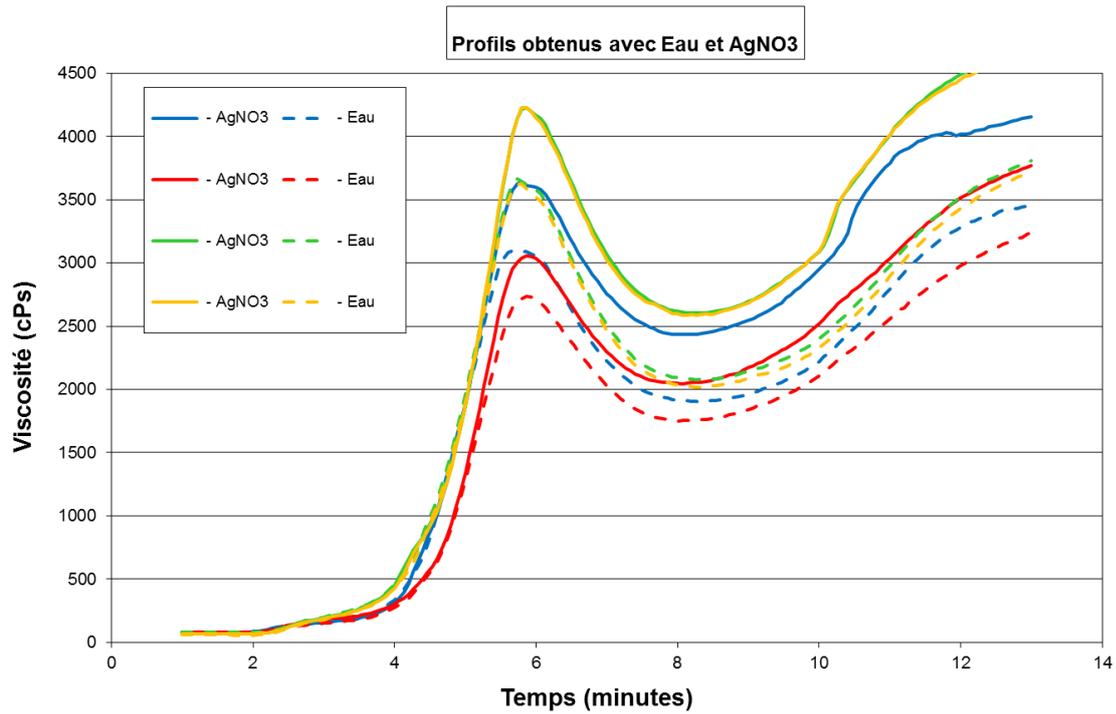
*M.E = Malteur Echos

**Synagra A = Synagra rendu agriculteur

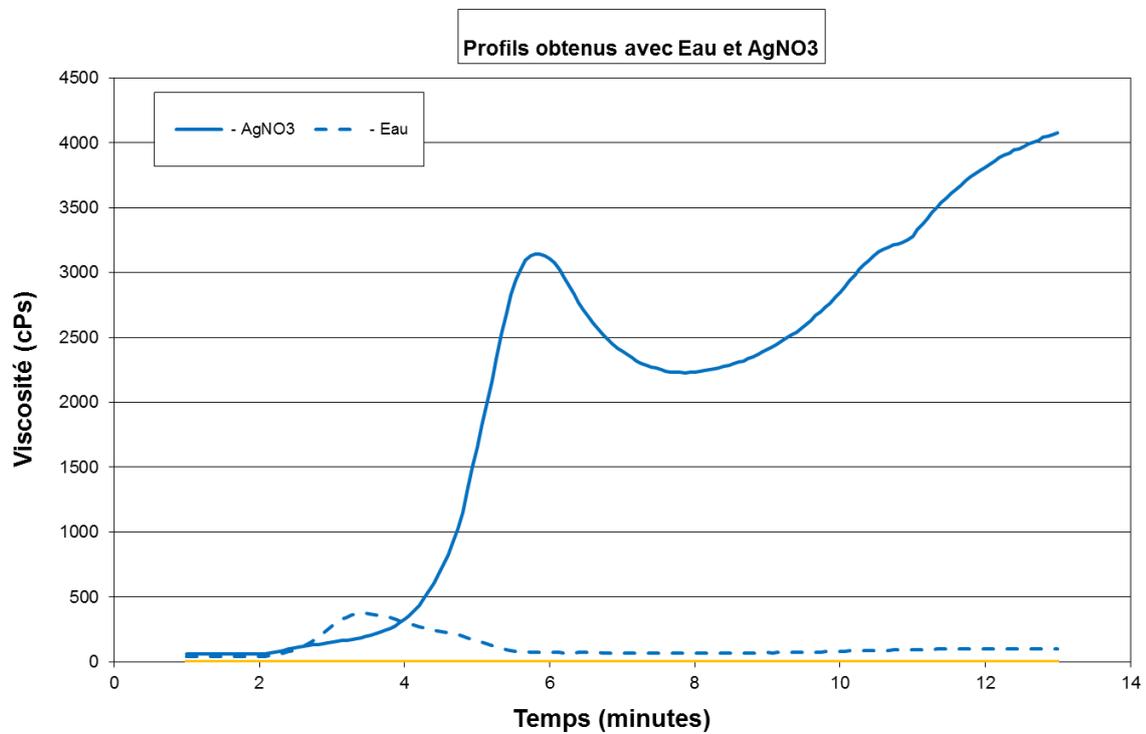
*** Synagra N = Synagra rendu négoce

Malt				
	Analyse M.E.	IFBM	VLB	EBC
Humidité	4.80%	4-4.5%	3-5%	4.5-5.5
Calibrage	/	>90%	90-95%	>95%
P1000	/	/	28-44g	/
Tps filtr.	/	/	Max 60 min	/
Tps sacch.	/	<15min	<15min	/
RDMT	82.4%	80-83%	80-83%	Min 80.5%
Couleur	5.3 EBC	3-6.5 EBC	4-5 EBC	2-5 EBC
Viscosité	1.5	1.50-1.55mPa.s	1.48-1.6 mPa.s	1.55-1.65mPa.s
pH	/	5.7-6	5.6-6	/
Prot. Tot.	8%	9.5-11.5%	11-11.5%	10-11.5%
Prot. Sol.	3.65%	3.6-4.7%	4-5%	4.1-4.7%
Kolbach	45.6	35-45%	38-45%	
FAN	/	120-160mg/l	>120mg/l	>160mg/l
Polyph.	/	/	/	/
Différence	/	/	/	1-2%

Annexe 6



*Bleu = Orge 01 ; Rouge= Orge 02 ; Vert = 03 ; Jaune = Orge 04



*Bleu = orge 14

Annexe 7

ACP ORGES

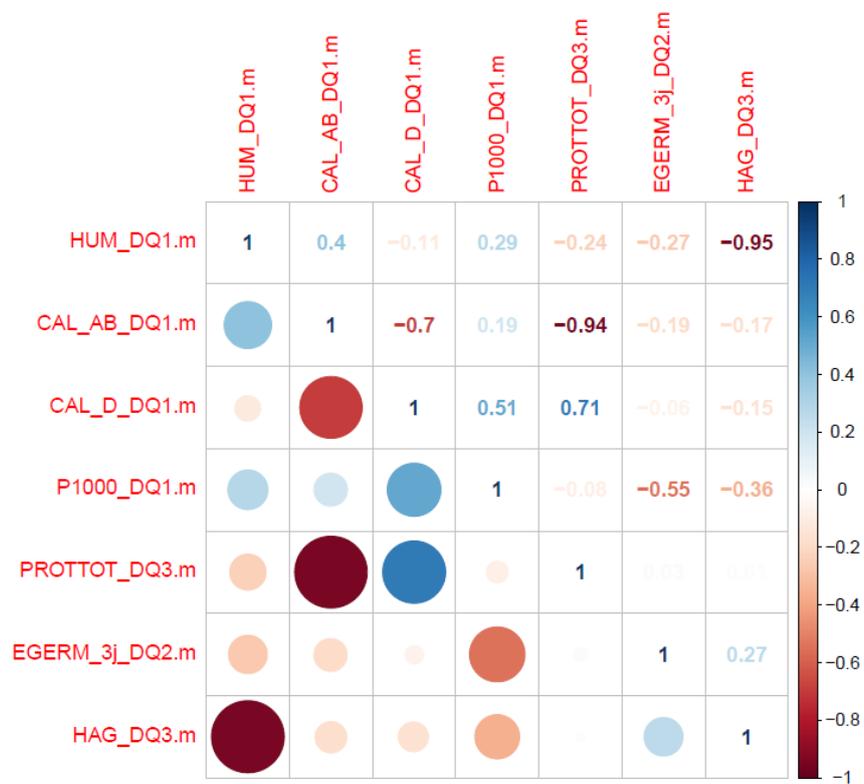
	PC1	PC2	PC3	PC4
HUM_DQ1.m	-0,427	-0,320	0,455	-0,047
CAL_AB_DQ1.m	-0,543	0,210	-0,173	0,167
CAL_D_DQ1.m	0,337	-0,490	-0,108	0,388
P1000_DQ1.m	-0,177	-0,461	-0,505	0,426
PROTTOT_DQ3.m	0,481	-0,311	0,186	-0,301
EGERM_3j_DQ2.m	0,216	0,328	0,491	0,740
HAG_DQ3.m	0,316	0,443	-0,469	0,000

ACP MALTS

	PC1	PC2	PC3	PC4
VFILTf_DQ1.m	0,055	-0,369	0,589	-0,038
TSACCHf_DQ1.m	-0,338	-0,058	0,068	0,259
RDMTSf_DQ1.m	0,427	0,196	0,202	-0,134
pH_DQ1.m	-0,333	0,302	0,347	0,001
COL_DQ1.m	0,056	0,596	-0,002	0,176
VISC_DQ1.m	-0,197	-0,417	0,171	-0,370
POLYPH_DQ1.m	0,004	-0,363	-0,581	0,085
FAN_DQ1.m	0,449	-0,025	-0,150	0,063
KOLB_DQ1.m	0,461	-0,073	0,031	-0,139
MALT_DQ1.m	0,028	0,202	-0,072	-0,777
NFERM_DQ1.m	0,363	-0,157	0,304	0,335

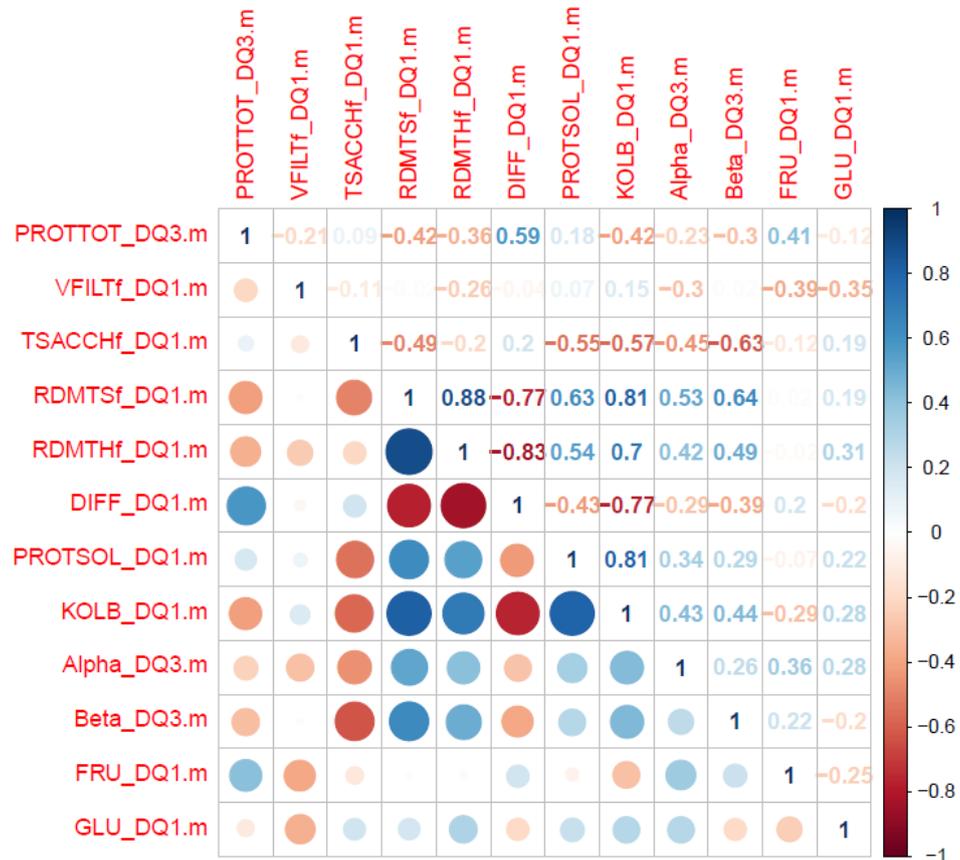
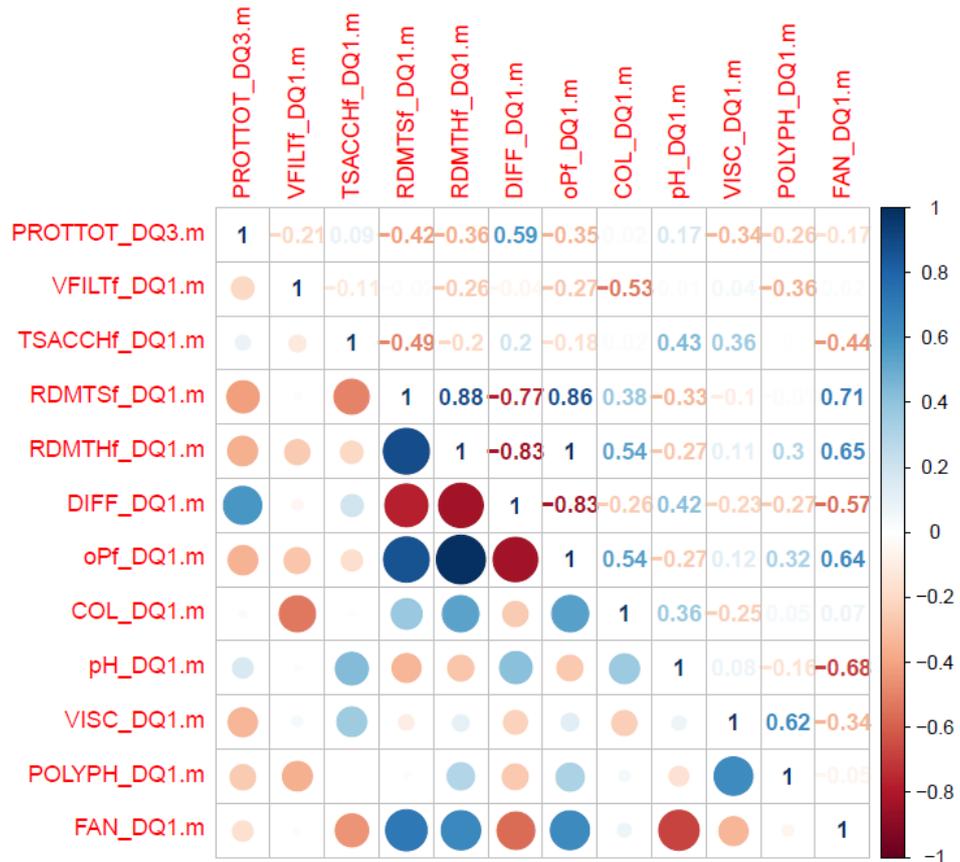
Annexe 8

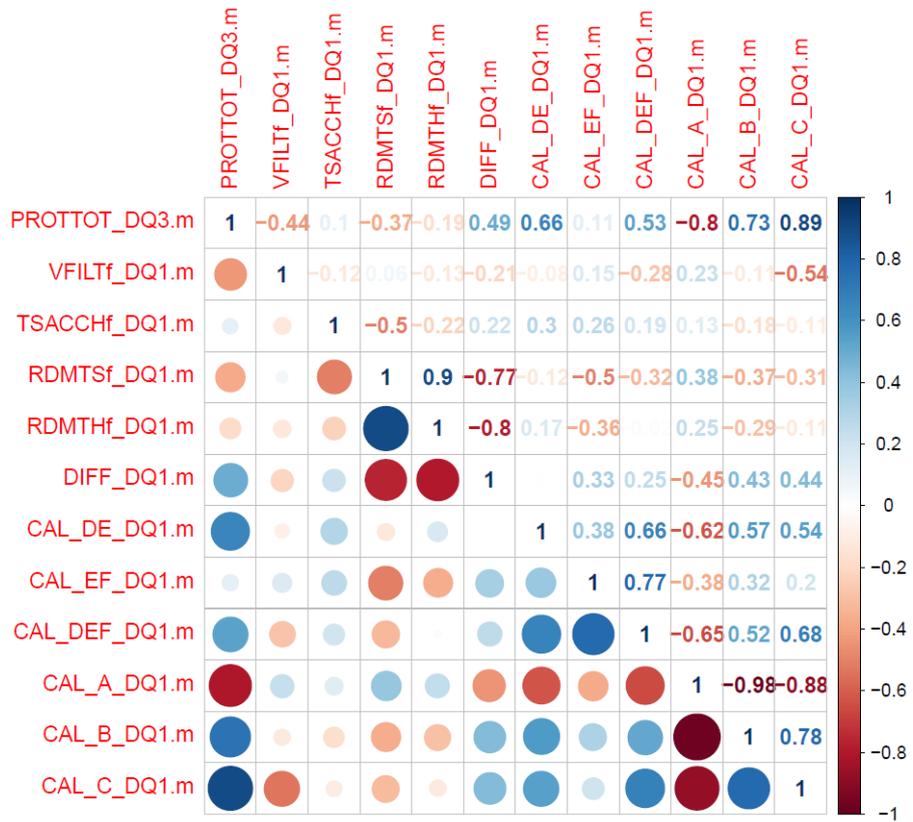
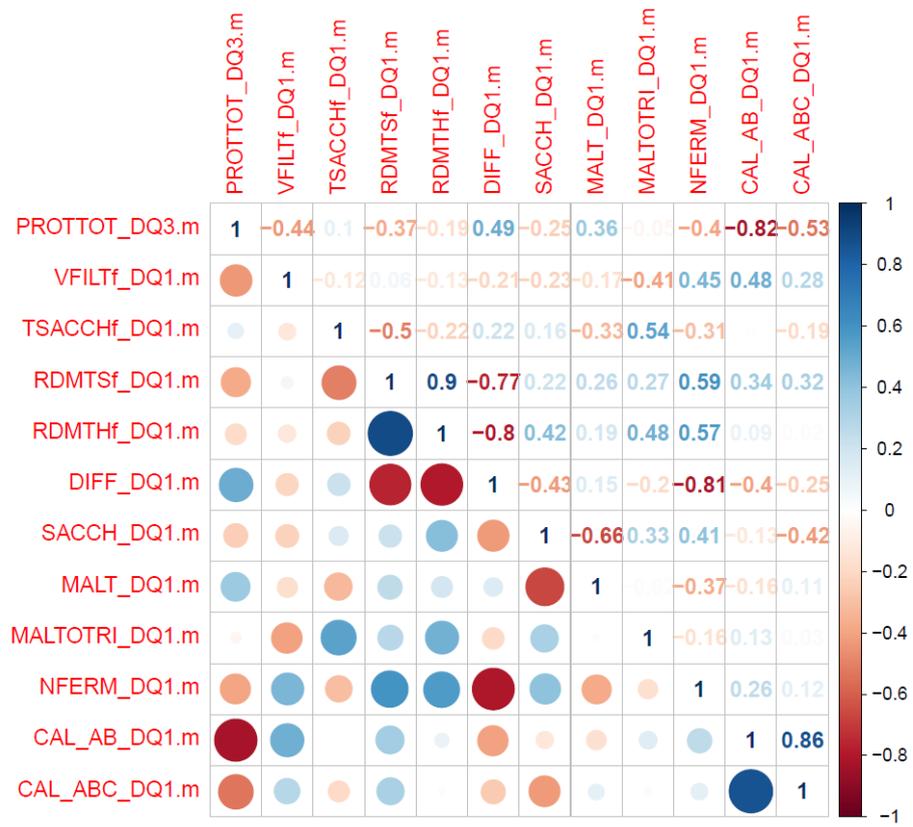
CORRÉLATIONS ORGES



Annexe 9

CORRÉLATIONS MALTS





Annexe 10

	Lot 1	Lot 2	Lot 3	Lot 4
Temps de saccharification (min)	10	10	10	10
Vitesse de filtration (min)	> 120	105	> 120	> 120
Rendement sec (%MS)	84.1	84.03	8.08	82.27
Différence fine/grosse mouture (%MS)	1.72	0.52	1.87	0.93
Couleur (EBC)	8,1	3.5	3.4	3.4
Viscosité (mPa.s)	1.56	1.49	1.51	1.49
pH	5.8	5.8	5.9	5.9

Annexe 11

ANALYSE FINANCIERE POUR 25T/AN

PRODUCTION

Organisation de la production	
Nbre batch/semaine	2
Nbre semaines/an	25
Volume d'orge transformé	
par production	650kg
par semaine	1 300kg
par mois	5 200kg
par an	32 500kg
Coefficient de transformation	0.8
Quantités	
par production	520 kg
par semaine	1 040 kg
par mois	4 160 kg
par an	26 000 kg
estimation des pertes	0,5%
par an	130kg

INVESTISSEMENT

	Quantité	Prix unitaire	Coût
1. Batiment			€ 38 300
1.1. Gros œuvre (m²)	80	€ 450	€ 36 000
1.2. Portes/aérations			
porte extérieure	1	€ 300	€ 300
aération germoir	4	€ 100	€ 400
1.3. électricité			
monophasé	1	€ 100	€ 100
triphase	1	€ 1.000	€ 1.000
1.4. Eau			
raccordement	1	€ 500	€ 500
2. Matériel malterie			€ 19 480
2.1 Analyse			
Humidimètre	1	€ 250	€ 250
balance précision 0.01g	1	€ 150	€ 150
2.2. Trempe			
cuve inox 1 600L + fond filtrant	1	€ 800	€ 800
vis de chargement	1	€ 500	€ 500
vanne trois voies	1	€ 130	€ 130
cuve eau froide 1 500L	1	€ 2.500	€ 2.500
2.3. Germination			
Rigole + vis de transport	1	€ 250	€ 250
motoculteur	1	€ 400	€ 400
Pelle à neige	1	€ 50	€ 50
thermomètres	4	€ 15	€ 60
2.4. Touraillage			
Touraille	1	€ 10 000	€ 10 000
vis de transport	1	€ 500	€ 500
2.5. conditionnement			
vis de transport	2	€ 250	€ 500
cyclone	1	€ 2 000	€ 2 000
Silo panneau marin (600kg = 1 100L)	1	€ 240	€ 240
aspirateur à poussière	1	€ 400	€ 400
Balance précision 0.1kg	1	€ 200	€ 200
machine à coudre	1	€ 300	€ 300
2.6. Autres			
transpalette	1	€ 250	€ 250
2.7. Imprévus	5%		€ 2 889
Total			€ 60 669

AMORTISSEMENT

	Coût	Taux	Durée	Annuité
1. Bâtiment	€ 38 300	4%	20	€ 2 818
2. Matériel malterie	€ 19 480			
2.1 Analyse				
Humidimètre	€ 250	4%	3	€ 90
balance précision 0.01g	€ 150	4%	3	€ 54
2.2. Trempe				
cuve inox 1 600L + fond filtrant	€ 800	4%	10	€ 99
vis de chargement	€ 500	4%	5	€ 112
vanne trois voies	€ 130	4%	3	€ 47
cuve eau froide 1 500L	€ 2 500	4%	10	€ 308
2.3. Germination				
Rigole + vis de transport	€ 250	4%	5	€ 56
motoculteur	€ 400	4%	5	€ 90
Pelle à neige	€ 50	4%	3	€ 18
thermomètres	€ 60	4%	3	€ 22
2.4. Touraillage				
Touraille	€ 10 000	4%	10	€ 1 233
vis de transport	€ 500	4%	5	€ 112
2.5. conditionnement				
vis de transport	€ 500	4%	5	€ 112
cyclone	€ 2 000	4%	10	€ 247
Silo panneau marin (600kg = 1 100L)	€ 240	4%	3	€ 86
aspirateur à poussière	€ 400	4%	5	€ 90
Balance précision 0.1kg	€ 200	4%	3	€ 72
machine à coudre	€ 300	4%	3	€ 108
2.6. Autres				
transpalette	€ 250	4%	3	€ 90
		Total amortissement		€ 5 865

FRAIS DE FONCTIONNEMENT

	Quantité	Prix unitaire	Coût
3. Frais variables			€ 13 284
Orge (T)	32,5	€ 285	€ 9 263
Eau (m ³)	115	€ 5	€ 595
Forfait électricité	1		€ 3 327
sacs	1000	€ 0.1	€ 100
4. Frais fixes			€ 12 597
4.1. amortissement			€ 5 865
4.2. analyse malt	5	€ 247	€ 1 233
4.3. assurance	1	€ 500	€ 500
4.4. main d'œuvre	0.33	€ 15 000	€ 5 000
Total coût de fonctionnement			€ 25 882

RECETTE

5. Vente	Prix de vente	Total
vente directe (€/T)	€ 705	€ 17 625
6. bénéfice avant impôts		-€ 8 257

Annexe 12

ANALYSE FINANCIERE POUR 100T/AN

PRODUCTION

Organisation de la production	
Nbre batch/semaine	2
Nbre semaines/an	50
Volume d'orge transformé	
par production	1 300 kg
par semaine	2 600 kg
par mois	10 400 kg
par an	130 000 kg
Coefficient de transformation	0.8
Quantités	
par production	1 040 kg
par semaine	2 080 kg
par mois	8 320kg
par an	104 000 kg
estimation des pertes	0,5%
par an	520kg

INVESTISSEMENT

	Quantité	Prix unitaire	Coût
1. Bâtiment			€ 55 900
1.1. Gros œuvre (m²)	120	€ 450	€ 54 000
1.2. Portes/aérations			
porte extérieure	1	€ 300	€ 300
1.3. Electricité			
monophasé	1	€ 100	€ 100
triphase	1	€ 1 000	€ 1 000
1.4. Eau			
raccordement	1	€ 500	€ 500
2. Matériel malterie			€ 28 040
2.1 Analyse			
Humidimètre	1	€ 250	€ 250
balance précision 0.01g	1	€ 150	€ 150
2.2. Trempe			
salle thermostatée 12°C (m ²)	95	€ 10 500	€ 10 500
cuve inox 2 500L + fond filtrant	1	€ 1 250	€ 800
vis de chargement	1	€ 500	€ 500
vanne trois voies	1	€ 130	€ 130
citerne 1 000L	3	€ 40	€ 120
2.3. Germination			
Rigole + vis de transport	1	€ 250	€ 250
motoculteur	1	€ 400	€ 400
Pelle à neige	1	€ 50	€ 50
thermomètres	4	€ 15	€ 60
2.4. Touraillage			
Touraille	1	€ 10 000	€ 10 000
vis de transport	1	€ 500	€ 500
2.5. conditionnement			
vis de transport	2	€ 250	€ 500
cyclone	1	€ 2 000	€ 2 000
Silo panneau marin (1 000kg = 2 000L)	2	€ 340	€ 680
aspirateur à poussière	1	€ 400	€ 400
Balance précision 0.1kg	1	€ 200	€ 200
machine à coudre	1	€ 300	€ 300
2.6. Autres			
transpalette	1	€ 250	€ 250
2.7. Imprévus	5%		€ 4 197
Total			€ 88 137

AMORTISSEMENT

	Coût	Taux	Durée	Annuité
1. Batiment	€ 55 900	4%	20	€ 4 113
2. Matériel malterie	€ 28 040			
2.1 Analyse				
Humidimètre	€ 250	4%	3	€ 90
balance précision 0.01g	€ 150	4%	3	€ 54
2.2. Trempe				
salle thermostatée 12°C (m²)	€ 10 500	4%	10	€ 1 295
cuve inox 2 500L + fond filtrant	€ 800	4%	10	€ 99
vis de chargement	€ 500	4%	5	€ 112
vanne trois voies	€ 130	4%	3	€ 47
citerne 1 000L	€ 120	4%	3	€ 43
2.3. Germination				
Rigole + vis de transport	€ 250	4%	5	€ 56
motoculteur	€ 400	4%	5	€ 90
Pelle à neige	€ 50	4%	3	€ 18
thermomètres	€ 60	4%	3	€ 22
2.4. Touraillage				
Touraille	€ 10 000	4%	10	€ 1 233
vis de transport	€ 500	4%	5	€ 112
2.5. conditionnement				
vis de transport	€ 500	4%	5	€ 112
cyclone	€ 2 000	4%	10	€ 247
Silo panneau marin (1 000kg = 2 000L)	€ 680	4%	3	€ 245
aspirateur à poussière	€ 400	4%	5	€ 90
Balance précision 0.1kg	€ 200	4%	3	€ 72
machine à coudre	€ 300	4%	3	€ 108
2.6. Autres				
transpalette	€ 250	4%	3	€ 90
		Total amortissement		€ 8 348

FRAIS DE FONCTIONNEMENT

	Quantité	Prix unitaire	Coût
3. Frais variables			€ 49 190
Orge (T)	130	€ 285	€ 37 050
Eau (m ³)	460	€ 5.174	€ 2 380
Forfait électricité	1		€ 9 360
sacs	4 000	€ 0.1	€ 400
4. Frais fixes			€ 20 080
4.1. amortissement			€ 8 348
4.2. analyse malt	5	€ 247	€ 1 233
4.3. assurance	1	€ 500	€ 500
4.4. main d'œuvre	0.33	€ 30 000	€ 10 000
Total coût de fonctionnement			€ 69 270

RECETTE

5. Vente	prix de vente	Total
vente directe (€/T)	€ 705	€ 70 500
6. bénéfice avant impôts		€ 1 230

Annexe 13

ANALYSE FINANCIERE POUR 500T/AN

PRODUCTION

Organisation de la production	
Nbre batch/semaine	2
Nbre semaines/an	50
Volume d'orge transformé	
par production	6 300 kg
par semaine	12 600 kg
par mois	50 400 kg
par an	630 000 kg
Coefficient de transformation	0.8
Quantités	
par production	5 040 kg
par semaine	10 080 kg
par mois	40 320 kg
par an	504 000 kg
estimation des pertes	0,5%
par an	2520kg

INVESTISSEMENT

	Quantité	Prix unitaire	Coût
1. Bâtiment			€ 58 900
1.1. Gros œuvre (m²)	120	€ 450	€ 54 000
1.2. Portes/aérations			
porte extérieure	1	€ 300	€ 300
1.3. électricité			
monophasé	1	€ 100	€ 100
triphase	1	€ 1 000	€ 1 000
Gestion PLC	1	€ 3 000	€ 3 000
1.4. Eau			
raccordement	1	€ 500	€ 500
2. Matériel malterie			€ 64 440
2.1 Analyse			
Humidimètre	1	€ 250	€ 250
balance précision 0.01g	1	€ 150	€ 150
2.2. Trempe			
cuve inox 15 000L + fond filtrant	1	€ 8 000	€ 8 000
vis de chargement	1	€ 500	€ 500
vanne trois voies	1	€ 130	€ 130
citerne 1 000L	1	€ 40	€ 160
2.3. Germination	4		
Conteneur de germination	2	€ 6 000	€ 12 000
Rigole + vis de transport	1	€ 250	€ 250
Pelle à neige	1	€ 50	€ 50
2.4. Tourillage			
Touraille	1	€ 20 000	€ 20 000
vis de transport	1	€ 500	€ 500
2.5. conditionnement			
vis de transport	2	€ 250	€ 500
cyclone	1	€ 2 000	€ 2 000
Silo panneau marin (5 000kg = 10 000L)	3	€ 500	€ 1 500
aspirateur à poussière	1	€ 400	€ 400
Ensacheuse	1	€ 17 500	€ 17 500
machine à coudre	1	€ 300	€ 300
2.6. Autres			
transpalette	1	€ 250	€ 250
2.7. Imprévus	5%		€ 6.167
Total			€ 129 507

AMORTISSEMENT

	Coût	Taux	Durée	Annuité
1. Batiment	€ 58 900	4%	20	€ 4 334
2. Matériel malterie	€ 64 440			
2.1 Analyse				
Humidimètre	€ 250	4%	3	€ 90
balance précision 0.01g	€ 150	4%	3	€ 54
2.2. Trempe				
cuve inox 15 000L + fond filtrant	€ 8 000	4%	10	€ 986
vis de chargement	€ 500	4%	5	€ 112
vanne trois voies	€ 130	4%	3	€ 47
citerne 1 000L	€ 160	4%	3	€ 58
2.3. Germination				
Conteneur de germination	€ 12 000	4%	10	€ 1 479
Rigole + vis de transport	€ 250	4%	3	€ 90
Pelle à neige	€ 50	4%	3	€ 18
2.4. Touraillage				
Touraille	€ 20 000	4%	10	€ 2 466
vis de transport	€ 500	4%	3	€ 180
2.5. conditionnement				
vis de transport	€ 500	4%	3	€ 180
cyclone	€ 2 000	4%	10	€ 247
Silo panneau marin (50 00kg = 10 000L)	€ 1 500	4%	5	€ 337
aspirateur à poussière	€ 400	4%	5	€ 90
Ensacheuse	€ 17 500	4%	10	€ 2 158
machine à coudre	€ 300	4%	3	€ 108
2.6. Autres				
transpalette	€ 250	4%	3	€ 90
		Total amortissement		€ 13.124

FRAIS DE FONCTIONNEMENT

	Quantité	Prix unitaire	Coût
3. Frais variables			€ 213 449
Orge (T)	630	€ 285	€ 179 550
Eau (m ³)	2 300	€ 5.174	€ 11 899
Forfait électricité	1		€ 20 000
sacs	20 000	€ 0.1	€ 2000
4. Frais fixes			€ 59 857
4.1. amortissement			€ 13 124
4.2. analyse malt	5	€ 247	€ 1 233
4.3. assurance	1	€ 500	€ 500
4.4. personnel qualifié	1.5	€ 30 000	€ 45 000
Total coût de fonctionnement			€ 273 306

RECETTE

5. Vente	Prix de vente	Total
vente directe (€/T)	€ 705	€ 352 500
6. bénéfice avant impôts		€ 79 194