

Impact de la variabilité de blés durs issus d'itinéraires techniques innovants sur leur aptitude à la transformation

Joubert Marianne (1), Morel Marie-Hélène (1), Samson Marie-Françoise (1), Thomas Romain (2), Justes Eric (2, 4), Leygue Jean-Philippe (3), Bedoussac Laurent (5), Lullien-Pellerin Valérie (1)

(1) IATE, CIRAD, INRA, Montpellier SupAgro, Université de Montpellier, 34060 Montpellier, France

(2) AGIR, Université de Toulouse, INRA, INPT, INP-PURPAN, Castanet Tolosan, France

(3) ARVALIS - Institut du végétal, chemin de la côte vieille, 31450 Baziège, France

(4) depuis le 01/09/2017 CIRAD, UMR SYSTEM Cihean-Cirad-Inra-Sup AgroMontpellier, Montpellier, France

(5) AGIR, Université de Toulouse, INRA, INPT, INP-PURPAN, ENSFEA, Castanet Tolosan, France

valerie.lullien-pellerin@inra.fr

Résumé

La culture du blé dur nécessite généralement des quantités importantes de fertilisants azotés pour atteindre des niveaux satisfaisants de vitrosité, de teneur en protéines des grains, des rendements semouliers élevés et *in fine* des pâtes de qualité. Notre objectif, qui s'inscrit dans le projet ANR DURDUR (2013-2017), est d'évaluer l'impact de différents itinéraires techniques agronomiques sur la qualité des grains et des produits semouliers et pastiers. Ainsi, 35 lots de blés durs ont été produits selon des itinéraires techniques innovants, avec une réduction d'intrants comparativement aux références actuelles. Ces lots ont été produits au cours de deux années de cultures sur 2 pédo-climats (Sud-Est et Sud-Ouest de la France). Ces lots ont été analysés selon des critères technologiques « classiques » mesurés sur les grains ou sur les produits transformés sur un moulin pilote à échelle semi-industrielle. Les lots présentant plus de 11,3% de protéines, une vitrosité de 60% et une dureté inférieure à 8 selon la classification du Particle Size Index (PSI) ont été utilisés pour étudier le comportement à la mouture des grains. La teneur en cendres des grains, le poids spécifique (PS) et le poids de mille grains (PMG) sont dans ce cas des indicateurs du taux d'extraction mais les liens protéines-vitrosité-dureté et pourcentage de semoules ne sont plus significatifs. Certaines fractions ont été sélectionnées pour recréer des mélanges proches en granulométrie et contrastés en teneurs en protéines afin d'étudier le lien entre indicateurs technologiques et qualité des semoules transformées en pâtes. Nos résultats confirment que le taux de protéines des semoules est un facteur déterminant de l'indice de viscoélasticité des pâtes, mais seulement jusqu'à un seuil de 12% de protéines au-delà duquel il n'y a plus d'effet significatif de la teneur en protéines sur la qualité technologique des pâtes alimentaires.

Abstract

Durum wheat culture usually requires large amount of nitrogenous fertilizers to achieve sufficient vitreousness, protein concentration, semolina yields and pasta quality. The objective of this study, which is part of the ANR DURDUR project (2013-2017), is to evaluate the impact of conventional and innovative field practices on grain quality, semolina and pasta processing. Thus, 35 durum wheat batches were produced both in conventional and innovative practices from three sites for two harvested years. Characterization of samples was performed with "classical" technological criteria on grains and on samples processed with a semi-industrial pilot mill. Durum wheat samples displaying a protein content above 11.3%, a vitreousness higher than 60% and a hardness below 8 (evaluate by the particle size index, PSI), were used to study the milling behavior. Grain ash content, specific weight and thousand kernel weight are indicators of the extraction rate. However, semolina, flour and bran proportions are not explained by these factors. Some fractions were selected to recreate mixtures, with a define particle size distribution and contrasted protein contents, in order to study the relationship between technological indicators and the semolina quality. Protein content is confirmed as a determinant parameter for the pasta viscoelastic behavior, but only up to a threshold of 12% protein content.

INTRODUCTION

La valeur semoulière d'un lot de grains de blé dur (*Triticum durum*) est définie par son aptitude à produire une quantité importante de semoule ayant un faible taux de cendres (Abecassis, 1991). Ce taux de cendres, évalue la contamination de l'albumen amylicé par les parties périphériques du grain, qui sont plus riches en matières minérales (Hinton, 1959). Il est généralement admis que le poids de mille grains (PMG) reflète la quantité d'albumen disponible par grain. La masse volumique des grains (mesurée via le poids spécifique, PS), évalue indirectement, entre autres, le degré d'échaudage des grains. Ces deux facteurs permettent d'appréhender en partie le comportement à la mouture des grains (Abecassis and Chaurand, 1997 ; Dexter *et al.*, 1987 ; Matsuo and Dexter, 1980). De plus, la vitrosité du grain est un facteur important à prendre en compte puisque sa diminution favorise la production de farine plutôt que de semoule (Matveef, 1963 ; Matsuo and Dexter, 1980 ; Samaan *et al.*, 2006). Cependant, les indicateurs « classiques » que sont le PMG, la vitrosité et le PS, pris indépendamment, ne suffisent pas à prédire les rendements en semoule et farine (Raggiri *et al.*, 2014) et ces résultats ont besoin d'être analysés par des approches statistiques multivariées.

La qualité de la semoule obtenue après mouture conditionne la qualité des pâtes alimentaires transformées. Deux critères prédominent lors de l'évaluation de la qualité des pâtes : i) l'aspect de la pâte crue et ii) la texture de la pâte cuite (Abecassis, 1991).

Les qualités d'aspect de la pâte alimentaire crue sont une surface exempte de piquûre et gerçure, ainsi qu'une couleur proche d'un jaune ambré. L'aspect des pâtes peut être altéré par une teneur élevée en parties périphériques dans la semoule du grain. En effet, d'une part ces particules font apparaître des piquûres brunes, et d'autre part, les parties périphériques sont enrichies en activités enzymatiques qui altèrent la couleur jaune des pâtes (Taha and Ságy, 1987). Les piquûres blanches et gerçures sont quant à elles liées à une mauvaise gestion du procédé pastier comme une hydratation insuffisante ou un séchage mal conduit (Abecassis, 1991).

La texture des pâtes cuites doit atteindre un compromis entre masticabilité et fermeté d'une part et viscosité et élasticité d'autre part (Sicignano *et al.*, 2015). Les propriétés de texture des pâtes dépendent de la teneur en protéines avec des pâtes d'autant plus fermes que la semoule est riche en protéines (Dexter and Matsuo, 1977 ; Feillet, 1979 ; Wasik, 1978). Il a aussi été prouvé qu'un séchage à haute ou très haute température favorise l'obtention de pâtes fermes (Novaro *et al.*, 1993 ; de Stefanis and Sgrulletta, 1990).

Les procédés semoulier et pastier requièrent donc des lots de blés durs, ayant des PMG et PS élevés et qui soient vitreux et riches en protéines. L'obtention de ces propriétés est décisive puisque l'aptitude à la transformation d'un lot de blé dur en dépend. Actuellement, des niveaux souvent élevés de fertilisants azotés et de traitements phytosanitaires sont mis en œuvre pour s'assurer d'atteindre de tels critères.

Afin d'améliorer la durabilité de la filière blé dur et ainsi réduire les impacts environnementaux, il devient nécessaire de trouver des compromis entre des pratiques agricoles durables

– en l'occurrence ici des itinéraires techniques innovants à bas niveau d'intrants – et des produits adaptées aux impératifs de la transformation du blé dur en semoules, puis en pâtes. Pour répondre à ces enjeux qualitatifs et environnementaux, notre étude, qui s'inscrit dans le projet ANR DURDUR (2013-2017), vise à étudier l'impact de différents itinéraires techniques agronomiques (conventionnels et innovants à niveau réduit d'intrants) sur la qualité des grains récoltés, leur comportement à la mouture et leur aptitude à être transformés en pâtes alimentaires de qualité.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Matériels

Trente-cinq lots de blés durs (n=35) issus de différents itinéraires agronomiques ont été produits sur trois sites expérimentaux et deux pédo-climats (Sud-Est et Sud-Ouest de la France) et récoltés en juillet 2015 (n=22) et juillet 2016 (n=13). A noter que dans le Sud-Est deux sites ont été distingués l'un à haut potentiel et l'autre à faible potentiel agronomique. Des itinéraires techniques innovants à bas niveau d'intrants – visant à réduire de l'ordre de 20% le niveau de fertilisation azotée et d'au moins 50% les doses de pesticides – ont été comparés aux témoins conventionnels suivant les meilleures références techniques actuelles. Les différents itinéraires techniques ont été gérés selon des règles de décisions formalisées pour atteindre les objectifs visés, induisant notamment des adaptations des modes de travail du sol, de la date de semis, des variétés utilisées, du niveau de fertilisation azotée, ainsi que l'usage de produits phytosanitaires. Ces derniers qui visent à gérer les adventices et la protection fongique des cultures ont été quantifiés au moyen de l'indice de fréquence de traitement (IFT). Parmi ces 35 lots, 8 variétés de blé dur différentes sont représentées : Anvergur, Atoudur, Babylone, Claudio, Dakter, Joyau, Miradoux et Pescadou.

1.2. Caractérisation des grains de blé dur

Pour chaque lot, les mesures du poids spécifique (**PS** ou masse volumique) et du poids de mille grains (**PMG**) ont été réalisées, respectivement selon les normes NFISO 7971-3 (2009) et NF EN ISO 520 (2011). La **vitrosité** des lots a été déterminée au Farinotome de Pohl selon la norme XP V03 779 (2014). La **dureté (PSI)** a été appréciée par la norme AACCC 50-30 (1999) sachant que plus le PSI est bas, plus le grain est dur. Le **calibre des grains** a été déterminé par tamisage d'un échantillon de 100 g de grains sur un granulomètre mécanique Rotex. Le **taux de cendres** et l'humidité des lots ont été mesurés, respectivement, selon la norme NF EN ISO 712 (2010) et NF EN ISO 20483 (2014). Le **taux de protéines** des grains a été mesuré par la méthode Kjeldahl selon la norme NF EN ISO 20483 (2014).

1.3. Mouture

Pour chaque lot, 150 kg de blé dur brut ont été nettoyés et conditionnés par pulvérisation d'eau en deux fois pour monter successivement l'humidité des grains à 15% en 15 heures puis à 17% en 2 heures. Les grains de blé dur ont ensuite été broyés successivement en semoules, farines et sons, grâce à 5 broyeurs et 4 désagrégateurs selon le diagramme de mouture de la semoulerie pilote expérimentale de l'INRA de Montpellier

(Bühler, 1974). Dix-huit fractions (6 semoules, 8 farines, 4 sons) ont été séparées par taille sur des plansichters (tamisage plan) et par densité sur des sasseurs. A la fin de la mouture, le **rendement** en base sèche de chaque fraction a été déterminé par pesée. La **teneur en cendres** de chaque fraction a été mesurée afin d'établir la courbe de cendres du lot (contamination en cendres en fonction du rendement cumulé).

1.4. Fabrication de pâtes alimentaires

Pour 32 lots de l'échantillonnage, des mélanges de semoules ont été constitués et transformés en pâtes sur une presse pilote (Afrem, Lyon). La cuve de malaxage et le fourreau de la vis d'extrusion ont été maintenus à 40°C. Après homogénéisation de 7 kg de semoule à 120 tr/min, le malaxage a été conduit à 60 tr/min en ajoutant de l'eau à 40°C pour atteindre une humidité de 32% (b.h.). Les spaghettis ont été extrudés à 30 tr/min sous vide (400 mmHg). Les pâtes ont ensuite été séchées dans un séchoir pilote selon un diagramme très-haute-température (90°C pendant 5 heures).

1.5. Evaluation de la qualité culinaire des pâtes

La **couleur** des pâtes sèches a été évaluée avec un chromamètre Minolta CR-410 qui mesure les paramètres de clarté L*, d'indice de rouge a* et d'indice de jaune b*.

Huit grammes de pâtes sèches ont été cuits dans 250 ml d'eau bouillante (sel: 7 g/L) jusqu'au temps optimal de cuisson (**OCT**). L'eau courante utilisée a été diluée avec de l'eau déminéralisée afin d'ajuster sa dureté à 15f°/-1. Le temps optimal de cuisson est défini comme le temps nécessaire à la disparition de la ligne blanche visible au milieu du brin de spaghetti écrasé qui correspond à l'amidon non gélatinisé.

A la fin de la cuisson, les pâtes ont été immédiatement égouttées et la cuisson arrêtée en versant 2 x 500 ml d'eau à température ambiante. Les brins de spaghetti ont été conservés sur une éponge humide sous une boîte de Petri à température ambiante pendant 15 minutes avant analyse.

L'indice de viscoélasticité (**IV**) des pâtes a été mesuré à 1 x OCT et 2 x OCT à l'aide d'un texturomètre TAXTPlus équipé d'une sonde de compression (diamètre : 35 mm). Pour chaque lot, 5 mesures ont été effectuées sur des brins de spaghettis de 2 cm. de long.

1.6. Traitements statistiques

Les traitements statistiques ont été réalisés sous langage R (R Core Team, 2016) à l'aide du logiciel libre GNU R publié sous licence GNU GPL. Les corrélations ont été établies entre les variables par des coefficients de Pearson. Pour décrire simultanément les liaisons entre caractéristiques des grains et rendement en mouture, ainsi que les similitudes entre lots de grains, une analyse en composantes principales (ACP) suivie d'une classification ascendante hiérarchique (CAH, distance euclidienne, critère de Ward) ont été appliquées. Les données ont été centrées et réduites pour donner la même importance à toutes les variables car elles sont hétérogènes tant du point de vue des ordres de grandeur que des échelles utilisées.

2. RESULTATS

2.1. Influence de l'itinéraire technique sur les caractéristiques des grains de blé dur

Les itinéraires techniques mis en œuvre dans cette étude ont été conçus en fonction des conditions pédoclimatiques des sites de production et des traitements expérimentaux de contrôle ont aussi été testés (témoins sans azote engrais et/ou sans pesticides). De ce fait, nous ne dissociions pas les effets respectifs du contexte pédoclimatique et des différents leviers agronomiques mobilisés, du fait que c'est la cohérence des itinéraires techniques qui est évaluée.

Le tableau 1 résume les différents itinéraires techniques en termes de lieu, variété, fertilisation azotée et fréquence de traitement phytosanitaire.

Tableau 1 – Description sommaire des 35 itinéraires techniques (lieu, variété, fertilisation azotée et intensité de fréquence des traitements phytosanitaires)

Lieu de culture	Année 1 (A1)			Année 2 (A2)		
	Variété	N (kg/ha)	IFT	Variété	N (kg/ha)	IFT
Sud-Est (SE) Haut potentiel	Anvergur (ref)	190	1.00	Anvergur (ref)	190	3.55
	Anvergur	220	2.90	Anvergur	230	3.75
	Anvergur	140	0.00	Anvergur	140	1.00
	Anvergur	0	2.90	Anvergur	140	0.00
	Anvergur	140	0.90	Anvergur	120	1.00
	Anvergur	220	0.00	Claudio/ Atoudur	40	0.00
	Anvergur	130	0.70			
Sud-Est (SE) Faible potentiel	Claudio (ref)	165	1.00	Claudio (ref)	80	2.80
	Claudio/ Atoudur	140	0.00	Claudio	0	3.75
	Atoudur	120	0.00			
	Claudio	0	2.90			
Sud-Ouest (SO)	Miradoux (ref)	210	3.20	Pescadou	150	1.32
	Anvergur	170	2.25	Anvergur	135	3.80
	Pescadou	170	3.20	Melange	150	1.32
	Joyau	180	2.70	Miradoux	200	5.76
	Mélange	170	2.20	Miradoux	0	5.76
	Dakter	140	0.00			
	Dakter	115* (N organique)	0.00			
	Babylone	150	3.25			
	Miradoux	250	3.70			
	Miradoux	250	0.00			
Miradoux	0	3.70				

Les résultats obtenus lors de la caractérisation des 35 lots de blé dur sont résumés dans le tableau 2.

Tableau 2 – Synthèse des résultats de caractérisation des 35 lots de blés durs en termes de PS, PMG, vitrosité, dureté, taux de cendres et proportion de gros et petits grains)

	Année1			Année2		
	Moy	Min	Max	Moy	Min	Max
PS (kg/hl /b.s.)	70,8	64,4	74,6	83,4	81,5	86,1
PMG (g/b.s.)	36,5	26,8	45,0	47,3	42,6	53,0
Vitrosité (%)	85,0	24,0	98,3	75,5	26,1	95,3
Dureté_PSI	6,3	4,4	11,6	6,1	3,8	9,8
Protéines (% /b.s.)	12,6	8,1	14,7	13,5	9,2	15,9
Cendres (% /b.s.)	1,8	1,6	2,3	1,6	1,5	1,8
<i>Calibre des grains</i>						
Gros grains (% > 2,4mm)	50,9	19,4	78,6	60,6	41,2	75,6
Petits grains (% < 2mm)	5,6	1,5	10,5	3,8	2,3	4,8

2.1.1. Impact de la fertilisation azotée minérale

Comme attendu, on observe globalement une augmentation de la vitrosité des grains de blé dur en fonction du niveau de fertilisation azotée minérale (Figure 1). Néanmoins, cette relation bien que significative ($r=0,71$, $p<0,0001$), explique seulement 57% de la variance ; la régression étant significative grâce à la prise en compte des témoins sans engrais azoté. Par ailleurs, en faisant abstraction des lots pour lesquels aucune fertilisation minérale n'a été utilisée, **il n'existe pas de corrélation significative** ($r=0,37$, $p=0,05$) **entre la quantité d'engrais azotée apportée et la vitrosité des blés durs**. Cela met donc en évidence le fait que la quantité d'azote minéral provenant de l'engrais n'est pas un indicateur suffisamment pertinent du fait que d'autres leviers agronomiques ont été mobilisés pour atteindre les objectifs visés et que le sol contient au départ de la culture de l'azote minéral et qu'il en produit par minéralisation de la matière organique du sol. Par ailleurs, cette relation met en évidence une différence de vitrosité entre les deux années. Ainsi il apparaît que d'autres facteurs, comme les conditions climatiques, déterminent la vitrosité des grains produits.

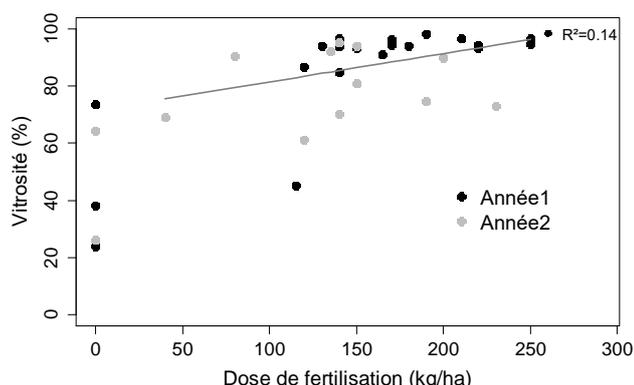


Figure 1 – Vitrosité des blés durs en fonction du niveau de fertilisation azotée minérale

De même, et comme attendu, la teneur en protéines est déterminée en grande partie (60% de la variance) par la fertilisation azotée minérale (Figure 2). Cependant, les témoins sans azote ont à nouveau un fort impact sur la significativité de la relation. En effet, en excluant ces lots, **la relation entre fertilisation azotée minérale et protéines des grains est très**

faible et peu significative ($r=0,41$, $p<0,05$). Cela confirme encore une fois que la quantité d'azote minéral provenant de l'engrais n'est pas un indicateur pertinent du fait que d'autres leviers agronomiques ont été mobilisés pour atteindre les objectifs visés.

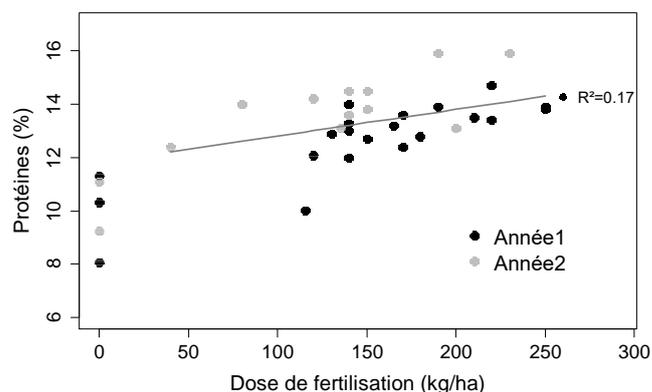


Figure 2 – Teneurs en protéines des blés durs en fonction du niveau de fertilisation azotée minérale

Par ailleurs, nous n'avons trouvé aucun autre lien significatif entre les doses d'engrais azoté minéral et les autres facteurs de caractérisation des grains (PS, PMG, dureté, calibre, taux de cendres). Cela souligne la complexité de la « construction » de ces critères de qualité qui ne peuvent s'expliquer par un seul facteur de production et suggère donc des interactions multiples entre facteurs de production et critères de qualité. Par exemple, il pourrait être intéressant d'analyser l'effet de la disponibilité en azote total prenant en compte la disponibilité en azote au semis, la minéralisation durant la culture et le coefficient apparent d'utilisation de l'engrais. De même, pour approfondir le diagnostic, il serait intéressant d'exprimer chacune des situations par rapport au niveau de fertilisation azotée minérale utilisé dans les itinéraires techniques dits de référence ce qui montrerait que ce n'est pas la quantité d'engrais azoté minéral qui importe mais bien la quantité d'azote acquise issue des diverses sources. *In fine*, cela contribuerait à repenser la façon dont est calculée la quantité d'azote minéral à apporter en fonction d'un objectif d'azote à acquérir et non seulement d'un objectif de rendement.

2.1.2. Impact des traitements phytosanitaires

L'utilisation de traitements phytosanitaires sur les cultures pour la gestion des adventices et la protection fongique est souvent considérée comme essentielle par les praticiens pour préserver la qualité des grains. Dans le cadre de notre étude (22 lots issus de la première année d'expérimentation), nous constatons des corrélations globalement positives entre l'IFT et le poids de mille grains ($r=0,52$; $p<0,001$), le calibre ($r=0,55$; $p<0,001$) et le PS ($r=0,37$; $p<0,05$). Néanmoins, l'IFT explique moins de la moitié de la variance observée. De plus, **ces relations n'ont pas été confirmées par les données de la seconde année**. Cette relation, présumée comme « constante » ou « univoque » est en réalité assez fortement déterminée par des interactions entre facteurs de production et conditions climatiques et elle est donc difficilement généralisable.

Par ailleurs, aucun autre lien significatif n'a été mis en évidence entre l'IFT et les autres caractéristiques des grains (vitrosité, dureté, taux de protéines, taux de cendres).

2.2. Influence des caractéristiques des grains sur les résultats de mouture

Les résultats obtenus de la mouture sont : 1) les pourcentages de semoules (%ST), de farines (%FT) et de sons (%So), ainsi que 2) le taux d'extraction (TE) ou rendement semoulier qui prend en compte la pureté des fractions. Le taux d'extraction a été déterminé à partir des courbes de cendres des différents lots comme l'illustre la figure 3. Il correspond aux rendements cumulés des différentes fractions de mouture classées par ordre croissant de taux de cendres. Dans notre étude, nous avons calculé le rendement semoulier à 0,9% de cendres. A ce stade, les produits obtenus ne sont composés que de semoules et farines alors qu'à 1,1% de cendres (taux réglementaire pour la semoule de qualité pastière), du fait de notre diagramme de mouture semi-industriel, nous aurions dû prendre en compte le son de remoulage.

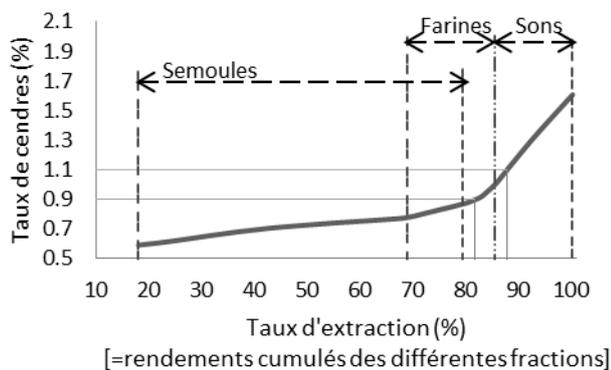


Figure 3 – Exemple de courbe de cendres

Le tableau 3 présente la synthèse des résultats pour les deux années de campagne de mouture.

Tableau 3 – Synthèse des résultats de mouture

	Année1			Année2		
	Moy	Min	Max	Moy	Min	Max
%Semoule totale	71,5	55,4	74,2	72,0	64,9	74,6
%Farine totale	10,4	8,2	21,8	9,9	8,2	15,9
%Sons	18,1	16,5	22,8	18,2	16,5	20,1
TE (à 0.9% de cendres)	70,4	25,6	81,2	80,6	71,9	83,7

Les taux d'extraction ont été supérieurs pour la seconde campagne de mouture. En effet, les grains de la seconde récolte étaient initialement moins minéralisés (tableau 2), permettant l'obtention d'une quantité plus importante de semoules et farines pour un même taux de cendres. Les pourcentages en semoules, farines et sons atteignent cependant des valeurs proches entre les deux campagnes de mouture. Un meilleur taux d'extraction avec les mêmes proportions des différentes fractions implique soit que les produits extraits à 0,9% de cendres contiennent plus de fractions correspondant à la périphérie du grain en relation avec un comportement semoulier différent, soit que les fractions cœur de grains sont plus riches en cendres (par exemple en corrélation avec la teneur en cendres du grain), soit les deux à la fois. Comme déjà montré par Abecassis et Chaurand en 1997, **la teneur en cendres ne constitue donc pas un critère suffisant permettant de qualifier la pureté des semoules.**

Le poids de mille grains (PMG) et le poids spécifique (PS) permettent d'appréhender en partie le comportement à la mouture des grains bien qu'ils ne soient pas suffisants (Abecassis and Chaurand, 1997; Dexter *et al.*, 1987; Matsuo and Dexter, 1980). Concernant les 35 lots de l'étude, le PS et le PMG étaient corrélés positivement avec le taux d'extraction ($r=0,61$, $p<0,001$), alors qu'aucune corrélation n'a été trouvée avec les pourcentages des différentes fractions de mouture.

Les rendements en semoule sont aussi connus pour être impactés positivement par des grains riches en protéines. En effet ces derniers résistent mieux aux contraintes de rupture puisqu'ils sont plus vitreux (Samson *et al.*, 2005) et plus durs (Samaan *et al.*, 2006). Les variations en pourcentage de semoules observées dans l'ensemble de la gamme d'échantillons sont principalement expliquées par le lien avec la teneur en protéines ($R^2=0,85$), puis avec la dureté PSI ($R^2=0,84$) et enfin avec la vitrosité des grains ($R^2=0,73$). Cependant, la figure 4 montre que ces facteurs n'impactent plus les pourcentages de semoules **au-delà d'un seuil mesuré sur les grains de 11,3% de protéines, d'une vitrosité de 60% et pour une dureté inférieure à 8 (PSI). Pour des lots ayant un rendement d'au moins 70% de semoules, les liens protéines-vitrosité-dureté et pourcentage de semoules ne sont plus significatifs.**

Pour identifier plus spécifiquement les facteurs du rendement semoulier, seuls 30 lots au-delà des seuils évoqués précédemment et ayant ainsi produits au moins 70% de semoules (%ST) ont été retenus et analysés par une approche statistique multivariée. Les caractéristiques de ces 30 lots sont présentées dans le tableau 4.

Tableau 4 – Synthèse des résultats de caractérisation des 30 lots ayant produits au moins 70% de semoules

	Année1			Année2		
	Moy	Min	Max	Moy	Min	Max
PS (kg/hl /b.s.)	70,5	64,4	74,6	83,3	81,5	86,1
PMG (g/b.s.)	36,2	26,8	45,0	46,8	42,6	53,0
Vitrosité (%)	92,8	73,7	98,3	81,0	61,2	95,3
Dureté_PSI	5,8	4,4	7,5	5,6	3,8	7,5
Protéines (%/b.s.)	13,1	11,3	14,7	14,1	12,4	15,9
Cendres (%/b.s.)	1,8	1,6	2,3	1,6	1,5	1,8
Calibre des grains						
Gros grains (%> 2,4mm)	48,8	19,4	75,2	58,5	41,2	74,6
Petits grains (%<2mm)	5,8	1,5	10,5	3,8	2,3	4,8

La figure 5 représente l'ACP décrivant les liens entre les caractéristiques des grains et les rendements des différentes fractions pour les 30 lots ayant produit au moins 70% de semoules. Le plan principal de l'ACP n'explique que 59,8% de la variabilité observée. Ce faible pourcentage s'explique par le fait que la teneur en protéines et le pourcentage de sons sont mieux représentés sur le troisième axe qui représente 14,7% de l'inertie. Les variables de caractérisation de taille des grains (PMG, PS, calibre des grains), la vitrosité, la teneur en cendres ainsi que le taux d'extraction sont mieux représentés sur l'axe 1 (36,3% de variabilité expliquée). La dureté et les pourcentages en semoule et farine sont bien représentés sur l'axe 2 (23,5% de variabilité expliquée).

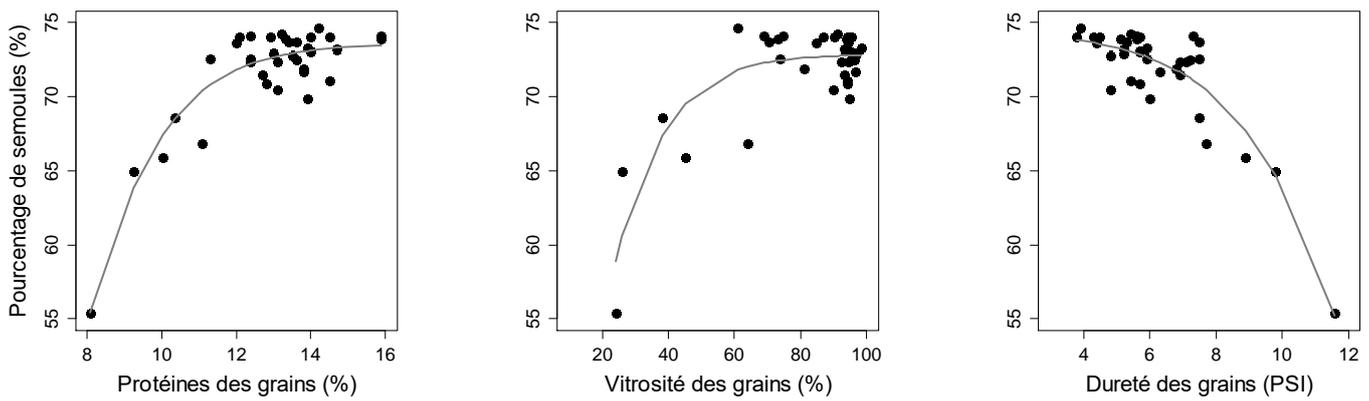


Figure 4 – Pourcentages de semoule obtenus à la mouture pour les 35 lots de grains en fonction de la teneur en protéines, de vitrosité et de la dureté des grains de blé dur

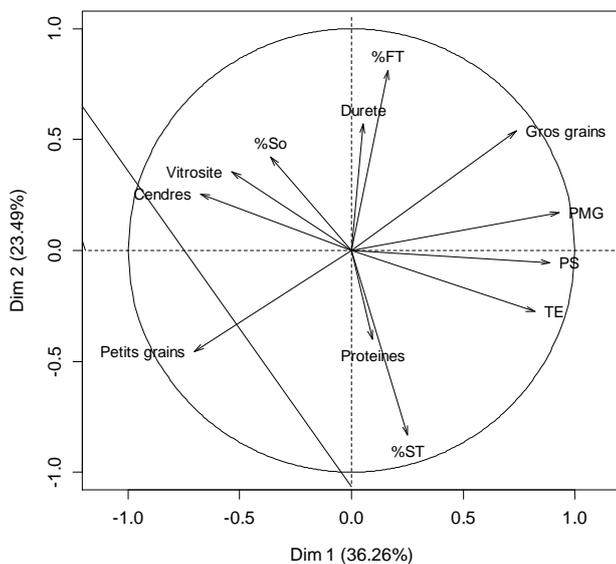


Figure 5 – ACP pour les 30 lots ayant produits au moins 70% de semoules (% ST)

Le taux d'extraction est très négativement influencé par la teneur en cendres initiale du grain ($r=-0,78$; $p<0,0001$). Le PS et le PMG sont positivement corrélés ($r=0,91$; $p<0,0001$) et le pourcentage de gros grains influence positivement le PMG ($r=0,79$; $p<0,0001$). Cela pourrait indiquer que la densité du grain est globalement constante quelle que soit sa taille. Les gros grains contiendraient proportionnellement plus d'albumen et donneraient ainsi plus de semoules « pures » (de relativement plus faible teneur en cendres). Cependant si **les indicateurs des tailles et poids des grains impactent toujours le taux d'extraction** pour les 30 lots considérés ($r=0,61$ et $r=0,62$ pour le PS et le PMG, $p<0,0001$), ils n'expliquent qu'environ un tiers de la variance.

Il faut noter que **les pourcentages de semoules, farines et sons ne sont pas déterminés significativement par les critères de taille des grains** des 30 lots de cette étude.

Comme attendu grâce aux résultats de la figure 4, dans la gamme de lots observée (tableau 4), aucune corrélation significative n'a été identifiée entre teneur en protéines, vitrosité, dureté des lots de grains et pourcentage de semoule.

La figure 6 illustre le regroupement des 30 lots par classification ascendante hiérarchique (CAH) selon les paramètres utilisés dans l'ACP. **L'effet itinéraire technique en interaction avec le pédo-climat de l'année apparaît prépondérant** en tant que critère de différenciation des lots. En effet, les lots sont regroupés selon l'année et le lieu de culture. Le groupe 1 est constitué du seul lot A1-S0-10 qui se démarque par la forte minéralisation de ses grains (2,3%) et ainsi avec un très faible taux d'extraction (25,6%). Le groupe 2 se compose de 13 lots récoltés la première année de culture, principalement en Sud-Est (10/13lots). Ces lots se distinguent par des faibles PS ($\mu=69,7\pm 2,9$ kg/hl/b.s.) et PMG ($\mu=34,6\pm 3,1$ g/b.s.) et leurs fortes proportions en petits grains ($6,7\pm 2,2\%$) mais présentent de bons pourcentages de semoule à la mouture ($\mu=73,3\pm 0,7$ %). Ces caractéristiques de la première année s'expliquent par de forts stress hydriques subis par les cultures en phase de remplissage des grains. Le groupe 3 représente 7 lots récoltés la deuxième année de l'étude et cultivés dans le Sud-Est. Ces lots, bien que moins vitreux ($\mu=76,3\pm 6,7\%$), ont donné les meilleurs pourcentages de semoules ($\mu=74,1\pm 0,3$ %). Enfin, le groupe 4 correspond à 9 lots, tous cultivés en Sud-Ouest, récoltés sur les deux années de récolte, et comportant plus de gros grains ($65,8\pm 8,7\%$) mais donnant des pourcentages en semoule moyens ($\mu=71,8\pm 0,8\%$).

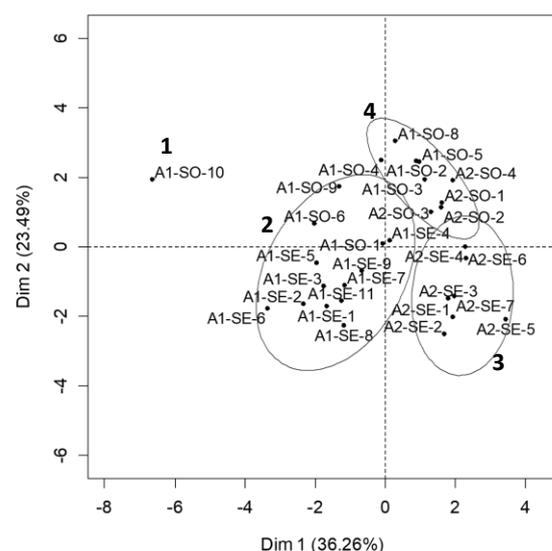


Figure 6 – Résultats de la CAH sur les 30 lots

Au vu de ces résultats, il apparaît nécessaire, pour étudier le comportement à la mouture des grains de dissocier les lots de blé dur au-delà d'un seuil de 11,3% de protéines, d'une vitrosité de 60% et d'une dureté inférieure à 8 (PSI). Pour ces échantillons, teneur en cendres, PS et PMG sont des indicateurs du taux d'extraction mais ne sont pas explicatifs des proportions de semoules, farines et sons obtenues. De plus, l'interaction entre l'itinéraire technique et le contexte pédoclimatique apparaît prépondérant sur les caractéristiques des grains pouvant influencer les résultats de mouture et *in fine* la transformation en pâtes alimentaires.

2.3. Influence de la variabilité des mélanges de semoule sur la qualité culinaire des pâtes

Pour 32 lots de l'échantillonnage, 4 semoules et 8 farines ont été assemblées pour chaque lot selon les pourcentages obtenus à la mouture, en écartant les 2 plus grosses semoules provenant du cœur de grain. Cela a permis de constituer des mélanges de semoules semblables aux semoules industrielles en termes de granulométrie et de teneur en cendres pour la majorité des lots. Les mélanges présentent une distribution granulométrique avec un diamètre médian (D50) proche de 250 μm ($\pm 18 \mu\text{m}$), une teneur en cendres moyenne de 1,2% ($\pm 0,1\%$) et une gamme de protéines allant de 8,2 à 15,8%. Le taux de protéines des mélanges de semoules est très significativement relié au taux de protéines initial des grains ($r=0,99$; $p<0,0001$). De plus, les grosses semoules cœur de grain, plus pauvres en protéines, ayant été écartées, les mélanges présentent dans cette étude des teneurs en protéines proches de celles des grains. Ces semoules ont ensuite été transformées en pâtes sèches.

La couleur des pâtes sèches a été évaluée pour les paramètres de clarté (L^*), indice de rouge (a^*) et indice de jaune (b^*). L^* variait entre 45 et 55; a^* entre -1,3 et 2,8 et b^* entre 26 et 34,8. Ces valeurs étaient cohérentes avec celles mesurées sur des pâtes du commerce ($L^*=53$, $a^*=0,8$, $b^*=33$).

La figure 7 montre les paramètres de couleur des pâtes en fonction de leur teneur en protéines. L'effet des protéines sur la clarté des pâtes n'apparaît pas clairement malgré une faible corrélation négative ($r=-0,44$, $p<0,05$). Plus les pâtes sont riches en protéines et plus l'indice de rouge a^* augmente ($r=0,59$, $p<0,001$). Cette relation est cohérente puisque l'indice de rouge des pâtes est associé aux réactions de Maillard (Feillet *et al.*, 2000) qui se produisent entre les acides aminés et les sucres réducteurs pendant le séchage. Aucun lien n'a été

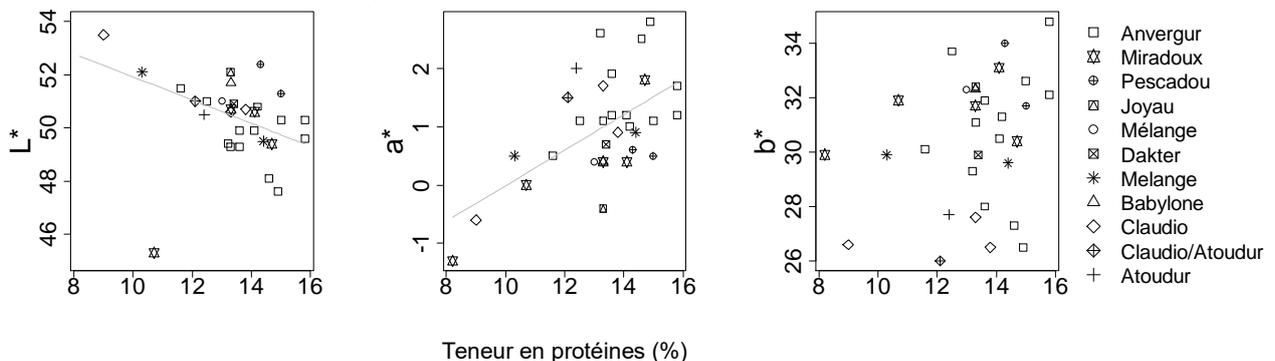


Figure 7 – Couleur des pâtes sèches

observé entre teneur en protéines et index de jaune b^* .

Aucun effet de la variété n'a été observé sur L^* ou a^* , alors que l'indice de jaune b^* était significativement plus bas pour les pâtes produites à partir de la variété Claudio. Les gammes de granulométrie et teneurs en cendres étant restreintes dans les semoules étudiées, l'effet de ces deux paramètres sur la couleur n'a pas été étudié.

Les pâtes ont été cuites et le temps de cuisson optimal (OCT) déterminé. Aucun effet de la teneur en protéines des mélanges de semoules n'a été observé sur le temps optimal de cuisson des pâtes.

L'indice de viscoélasticité (IV) des pâtes a été mesuré à OCT et à 2 x OCT. L'IV variait entre 2,5 et 18,6 à OCT et entre 1,3 et 13,6 à 2 x OCT. Ces mesures étaient en adéquation avec celles effectuées sur des pâtes du commerce ($IV_{1xOCT}= 10,7$, $IV_{2xOCT}= 4,0$). La figure 8 représente les résultats de mesure de viscoélasticité en fonction de la teneur en protéines des pâtes.

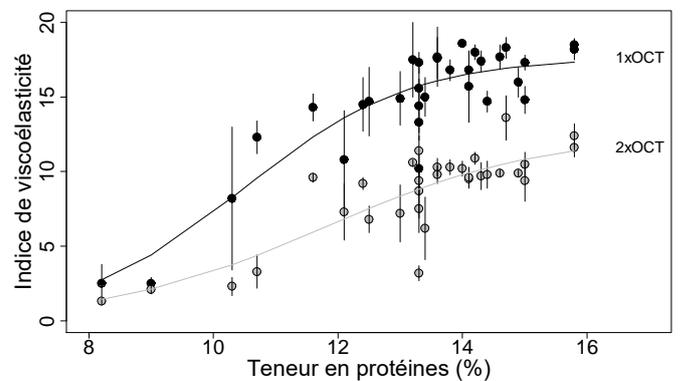


Figure 8 – Indice de viscoélasticité des pâtes en fonction de la teneur en protéines des semoules et du temps de cuisson

On observe que le taux de protéines a un impact positif sur l'indice de viscoélasticité des pâtes. Cependant, cet effet n'est pas linéaire et l'indice de viscoélasticité n'augmente plus de manière significative au-delà de 12% de protéines.

Le taux de protéines des semoules, et donc des grains de blé dur, n'apparaît donc pas dans cette étude comme un facteur déterminant de l'indice de viscoélasticité des pâtes à partir d'un seuil de 12% de protéines.

CONCLUSION

Au vu de cette étude, il apparaît nécessaire de dissocier les lots de blé dur au-delà d'un seuil de 11,3% de protéines, d'une vitrosité de 60% et de dureté inférieure à 8 (PSI) pour étudier le comportement à la mouture des grains. Dans cette gamme, teneur en cendres, PS et PMG sont des indicateurs du taux d'extraction mais ne sont pas reliés aux proportions de semoules, farines et sons obtenues.

D'autres critères de description semblent nécessaires, comme des mesures de morphologie ou de résistance mécanique des grains, pour mieux appréhender les mécanismes de séparabilité de l'albumen et des enveloppes lors de la mouture.

De plus, le taux de protéines des semoules n'apparaît pas dans cette étude comme un facteur déterminant de l'indice de viscoélasticité des pâtes alimentaires au-delà d'un seuil de 12% de protéines. Cependant, la détermination de la qualité des

pâtes cuites a besoin d'être enrichie par l'analyse sensorielle d'un panel d'experts. En effet, le seul critère de viscoélasticité ne suffit pas à décrire la valeur culinaire des pâtes et d'autres critères importants, tels que le collant et la délitescence à la cuisson, sont à prendre en compte.

D'un point de vue agronomique, ce travail montre qu'il est possible de produire des lots de qualité par des itinéraires techniques contrastés en termes de niveau de fertilisation azotée et d'IFT et donc plus ou moins durables. Pour cela, il est nécessaire de mobiliser différents leviers agronomiques pour concevoir des itinéraires techniques adaptés à chaque contexte pédo-climatique et à des objectifs spécifiques. Dès lors, ce n'est pas tant les itinéraires techniques qui ont été conçus qui importent mais bien la démarche de conception qui montre qu'il est possible de substituer une partie des intrants de synthèse tout en répondant aux impératifs de la transformation en semoules, puis en pâtes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abecassis, J. (1991). Qualité du blé dur, de la semoule et des pâtes alimentaires. *Ind. Céréale*. 72, 7–11.
- Abecassis, J., and Chaurand, P. (1997). Appréciation de la valeur d'utilisation du blé dur en semoulerie et pastification. In : *Guide Pratique D'analyses Dans Les Industries de Céréales*, 2e Éd, (Paris: Lavoisier), pp. 745–778.
- Dexter, J.E., and Matsuo, R.R. (1977). Influence of protein content on some durum wheat quality parameters. *Can. J. Plant Sci.* 57, 717–727.
- Dexter, J.E., Matsuo, R.R., and Martin, D.G. (1987). The relationship of durum wheat test weight to milling performance and spaghetti quality. *Cereal Food World Res.* 32, 772–777.
- Feillet (1979). Evaluation de la qualité culinaire intrinsèque des variétés de blés durs (*Triticum durum*) par examen des électrophorogrammes des gliadines et par mesure des propriétés viscoélastiques du gluten. (Rome), pp. 77–92.
- Hinton, J.J.. (1959). The distribution of ash in the wheat kernel. *Cereal Chem.* 19–31.
- Matsuo, R.R., and Dexter, J.E. (1980). Relationship between some durum wheat physical characteristics and semolina milling properties. *Can. J. Plant Sci.* 60, 49–53.
- Matveef, M. (1963). Le mitadinage des blés durs, son évaluation et son influence sur le rendement et la valeur des semoules. *Bull. Anc. Élèves Ecole Fr. Meun.* 198, 299–306.
- Novaro, P., D'Egidio, M.G., Mariani, B.M., and Nardi, S. (1993). Combined effect of protein content and high-temperature drying systems on pasta cooking quality. *Cereal Chem.* 70, 716–719.
- Raggiri, V., Abecassis, J., Mabile, F., Samson, M.-F., Barron, C., and Lullien-Pellerin, V. (2014). Compréhension et détermination des facteurs clés de la valeur semoulière. *Ind. Céréale*. 189, 11–21.
- Samaan, J., El-Khayat, G.H., Manthey, F.A., Fuller, M.P., and Brennan, C.S. (2006). Durum wheat quality: II. The relationship of kernel physicochemical composition to semolina quality and end product utilisation. *Int. J. Food Sci. Technol.* 41, 47–55.
- Samson, M.-F., Mabile, F., Chéret, R., Abécassis, J., and Morel, M.-H. (2005). Mechanical and Physicochemical Characterization of Vitreous and Mealy Durum Wheat Endosperm. *Cereal Chem.* 82, 81–87.
- Sicignano, A., Di Monaco, R., Masi, P., and Cavella, S. (2015). From raw material to dish: pasta quality step by step. *J. Sci. Food Agric.* 95, 2579–2587.
- de Stefanis, E., and Sgrulletta, D. (1990). Effects of high-temperature drying on technological properties of pasta. *J. Cereal Sci.* 12, 97–104.
- Taha, S.A., and Sági, F. (1987). Relationships between chemical composition of durum wheat semolina and macaroni quality. II. Ash, carotenoid pigments and oxidative enzymes. *Cereal Res. Commun.* 15, 123–129.
- Wasik, R.J. (1978). Relationship of Protein Composition of Durum Wheat with Pasta Quality and the Effects of Processing and Cooking on These Proteins. *Can. Inst. Food Sci. Technol. J.* 11, 129–133.
- R Development Core Team (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org>