



Les recherches à l'Inra sur les céréales et leurs utilisations

Inventaire multidisciplinaire
sur la période 2011 -2013

Inra, Groupe Filière Céréales



Mars 2014

Coordinateurs et rédacteurs : Gilles Charmet, Patricia Le Crenn-Brulon, Sylvie Bonny, Aude Barbottin, Michel Bertrand, Florence Forget, Claude Pope, Anthony Fardet, Valérie Lullien-Pellerin, Didier Marion, Fabrice Levert, Martine Georget avec la collaboration des autres membres du groupe filière Céréales.

Référence bibliographique : Gilles Charmet et al. *Les recherches à l'Inra sur les céréales et leurs utilisations. Inventaire multidisciplinaire sur la période 2011 – 2013*. Inra, Groupe filière céréales. 56 p. + 2 annexes 31 p. et 28 p. Mars 2014

Table des matières	pages
Introduction	5
1. Génétique et amélioration des céréales	7
2. Itinéraires techniques, systèmes de production et changement de pratiques des agriculteurs	13
3. Maladies et contaminants des céréales	18
4. Transformation, alimentation, nutrition et consommation	24
5. Focus sur la recherche internationale relative aux céréales en alimentation humaine	31
6. Environnement politique, économique et réglementaire	34
Conclusion	40
Références bibliographiques	

Ce document est complété par deux annexes :

Annexe 1 : Projets lauréats des appels à projets sur la période 2011- 2013 (Europe, ANR, Casdar, Onema, Pôle de compétitivité FUI, PSDR) impliquant l'Inra ; GIS, UMT et RMT concernant les céréales

Annexe 2 : Faits marquants « Filière Céréales », issus de la veille sectorielle Semences, Phytoprotection, Alimentation animale et Food Ingredient 2011-2012.

Cette note vise à présenter de façon synthétique les principales orientations et les points saillants des recherches conduites à l'Inra sur les céréales (ou les concernant dans des champs plus larges comme les systèmes de production ou l'alimentation) et leur contexte national et international. L'objectif est de contribuer à mieux situer l'Institut et ses activités dans le concert mondial et ainsi à identifier les forces et faiblesses de son dispositif. Cette première version se propose de faire un « point 0 » couvrant la période 2011-2013 et, si l'exercice se révèle pertinent, pourrait être mise à jour périodiquement.

Pour ce travail, les membres du groupe filières céréales ont exploité les sources d'information suivantes :

● **Pour l'activité de l'Inra :**

- La liste des publications des chercheurs en 2011-2013 et concernant les céréales,
- Les faits marquants 2011 et 2012 des départements et les innovations « céréales » issues de la « Lettre des Labos » de l'Inra,
- Les expertises, prospectives et études qui concernent les céréales

● **Pour les programmes de R-R&D à l'échelle internationale :**

- Les grandes thématiques qui ressortent au plan international à dire d'experts et sur la base de la connaissance de chacun des membres du groupe, ou de leur participation en 2012-2013 à des congrès internationaux.
- Des éléments sur les fonds dédiés à la recherche publique dans différents pays en 2011-2012, d'après la veille réalisée par la DPE.

● **Pour les programmes de recherches pluri-partenaires à l'échelle européenne**

- La liste des programmes céréales qui impliquent l'Inra

● **Pour les programmes de recherche et R&D pluri-partenaires financés au plan national**

- Les programmes ANR-investissement d'avenir
- Les programmes pôles de compétitivité
- Les programmes CASDAR (Innovation et partenariat, recherche finalisée et innovation, semences)
- Les activités des UMT, RMT et du GIS GC-HP2E

● **Pour les activités des entreprises semences, phyto, pharmacie, alimentation, nutrition**

- Les recherches et innovations des entreprises privées nationales et internationales/ éléments de stratégies (Veille semences, phytoprotection, alimentation animale, food ingredient de la DPE), liste complétée par la connaissance des membres du groupe filière à dire d'expert.

Introduction

Les évolutions récentes du marché mondial

Depuis la campagne 2007-2008, les marchés sont "habitués" à une grande volatilité des prix. Après un premier pic (jusqu'à 450\$/t) en janvier 2008 à l'origine des "émeutes de la faim" dans certains pays, les prix que l'on pensait durablement élevés ont rechuté en 2009, pour rebondir en 2010-2011 et surtout en 2011-2012. Pour la campagne 2011-2012, un fait remarquable est une conjonction d'événements climatiques extrêmes dans deux régions du monde : 1) fortes gelées sur semis d'hiver non protégés par la neige suivies de sécheresse en Ukraine et Russie, d'où une réduction de près de 40% la production de blé de ces deux pays et 2) une forte sécheresse liée à une canicule sur le centre des Etats-Unis, diminuant fortement la production de maïs. Si l'on ajoute à cela des baisses de production également en Australie et en Argentine, les Etats-Unis et la France ont assuré la plus grande partie du marché mondial du blé tendre. Pour le maïs, en France, le rendement moyen a pour la première fois dépassé le seuil symbolique de 10t/ha, tandis que celui du blé, bon également, ne retrouve toujours pas son record de 1998.

Pour la campagne 2012-2013, la situation est assez différente, la production ayant retrouvé des niveaux normaux, voire records, dans la plupart des pays producteurs, avec même le retour remarqué de l'Inde comme exportateur de blé. Ainsi plusieurs "barres" historiques sont franchies, celle des 900 Mt produites en Maïs (948 Mt, +85 Mt/2012) et 700 Mt en blé (706 Mt, +41 Mt). Toutefois, cette hausse de l'offre est aussi accompagnée d'une croissance de la demande, tant dans les principaux bassins importateurs (Afrique, Moyen-Orient) qu'en Asie, particulièrement en Chine (acheteuse de maïs et de blé US). De plus, la Russie et l'Ukraine devant reconstituer leurs stocks stratégiques ont des capacités limitées à l'export, ce qui permet aux cours du blé de se maintenir entre 180 et 200€/t, avec le retour d'un différentiel de 10 à 20€/t de plus que le maïs. De plus, la qualité est assez médiocre en Russie ainsi qu'en Chine. Dans ce contexte, l'UE affiche des chiffres élevés d'export en blé tendre (près de 23 Mt depuis août, au 1/04/2014) et la France tire bien son épingle du jeu avec de bons achats de ses clients traditionnels (Afrique du Nord et de l'ouest) mais aussi de l'Egypte et de l'Iran (source : www.terre-net.fr/marche-agricole/culture/marche-physique-ble-tendre/a1b1531).

Ces changements de conjoncture ont eu deux conséquences sur l'organisation de la recherche :

- Au niveau mondial, la flambée des prix en 2007-2008 a conduit le G20 agricole, sur proposition de la France, à réfléchir aux moyens à mobiliser pour augmenter et stabiliser l'offre en blé, en particulier par l'innovation agronomique et variétale (Action Plan On Food Price Volatility And Agriculture Meeting of G20 Agriculture Ministers Paris, 22-23/06/2011). Cela s'est traduit par la mise en place de la "Wheat initiative", lancée en septembre 2011 (125 participants de 24 pays). Cette initiative a pour objectif de procurer à la communauté mondiale, sans se substituer aux programmes nationaux et internationaux existants "an information resource for the Wheat Initiative and a forum for the international wheat research community". Elle a produit un "vision document" : http://www.wheatinitiative.org/sites/default/files/WheatInitiative_VisionDocument.pdf et établi des groupes d'experts par thématiques (séquençage, breeding méthodes, modélisation, etc.).
- Au niveau national, la campagne 2012-2013 a mis en évidence l'importance de la qualité des céréales pour pouvoir répondre aux appels d'offre des grands pays acheteurs. Or les blés français, s'ils sont bien adaptés à la panification française, sont souvent éloignés des standards notamment américains pour la teneur en protéines. Produire des blés plus riches en protéines est techniquement possible par la génétique et les pratiques agricoles, mais encore faut-il que ce soit rémunérateur pour le producteur. Aussi l'ensemble de la profession avec Arvalis-Institut du végétal a-t-il lancé un « plan d'action protéines » qui prévoit :
 - à court terme de communiquer sur les bonnes pratiques (notion d'itinéraire technique: variété, dose N, pilotage) et de développer le pilotage de la fertilisation azotée (Farmstar, NTester, etc.),
 - à moyen terme d'encourager la sélection de variétés productives et à bonne teneur en protéine (nouveaux critères d'inscription),
 - à long terme d'engager des projets de recherche sur les fondamentaux porteurs d'innovations (génétique, efficience des apports, systèmes de culture...).

Renforcement de la stratégie de communication de la filière céréalière française

Pour renforcer la compétitivité de la filière, principal enjeu des acteurs économiques qui la composent, la filière développe des actions de communications. Pour reprendre un slogan de l'association Intercéréales, il faut « ré-enchanter la consommation des céréales et des produits céréaliers » (Filières Céréales, actions de promotion 2014, Intercéréales).

Si l'on considère l'un des produits céréaliers phare des Français, le pain, il est intéressant de constater que la quasi-totalité de la population en consomme en France, même si son importance relative a diminué dans le budget alimentaire des ménages (Crise économique et comportements de consommation alimentaire des Français, Les cahiers de FranceAgriMer, 2011). Le pain n'est plus un aliment de base de l'alimentation mais un aliment d'accompagnement du repas ; il est perçu par les adultes comme un élément indispensable de la culture gastronomique (Observatoire du pain, Point sur la consommation de pain des Français, Credoc 2010).

La profession cherche à communiquer notamment auprès des jeunes sur l'intérêt nutritionnel et socioculturel de ce produit céréalier (Filières Céréales, actions de promotion 2014, Intercéréales). Les céréales sont présentées avant tout comme une source de sucres lents nécessaires au fonctionnement des cellules (muscles, cerveau en particulier) en évitant les effets néfastes (diabète) des sucres rapides.

Le ciblage des enfants et adolescents est jugé prioritaire par l'interprofession dans la mesure où ils consomment significativement moins de pain que leurs aînés (Point sur la consommation de pain des Français, Credoc 2010). D'une façon générale, les acteurs économiques de la filière cherchent, au travers d'une stratégie régionalisée de communication, à redonner confiance aux consommateurs dans les produits céréaliers et à promouvoir les contributions de la filière aux grands enjeux sociétaux (alimentation, économie, emplois, territoires, environnement, énergie, etc.).

1. Génétique et amélioration des céréales

Gilles Charmet

1.1. Evolution du dispositif Inra en génétique et amélioration des céréales

Depuis 2010 a été amorcée la migration des programmes sur la génétique des résistances de Rennes à Clermont (UMR1095 GDEC), suite à des départs à la retraite à Rennes. L'équipe "maladies des céréales" de Clermont (UMR GDEC) a ensuite été confortée par des recrutements et mobilités. Ce renforcement plutôt rapide illustre la volonté de l'institut (initiée par G Riba) de créer des pôles de recherche par espèce, Clermont ayant été choisi pour le blé tendre. Les recherches se poursuivent à Rennes (UMR IGEPP) sur les thématiques de polyploidie et sélection pour les systèmes économes en intrants. En revanche, à Estrées-Mons, depuis 2012 les activités de sélection ont été placées dans l'UE sous la responsabilité d'un ingénieur gérant l'ensemble des programmes d'innovation variétale (blé, pois).

Une autre thématique prioritaire concerne la méthodologie de la sélection, en particulier la sélection génomique utilisant une couverture dense du génome entier. L'UMR GV du Moulon, qui travaille sur des développements théoriques avec le maïs comme espèce d'application, a été renforcée. Mais pour le transfert et l'intégration des méthodes au programme d'innovation variétale blé tendre, un poste de CR « sélection génomique blé » ouvert au concours en 2011 et 2012, n'a pas été pourvu. Les démarches de sélection participative sont par ailleurs abordées, notamment dans le cas de l'agriculture biologique (UMR GV du Moulon, UE Diascope de Montpellier, UR Sad Paysage de Rennes).

1.2. Faits marquants et principales publications scientifiques des chercheurs Inra en 2011–2013

Entre 2011 et mi 2013, on peut répertorier 51 publications consacrées à la thématique génétique/génomique blé/maïs impliquant des chercheurs Inra dans la base Web of Knowledge (all databases). Ces publications peuvent être regroupées en 4 thèmes.

1. Génomique structurale et fonctionnelle

Le consortium international sur le séquençage du blé (IWGSC) a réalisé un séquençage faible profondeur de tous les chromosomes du blé (*sequence survey*). Il a choisi l'URGI de Versailles pour distribuer (téléchargement) ces séquences et fournir des outils d'analyse (ex : BLAST). Ces données et outils sont accessibles via le site web de l'URGI <http://urgi.versailles.inra.fr/Species/Wheat/Sequence-Repository>. Toute la communauté scientifique peut y avoir accès sous réserve de la signature d'un accord de consortium validé par l'IWGSC. Cela renforce la visibilité de l'INRA sur la génomique et la bioinformatique du blé au plan international (Fait marquant BAP 2012). Ces données, ainsi que celle sur le séquençage complet et l'annotation du chromosome 3B, font l'objet de 2 articles soumis fin 2013. Le consortium du projet FP7 TRITICEAGENOME a publié sa stratégie de construction de cartes physiques pour l'ensemble des chromosomes de l'orge et du blé tendre (Feuillet et al., 2012).

Les autres publications marquantes portent sur :

- Le développement de marqueurs moléculaires à partir des données de séquences, en particulier ceux basés sur le polymorphisme des insertions de rétro-transposons (Paux et al., 2012)
- L'expression des gènes chez les polyploïdes récents (blés synthétiques), qui est très majoritairement additive (Chelaifat et al., 2013)
- L'analyse protéomique de l'albumen, avec identification des protéines et assignation génétique de 1145 spots (Merlino et al., 2012).
- Le développement d'une puce de génotypage maïs haute densité de 33 417 SNP et son application à l'analyse d'association genomewide, dans le cadre d'une large collaboration internationale (Ganal et al., 2011)
- Le développement et la mise à disposition de la communauté du pipeline d'annotation TriAnnot (Leroy et al 2012). Ce pipeline a notamment été adopté comme standard par le consortium international de séquençage des Triticées (Fait marquant BAP 2012) (<http://urgi.versailles.inra.fr/Tools/TriAnnot-pipeline>)

2. Diversité et évolution

Cette thématique, qui bénéficie des avancées en génomique (développement de marqueurs à haute densité), est particulièrement travaillée dans les UMR AGAP (Montpellier) et GV (Versailles-Le Moulon). Les principaux résultats portent sur :

- La recherche de traces de sélection dans les patterns spatiaux de diversité et de déséquilibre de liaison, par exemple la sélection pour la précocité ayant accompagné la migration récente du maïs depuis ses centres d'origine américains (Bouchet et al., 2013)
- Ainsi que les patterns résultants dans les pools de lignées modernes de maïs. La connaissance des patrons de déséquilibre de liaison est particulièrement importante pour l'application des marqueurs moléculaires en analyse d'association genomewide et en prédiction (sélection) génomique (Truntzler et al., 2012)

3. Architecture génétique des caractères d'intérêt agronomique

Les recherches sur les bases génétiques des caractères d'intérêt agronomique sont principalement conduites dans les UMR GDEC (Clermont, blé tendre), AGAP (Montpellier, blé dur) et GV (Le Moulon, maïs). Les publications majeures ont porté sur des caractères très variés tels (a) la sensibilité au déficit hydrique du maïs (Welcker et al., 2011), (b) la résistance aux maladies du blé (Wei et al 2011), (c) la composition des protéines de réserve (et plus particulièrement la régulation de leur expression selon la nutrition de la plante) (Plessis et al., 2013), (d) la date de floraison du blé, caractère important pour l'adaptation aux itinéraires culturaux et l'évitement des stress thermiques durant le remplissage du grain (Rousset et al., 2011), (e) le développement racinaire et l'équilibre entre racines et parties aériennes, critères importants pour l'économie de l'eau et des éléments minéraux, particulièrement l'azote (Allard et al., 2013).

4. Les méthodes de sélection et la création variétale

Les recherches en méthodologie de la sélection sont principalement conduites à l'UMR-GV du Moulon, dans l'équipe de génétique quantitative, et depuis 2010 de façon plus appliquée au programme de sélection du blé tendre dans l'UMR GDEC de Clermont. L'accent a été mis sur une veille et un développement des méthodes de sélection génomique, basées sur la construction de prédicteurs de la valeur génétique par des marqueurs moléculaires couvrant densément le génome, sans détection préalable d'associations marqueurs-QTL. Parmi les travaux récents, on peut citer :

- Une analyse du progrès génétique en sélection du blé tendre, à partir des données des essais INRA et CTPS (essais officiels pour l'inscription des variétés au catalogue). Les résultats montrent que le progrès génétique s'est poursuivi de façon linéaire sur la période 1970-2010, avec une pente plus forte dans les essais non-traités, traduisant une efficacité de la sélection pour les résistances aux maladies fongiques (ou bien un "coût" de ces résistances en terme de rendement en conditions protégées par des fongicides) (Oury et al., 2012).
- La dissection génétique du caractère d'hétérosis chez le maïs, par l'analyse de 1253 combinaisons hybrides. Les résultats montrent l'existence de nombreux QTL avec des effets de superdominance pour le rendement, mais des effets principalement additifs pour la teneur en eau du grain. Toutefois, comme beaucoup de QTL sont situés près du centromère, dans des régions à faible taux de recombinaison, ces superdominances apparentes pourraient être dues à des QTL liés en répulsion (effets opposés) (Larièpe et al., 2012).
- En sélection génomique, une thèse a été consacrée à l'optimisation des populations de référence (ou d'entraînement). Le critère proposé (CDmean), qui tient compte des apparentements entre lignées, a été montré plus efficace qu'un tirage aléatoire (Rincet et al., 2012).
- Chez le blé, une première publication sur l'application de plusieurs méthodes de sélection génomique au programme réel d'innovation variétale Inra (240 lignées élite) a montré peu de différences entre méthodes, avec une précision comprise entre 0.3 et 0.5 pour le rendement en validation croisée, mais qui chute dès que les populations d'entraînement et de validation sont tirées d'années différentes (Storlie et Charmet 2013).

- Le projet DIGITAL – développement de marqueurs SNP issus d'ISBP pour le génotypage à haut débit chez le blé tendre a été lancé en 2011. DIGITAL est un projet partenarial regroupant six semenciers et un institut technique, financé par des partenaires privés et le DGAP. Il a conduit au développement de 20 000 marqueurs SNP. Les SNP sont désormais utilisés par les semenciers dans leurs programmes de sélection variétale (fait marquant BAP 2011).
- Enfin, le programme "Blé tendre à hautes performances économiques et environnementales" (contrat INRA-Agri-Obtentions 2011-2015) a débouché en 2011 par la première inscription au catalogue français (suite à une demande d'expérimentation spéciale par le GEVES) de deux variétés "adaptées aux conditions de l'agriculture biologique", Hendrix et Skerzzo. Suite à cette première, le ministère de l'agriculture a demandé au GEVES d'étudier le maintien de cette expérimentation spéciale pour encourager la sélection de blés adaptés à l'agriculture biologique, afin de répondre à l'attente des agriculteurs et aux engagements du Grenelle de l'environnement (groupe céréales, Fait marquant BAP 2011).

1.3 Grands projets démarrés entre 2011 et 2013

Acceptés dès 2011, les deux projets ANR-investissement d'avenir AMAIZING (maïs) et BREEDWHEAT (blé tendre), coordonnées par l'INRA (A Charcosset UMR320, C Feuillet UMR1095, remplacée en 2013 par J Le Gouis) ont un très fort effet structurant à long terme, à la fois en interne et sur le partenariat, car ils associent la recherche publique (INRA, instituts, université) aux instituts techniques (Arvalis-Institut du végétal) et à l'ensemble des établissements semenciers ayant un programme de sélection en France (Fait marquant BAP 2011).

Le projet Breedwheat a démarré officiellement le 1/09/2011 pour une durée de 9 ans. Coordonné par l'UMR GDEC de Clermont-Ferrand, il rassemble 26 partenaires dont 12 UMR INRA et 11 partenaires industriels de la recherche et sélection du blé. Le projet d'Investissement d'Avenir Amaizing a démarré officiellement le 1/10/2011 pour une durée de 8 ans. Coordonné par l'UMR Génétique Végétale du Moulon, il comprend 24 partenaires dont 13 UMR INRA et 7 partenaires industriels de la sélection du maïs, ainsi que deux sociétés de biotechnologies et deux instituts techniques. Breedwheat et Amaizing ont pour objectifs de soutenir la compétitivité des filières blé et maïs, tout en répondant au défi de produire en quantité et qualité suffisante des matières premières pour l'alimentation humaine et animale au sein d'un système durable (Fait marquant BAP 2011).

Toujours dans les grands projets ANR-investissements d'avenir, il convient de citer aussi :

- Phénome : un réseau français de phénotypage végétal haut débit, coordonné par F Tardieu (Montpellier) et lancé le 11/04/2013. Le projet Phénome a pour ambition d'équiper la communauté scientifique française d'une infrastructure capable de mesurer par des méthodes précises et à haut débit, des caractères agronomiques de plantes soumises à divers scénarios de climats et d'itinéraires techniques associés au changement global. Ce projet coordonné par l'Inra a obtenu un financement de 24 M€ des Investissements d'Avenir.
- Le projet GENIUS (Genome ENgineering Improvement for Useful plants of a Sustainable agriculture), coordonné par l'UMR "Reproduction et Développement des Plantes" (RDP, UMR INRA à l'ENS de Lyon), devrait fournir aux scientifiques et sélectionneurs français un savoir-faire de pointe, le matériel biologique et la propriété intellectuelle associés, et ouvrir la voie pour une génomique fonctionnelle à haut débit et une sélection végétale à la hauteur des défis à relever. Le matériel biologique produit sera soit porté directement sur le marché des semences, soit optimisé préalablement. L'information technique et le cadre éthique fourni aux citoyens et législateurs français pourraient à terme alléger la charge réglementaire pour les experts comme pour les demandeurs. Pour atteindre ces objectifs, le projet GENIUS associe 15 partenaires publics et privés (dont 10 unités du public) dans les domaines des sciences de la vie et sciences sociales, et 5 entreprises du secteur privé spécialisées dans la création variétale et les biotechnologies. Le projet, démarré le 1/09/2012 pour 7 ans et 4 mois, bénéficiera d'un investissement total de 21,3 10⁶ euros (dont 6 de subvention ANR).

Par ailleurs, l'Inra est présent dans 8 des 20 projets européens en cours en 2011-2013, dont plusieurs ITN (Initial Training Network) CropLife, BioNut, Epitrait. Il était plus particulièrement coordinateur des projets de recherche suivants :

- TRITICEAGENOME (2008-2012), <http://www.triticeaegenome.eu/> Coord C Feuillet, 17 partenaires de 9 pays participant. Ce projet est conçu pour réaliser des progrès significatifs dans la génomique des Triticeae (Blé et orge) et permettre le développement d'un panel de variétés améliorées pour l'agriculture européenne, grâce à :
 - la construction et l'ancrage de cartes physiques de certains chromosomes du blé et de l'orge des groupes 1 et 3 qui portent un grand nombre de caractères agronomiques importants (ex: résistance à des maladies, rendement et qualité);
 - l'isolement de 5 gènes impliqués dans la résistance aux maladies et de gènes clés pour l'amélioration du rendement;
 - l'identification et l'exploitation de nouveaux allèles pour ces gènes, appartenant à des populations actuelles, ancestrales ou mutantes;
 - le développement de nouvelles variétés pour répondre à la demande des agriculteurs et des consommateurs, en utilisant les techniques de marquage moléculaires;
 - le développement de nouveaux outils bioinformatiques capables de gérer et exploiter les grandes quantités de données générées par le projet.
- FP7-DROPS (2010-2015), coordonné par F. Tardieu. DROPS vise à développer de nouvelles méthodes et stratégies pour l'amélioration génétique du rendement en conditions sèches et pour une meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau dans la plante. Ce projet implique 15 partenaires publics et privés d'Europe, USA et Australie.

Il faut également signaler le projet FP7 Solibam (2010-2015) coordonné par l'Inra (V. Chable) qui vise à développer des stratégies combinant la sélection végétale (y compris participative) et l'innovation agronomique pour l'agriculture biologique et l'agriculture à faibles intrants. Certains travaux concernent le blé.

Parmi les autres projets importants pour l'Inra, on peut citer (a) le projet ANR CNV-Maize. Étude d'association sur génome entier entre variation structurale, variation des caractères d'intérêt agronomique et hétérosis chez le maïs; coordination UMRGV, 2011-2013; (b) le projet ANR NoStressWall : adaptation des gènes aux populations. Génétique et biologie de l'adaptation aux stress et aux perturbations (BIOADAPT) 2012-2015, coord UMR SADV Lille.

1.4. Analyse de la recherche internationale

Une interrogation du Web of Knowledge (all databases) à l'aide des mots clef (wheat or maize or Triticum or Zea) et (genetics or genomics or breeding or QTL) conduit à repérer 575 articles publiés depuis 2011. Ce nombre illustre le dynamisme de la communauté scientifique s'intéressant à cette problématique, conséquence directe des enjeux économiques liés à la production (la production mondiale de céréales a été inférieure à leur consommation en 2006, 2010 et 2012) et à la prise de conscience par la communauté internationale de la nécessité d'accroître les rendements et leur durabilité, notamment pour le blé, base de l'alimentation d'un tiers de l'humanité. Plutôt qu'une analyse exhaustive des publications qui se ventilent dans les mêmes thématiques que celles de l'Inra, nous préférons lister les principaux programmes nationaux et internationaux mis en place ces dernières années dans les grands pays producteurs (dont la France avec Amaizing et Breedwheat) pour répondre au défi agricole et alimentaire mondial.

- EU-FP7: TriticeaeGenome (Genomics for Triticeae Improvement, coord. INRA C Feuillet, UMR GDEC): 1/06/2008-31/05/2012. 14 European research institutes & 2 industrial partners, 9 countries. 5.3 millions Euros. Major contribution in constructing physical maps of barley and hexaploid wheat for accelerating gene isolation and setting up the foundation for future genome sequencing <http://www.triticeaegenome.eu>

- EU-FP7: ADAPTAWHEAT Start of project: 01/03/2012. Duration: 4 years. Coordination S Griffith, JIC, UK. L'INRA est impliqué dans le WP4: physiological phenotyping, avec notamment un apport en "gene-based modeling" (V Allard, UMR GDEC) <http://www.jic.ac.uk/ADAPTAWHEAT/about.htm>
- UK: LOLA-WISP WISP (financement BBSRC). The Wheat Improvement Strategic Program 2011-2017. It brings together experts from 5 UK institutions and private breeding companies. It will broaden the pool of genetic variation in UK wheat by different strategies. Based on 4 pillars (Landraces, Synthetics, Alien Introgression, Elite Wheats) and 2 themes (Phenotyping and Genotyping) <http://www.wheatisp.org>
- Italie (blé dur): AGER (Agroalimentare e Ricerca), <http://www.prosementi.com/fstp/> led by Società Produttori Sementi. Multidisciplinary approaches for a more sustainable and high quality durum wheat production.
- Allemagne: Announcement of a Wheat Research Programme from the German Federal Ministry for Food, Agriculture and Consumer Protection (BMELV). Main focus of the call for wheat research and breeding was on Utilization of heterosis in wheat, Resistance/tolerance against abiotic and biotic stresses, Efficient use of resources, Phenotyping, Exploitation of genetic diversity regarding sink/source capacity.
- USA: TriticeaCAP (TCAP). The T-CAP (Triticeae Coordinated Agricultural Project) merges communities of barley and wheat breeders. Researchers, breeders and educators across 21 states, from USDA and 55 universities compose the T-CAP consortium. Funding is #10 M\$/year. TCAP brings U.S. wheat and barley researchers together to address the challenge of identifying useful genetic variation and reducing breeding cycle time for these important cereal crops. The TCAP has developed nationally coordinated high-throughput phenotyping and genotyping platforms for wheat and barley, established a central database that integrates both types of data (T3), and is testing innovative marker-based breeding strategies to accelerate breeding cycles. <http://www.triticeacap.org/>
- Mexique MASAGRO: Seeds of Discovery. SeeD aims at Exploitation of Global Genetic Resources in wheat and maize to address Food Security, Climate change and Resource Limitation. Funding 35 M\$ sur 5 ans. SeeD aims to enhance the use of the CIMMYT germplasm collections by making exotic genetic variation more accessible for breeding and research programs to develop improved cultivars more speedily. The Seeds of Discovery (SeeD) project (<http://seedsofdiscovery.org>), one of several MasAgro projects supported by the Government of Mexico, will allow researchers to 'see into seeds' with the aim of diversifying the 'genetic portfolio' of wheat breeding programs. Genome-profiling approximately 120,000 accessions of CIMMYT's wheat genebank is underway using Genotyping-by-sequencing (GBS) technology. A major focus of SeeD focuses on breeding applications, with the linking of genetic data to phenotypic performance. Key performance assessments include heat and drought tolerance, grain yield potential, Phosphorus use efficiency, grain-quality characters, and resistance to various diseases. <http://seedsofdiscovery.org/seed/about/>

1.5. La recherche dans les entreprises françaises

Il est difficile d'avoir connaissance de la recherche dans les entreprises du secteur semence. Il est couramment admis que l'investissement en recherche et R&D est 2 à 3 fois plus important pour les espèces où les variétés commercialisées sont des hybrides (maïs) que pour les espèces où ce sont majoritairement des lignées pures. D'après les recrutements opérés par les firmes ces dernières années ou les contrats, il semble que les priorités soient dans l'ordre :

- Le développement et l'intégration des méthodes de sélection génomique. Ces développements sont largement réalisés en interne par les plus grands groupes (ou dans des projets collaboratifs sans l'Inra comme le projet OSEO « genomic breeding decision support »), tandis que les firmes moins importantes le font souvent via des projets collaboratifs, dont BREDWHEAT/AMAIZING, mais aussi via des projets soutenus par le FSOV pour le blé tendre. Les firmes ont beaucoup puisé ces dernières années dans le vivier des doctorants en génétique quantitative et biostatistique, certaines investissant aussi dans la formation (bourses CIFRE).

- Le développement des méthodes de phénotypage à haut débit. C'est le cas notamment d'Arvalis (coordination de l'ANR Phénoblé et forte implication dans Phénome), mais aussi de Limagrain (collaboration avec S Chapman, CSIRO, après une tentative avortée de chaire industrielle ANR).
- Le développement des blés hybrides. Faute d'investissement significatif de l'Inra, les grandes firmes réunies en consortium ont contracté notamment avec l'université d'Hohenheim (systèmes de stérilité mâle, production de semences, prédiction génomique de la valeur hybride).
- Le développement de traits OGM déjà "classiques" (ex résistance au glyphosate propriétaire par Genective, Joint venture entre Limagrain et KWS) ou bien nouveaux, notamment pour la tolérance à la sécheresse et l'efficacité de l'azote (projets OSEO ABBAH sur le blé et MOREA sur le maïs).

2. Itinéraires techniques, systèmes de production et changement de pratiques des agriculteurs

Aude Barbottin, Michel Bertrand

2.1. Evolution du dispositif Inra en agronomie

Les travaux présentés ici ont été effectués par les départements Environnement & Agronomie (E&A) et Sciences pour l'action et le Développement (SAD). Pour le département E&A, les investigations sur les itinéraires techniques, les systèmes de production et les changements de pratiques sont principalement portées par l'UMR Agronomie de Grignon, l'unité d'Agroécologie de Dijon et l'UMR Agir de Toulouse (unité SAD – E&A). Les travaux en agronomie du département SAD sont aujourd'hui principalement réalisés par cinq unités : l'unité Paysage à Rennes, l'UMR SAD-APT à Paris-Grignon, l'UMR Agir à Toulouse, UR ASTER de Mirecourt et l'UMR Innovation à Montpellier.

Les recherches mises en œuvre s'étendent généralement au-delà d'une seule culture ou espèce pour s'intéresser à l'ensemble du système de culture, du système de production ou de l'agroécosystème. Les céréales sont alors abordées soit directement, en s'intéressant à leur mode de conduite par exemple, soit comme un élément du système.

Les principaux travaux concernant les systèmes de production, les changements de pratiques ou les itinéraires techniques portent sur :

- les échelles d'analyse, que ce soit pour les effets des systèmes de culture ou pour les cycles des éléments (agronomie globale et bilan à des échelles régionale voire nationale) ;
- une meilleure articulation de l'agronomie avec l'écologie du paysage ;
- un développement de la conception innovante intégrant les besoins de flexibilité des systèmes et les contextes réels de travail des agriculteurs.

Afin de rendre compte des travaux réalisés sur les systèmes céréaliers, l'analyse bibliographique initiale a été complétée par une seconde analyse bibliographique¹.

2.2. Faits marquants et principales publications scientifiques des chercheurs Inra en 2011–2013

L'analyse des faits marquants et de la bibliographie fait apparaître les thématiques de recherche suivantes :

- Une réflexion sur les critères de sélection génétique

En liaison avec ce qui vient d'être présenté sur le phénotypage à haut débit dans la partie génétique, des travaux ont été conduits en agronomie pour identifier des critères de sélection à partir de simulations mobilisant des modèles architecturaux et des modèles écophysologiques. Un accent particulier a été mis sur les aspects d'interception lumineuse, de nutrition azotée et de résistance aux maladies (Bertheloot et al., 2012; Baccar et al., 2011). Des investigations s'intéressent également à la construction d'idéotypes de variétés adaptées à des cahiers de charges nouveaux, comme proposé par Jeuffroy et al. (2014). Une amélioration de la caractérisation de la réponse des variétés testées aux conditions des environnements rencontrés est également conduite dans les réseaux d'essais.

¹ (farm* OR cropping OR "farm management" OR "management strategy*" OR "cropping system" OR agroecosystem\$ OR agrosystem\$ OR "agro-ecosystem\$" OR "agro-system\$" OR "farming system" OR cropping OR farming) In **Title** – 27 articles pertinents retenus pour analyse contre 2 articles pour les équations de recherche initiales.

- L'évaluation et la conception de systèmes de culture

Ces travaux s'intéressent à l'effet des systèmes de culture et de leur organisation spatiale sur : l'expression du potentiel génétique (Dawson et al., 2013, 2012), la biodiversité (Legrand et al., 2011; Petit et al., 2013; Vasseur et al., 2013), les bioagresseurs (Gosme et al., 2012) et l'environnement (Belhouchette et al., 2011). Ils mobilisent des dispositifs de relevés *in situ* ou des modèles spatialement explicites. Par exemple, le modèle IPSIM (Aubertot et al., 2013; Robin et al., 2013) intègre qualitativement les effets des pratiques culturales et de l'environnement biotique et abiotique pour prédire ces profils de bioagresseurs.

Certaines approches proposent également une démarche de diagnostic agronomique entre systèmes de culture (Delmotte et al., 2011).

Une partie des travaux s'intéresse enfin à la conception/évaluation de systèmes de culture innovants. Citons par exemple :

- les mélanges d'espèces, en cultures associées ou en couverts associés. Les associations céréales – légumineuses permettent par exemple la réduction de l'usage des pesticides et des engrais azotés (Bedoussac et Justes, 2011; Pelzer et al., 2012). L'impact sur les adventices de l'insertion de légumineuses comme plantes de service semées sous couvert de blé a également été testé en culture de blé biologique (Amossé et al., 2013).
- les systèmes agroforestiers qui ont été analysés pour leur capacité à accroître la biodiversité dans le champ cultivé. L'analyse de ces systèmes a été faite tant sur des aspects de production de biomasse (Dufour et al., 2013) que de dynamique des bioagresseurs (Smits et al., 2012).

- La modélisation des systèmes et leur expression sur le territoire

Ces travaux s'attachent à modéliser les systèmes de culture (Akplogan et al., 2013; Dury et al., 2013, 2012; Schaller et al., 2012; Therond et al., 2011) ou les systèmes de production et/ou à représenter la mosaïque des cultures et des usages qui en résulte sur un territoire (Mailly et al., 2013; Marraccini et al., 2013; Mawois et al., 2012; Rizzo et al., 2013).

- L'implication des acteurs de terrain dans la conception/ évaluation des systèmes

Certaines recherches développent des approches participatives dans 1) l'élaboration de scénarios d'évolution des systèmes de culture (Hossard et al., 2013; Sausse et al., 2013) ; 2) la caractérisation des systèmes de culture (Clavel et al., 2011; Delmotte et al., 2013) et de leur effet sur les processus agro-écologiques (Berthet et al., 2012; Kelemen et al., 2013).

- Les approches globales

Il s'agit ici de développer des approches globales à des échelles parfois supranationale en combinant les sources de données (bibliographie, données expérimentales...). Ainsi les travaux de Lucie et Makowski (2013) se sont intéressés à la stagnation des rendements dans certaines zones de production. Une analyse de la variabilité spatiale de la progression des séries de rendement du blé a été conduite. Elle a permis de préciser les possibilités de progression de la production dans les différentes régions françaises et d'établir une cartographie des potentialités à l'échelle de la planète. En ce qui concerne les cycles des éléments minéraux, des bilans à l'échelle régionale ont été établis (Senthilkumar et al., 2012; Nesme et al., 2012) permettant de quantifier l'importance des choix de système de production sur le bouclage du cycle du phosphore.

2.3 Grands projets démarrés entre 2011 et 2013

De nombreux programmes s'intéressant aux systèmes de culture céréalières ont été démarrés entre 2011 et 2013. Ces programmes mobilisent des chercheurs des départements E&A et SAD (toutes disciplines confondues) ainsi que souvent des équipes de champs disciplinaires complémentaires (par exemple : épidémiologie, sciences sociales, sciences de gestion, économie, mathématiques...).

Parmi ces projets, peuvent être cités (non exhaustif) :

- Le projet européen PURE (coordination Inra). Les travaux développés dans le cadre de celui-ci avaient pour objectif de fournir des solutions de protection intégrée des cultures et une boîte à outils pour leur mise en œuvre dans des systèmes de production majeurs en Europe (cultures annuelles, légumes de plein champ,

cultures pérennes et cultures protégées) dans lesquels une réduction de l'usage des pesticides et un meilleur contrôle des bioagresseurs auront un impact notable. Le colloque de restitution du projet aura lieu en 2015 (<http://www.ior.poznan.pl/pure2015>)

Les projets ANR :

- Gester – ANR-11-AGRO-0003 (Gestion territoriale des résistances aux maladies en réponse aux nouvelles contraintes d'utilisation des pesticides en grande culture). Son objectif principal est de produire des scénarios de gestion durable des résistances aux maladies à l'échelle des paysages cultivés, qui permettront d'accompagner le changement des pratiques agricoles vers une moindre dépendance aux pesticides. Il s'agit notamment : i) d'acquérir des connaissances sur les stratégies des acteurs vis-à-vis des principales maladies du blé et du colza et sur les alternatives aux pesticides pour lutter contre ces maladies, et ii) d'identifier les stratégies de gestion des cultures mises en place par ces acteurs à l'échelle du territoire et leur efficacité agronomique. L'impact de l'allocation des cultures sur la gestion des résistances sera évalué à l'aide d'un modèle multicritère et multi-acteurs du choix d'Allocation des Systèmes de culture A la Parcelle (ASAP). Ce modèle mobilisera une approche participative autour d'une modélisation multicritère basée sur la méthodologie DEXi (Bohanec 2003, 2011). Partenaires : Arvalis, Cetiom, Inra MIAJ (Jouy) – IGEPP (Rennes) – Agronomie / Bioger / Eco-Innov / SADAPT (Grignon), Université Nancy II Lorraine,
- Wheatamix – ANR 13—AGRO- 0008 : Augmenter la diversité génétique au sein des parcelles de blé pour renforcer la multifonctionnalité et la durabilité de la production dans le Bassin Parisien. Ce projet a pour objectif d'évaluer l'intérêt des mélanges variétaux pour renforcer la multifonctionnalité et la résilience des systèmes de cultures céréalières face aux changements globaux. Partenaires : Inra GV (Le Moulon)/ Agronomie/ Bioemco /Bioger / SAD-APT /EGC (Grignon), GAEL (Grenoble), GADEC (Clermont-Ferrand), LEM (Lyon), CNRS – UMR CERSP, Chambres d'Agriculture (27, 36, 41, 45, 77),
- Breedwheat – ANR-10–BTR-03.: Ce projet vise à combiner de nouvelles technologies de génotypage et de phénotypage à haut débit pour identifier les facteurs génétiques impliqués dans les caractères d'intérêt agronomiques tels que le rendement, la qualité et la tolérance aux stress (insectes nuisibles, maladies, sécheresse...). Partenaires : Inra – BIA (Nantes) - EPGV (Evry)- CNRGV (Toulouse) - GV (Le Moulon) – BIOGER/ CPP/ EGC/ Agronomie (Grignon) – UMR Gaël (Grenoble) – UMR BPF (Villenave D'Ormon) – LIMOS UPB CNRS (Clermont-Ferrand) – EMMAH (Avignon), Arvalis, Geves, RAGT 2n, Florimond Desprez, Biogemma, Limagrain, Syngenta, Agri-Obtentions, Momont, Caussade, Bayer CropScience, Secobra Recherche SAS, Céréales Vallée.
- LEgitimes : ANR-13-AGRO-0004 : Construction et évaluation de scénarios territoriaux d'insertion de légumineuses dans les systèmes de culture pour répondre aux changements globaux. Le projet a pour but d'étudier et de construire, avec des acteurs directement concernés, les conditions d'une plus grande insertion des légumineuses dans les systèmes agricoles, et d'en évaluer les effets attendus, dans l'optique d'une gestion durable des territoires et des ressources. Ce travail combine des approches agronomiques, économiques et sociales (par des collaborations étroites entre disciplines) et concernera différentes échelles (la parcelle, l'exploitation agricole, le territoire, et les filières). Partenaires : UR LEVA/ESA, Inra-ASTER (Nancy) – Agir (Toulouse) – Agroécologie (Dijon), Agronomie (Grignon), Dijon Céréales, Isara-Lyon, Qualisol (Société Coopérative Agricole), Unip, Valorex.

A ces projets ANR s'ajoutent sept projets Casdar « Innovation et Partenariat » tels que : Ecoherbe (Inra- UMR Agroécologie de Dijon) ; Ecoressource (Inra UMR Agronomie-Grignon) ; Alliance (Inra-UMR Agronomie (Grignon) et Agir (Toulouse), Innovab (Inra UMR Agir-Toulouse et Agroécologie-Dijon) et trois projets Onema Pour et Sur le Plan Ecophyto : PEBiP (Inra Agir-Toulouse), Synoem (Inra Agronomie-Grignon) et SCEP Dephy qui s'intéresse aux systèmes de culture économes et performants du réseau Dephy. Il s'agit notamment de caractériser ces systèmes et de mobiliser les outils d'évaluation multicritère pour les en faire une appréciation (Inra UMR Agronomie- Grignon).

Deux projets PSDR (Pour et Sur le Développement Régional) impliquant les systèmes de culture céréalières se sont achevés en 2011, tous deux portés par l'UMR AGIR (Inra Toulouse) : PROUESSE et CITODAB.

Les chercheurs des départements SAD et E&A sont également impliqués dans des dispositifs pluri-partenaires (parfois antérieurs à 2011) autour de questions traitant des systèmes de cultures céréalières et de leur évolution. Quatre dispositifs principaux peuvent être identifiés :

- l'UMT Eau (Inra Agir-Toulouse) dont le renouvellement vient d'être accordé. Les travaux portés dans cette UMT s'intéressent à la gestion de la ressource en eau dans les agrosystèmes céréalières irrigués du sud de la France. Il s'agit notamment : 1) d'analyser et modéliser le fonctionnement du système « Unité de Gestion territoriale de l'eau agricole » et d'aider aux décisions des acteurs de cette gestion ; 2) d'analyser et modéliser le fonctionnement de l'exploitation agricole irrigante et d'aider aux décisions de l'irrigant : choix d'assolement et conduite de la sole irriguée ; 3) de concevoir des scénarios innovants au sein des exploitations agricoles et du territoire permettant d'atteindre un équilibre entre besoins et ressources en eau et de satisfaire les objectifs du développement durable (enjeux économiques, sociaux et environnementaux) et 4) de choisir et d'adapter des modèles biophysiques de culture, des modèles agro-hydrologiques et des bases de données nécessaires aux outils de simulation déployés aux différentes échelles.
- Le RMT Systèmes de culture innovants. Ce RMT vise d'une part à construire et développer des systèmes de cultures innovants et performants en matière de développement durable et d'autre part à développer un réseau de compétences associant agriculteurs, conseillers, enseignants et chercheurs, dans le domaine des cultures assolées des exploitations de grande culture et de polyculture élevage.
- Le RMT FLORAD-Gestion de la flore adventice. Ce RMT s'intéresse particulièrement à la gestion des adventices et la réduction de l'usage des herbicides en grande culture.
- Le GIS GCHP2E a pour objectif l'amélioration conjointe de l'ensemble des performances économiques, environnementales et sociales des systèmes de grandes cultures. Les priorités thématiques travaillées sont : 1) de contribuer à l'émergence d'innovations variétales pour des systèmes de culture diversifiés et durables ; 2) de mettre au point des stratégies de gestion des adventices et 3) de contribuer à l'amélioration conjointe des performances des systèmes de grande culture par l'évaluation et l'analyse multicritères de ces performances.

Notons enfin que les systèmes de culture céréalières sont aussi abordés dans le cadre du méta-Programme SMaCH et seront également au cœur des questions traitées dans le cadre du méta-Programme EcoServ.

2.4. Analyse de la recherche internationale

A l'international, les travaux développés s'intéressent aux leviers mobilisables dans les systèmes de culture pour répondre au double objectif de durabilité des systèmes et d'alimentation d'une population mondiale en croissance. Les investigations effectuées en agroécologie et sur les services écosystémiques visent ce double objectif.

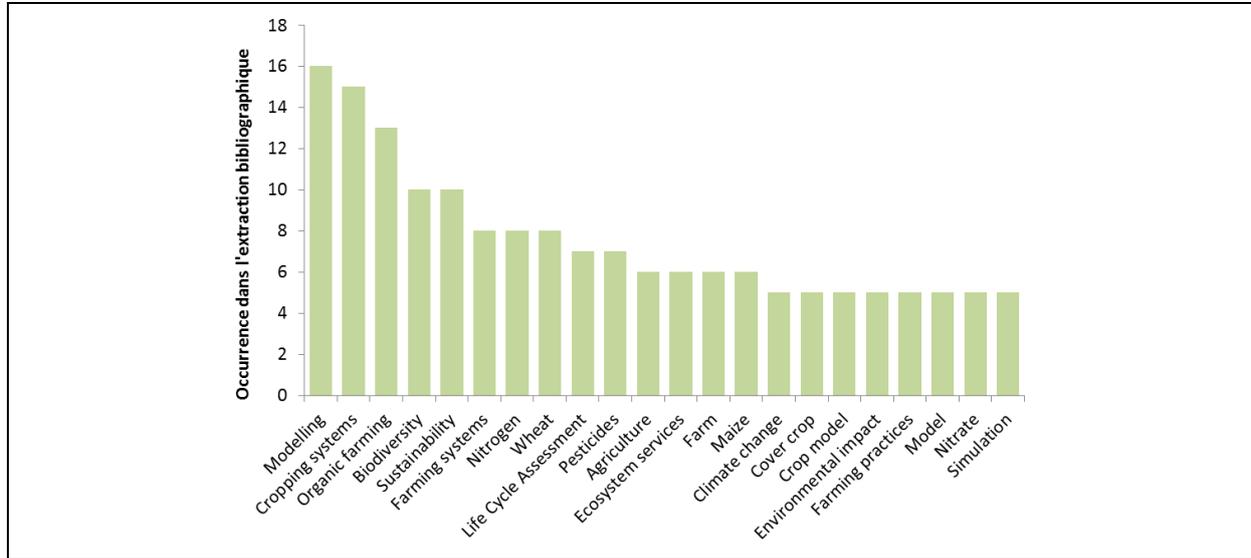
Ces travaux mobilisent des approches pluridisciplinaires en la matière. Ils s'intéressent notamment :

- A la conception et à l'évaluation multicritère des systèmes de production ainsi qu'à leur impact à des échelles supérieures au seul champ cultivé (culture, communes, régions, pays, monde).
- Aux conditions économiques et organisationnelles du développement de ces systèmes multi-performants.

Une interrogation du Web of Knowledge (all databases) à l'aide des mêmes mots clés utilisés précédemment conduit à repérer 361 articles publiés depuis 2011. Leurs mots clés ont été extraits et classés suivant leur fréquence. Les 22 mots clés les plus cités sont présentés dans la figure ci-dessous. Il apparaît que les approches mobilisant les modèles sont largement développées et que beaucoup de travaux s'intéressent à l'effet des

systèmes de culture ou de production sur les processus agroécologiques (biodiversité, cycle des éléments, environnement).

Figure 1. Mots clés les plus fréquents dans les articles internationaux du WoS concernant les itinéraires techniques, systèmes de production et changement de pratiques en agriculture.



3. Maladies et contaminants des céréales

Claude Pope, Florence Forget

3.1. Les maladies des céréales

3.1.1. Organisation des recherches conduites à l'Inra

En accord avec les objectifs du plan Ecophyto2018, du projet agro-écologie du Ministère en charge de l'agriculture et du contexte d'évolution des réglementations européennes visant à réduire l'utilisation des fongicides, les travaux relatifs à la filière céréales à paille concernent l'acquisition de connaissances en vue d'une gestion durable du risque sanitaire.

Les maladies des céréales sont étudiées à l'UMR BIOGER (Grignon) selon des approches pluridisciplinaires en phytopathologie (génomique, biologie moléculaire et biochimie, génétique des populations, évolution, épidémiologie, modélisation, diagnostic et taxonomie, méthodes de lutte). Les pathosystèmes étudiés impliquent des champignons responsables de maladies importantes des céréales à paille : rouilles (*Puccinia spp.* - blé), septoriose (*Mycosphaerella graminicola* - blé), fusariose (*Fusarium graminearum / culmorum* - blé)

L'UMR GDEC (Clermont-Ferrand) étudie les mécanismes physiologiques et moléculaires impliqués dans la sensibilité du blé tendre à la fusariose de l'épi et les bases génétiques et moléculaires de la résistance du blé tendre à la fusariose de l'épi et à la septoriose.

Selon une approche intégrative, la maîtrise des maladies des céréales est également étudiée à l'UMR IGEPP (sélection de variétés pour des systèmes économes en intrants) et dans plusieurs unités des départements E&A et SAD autour de la conception de systèmes de cultures innovants et économes en intrants (voir chapitre 2).

3.1.2. Principales publications scientifiques des chercheurs Inra en 2011–2013

Les rouilles du blé sont étudiées depuis longtemps et les publications relatent l'évolution de leur diversité et de leurs virulences en fonction des résistances variétales à l'échelle nationale ainsi que l'évolution à l'échelle mondiale en fonction du système de reproduction du parasite (Goyeau et al., 2011; 2012 ; de Vallavieille-Pope et al., 2012; Mboup et al., 2012; Bahri et al., 2011; 2012; Ali et al., 2011).. Les populations parasites sont étudiées aussi en fonction de l'espèce hôte, les populations de rouille brune issues du blé tendre se distinguent nettement de celles issues du blé dur (Goyeau et al., 2011). La postulation des gènes de résistance dans les variétés cultivées et la description de QTLs de résistance adulte liée à des sources de résistance durable ont été réalisées avec la collaboration de l'UMR IGEPP de Rennes (Paillard et al., 2012). Des QTLs de résistance du blé à la rouille brune affectant différentes étapes du cycle infectieux (infection, latence et sporulation) ont été cartographiés (Azzimonti et al., 2013). Les populations parasites sont analysées non seulement pour leurs virulences (aptitude à surmonter un gène de résistance spécifique) mais également pour leur agressivité vis-à-vis de résistance quantitative (Pariaud et al., 2012a; 2012b; van den Berg et al., 2012 ; Lannou, 2012). Les modes de gestion variétale en organisant la diversité des gènes de résistance à l'échelle de la parcelle (Gigot et al., 2013 ; Sapoukina et al., 2013), ont été élargis à une étude au niveau régional basée sur la modélisation et des données d'évolution de races du parasite sur différentes variétés (Papaïx et al., 2011; 2013). Une relation statistique (Papaïx et al., 2011) a été établie entre la composition variétale du paysage cultivé français (Goyeau & Lannou, 2011) et le niveau de résistance observé de ces variétés. La manière dont les variétés sont réparties sur un paysage agricole a une influence sur l'évolution de la population pathogène vers des "spécialistes" agressifs sur ces variétés ou vers le maintien de "généralistes". De plus, le niveau de fragmentation du paysage influe sur la sévérité globale des épidémies.

Depuis 5 ans environ, l'étude de la septoriose considérée comme la principale maladie foliaire du blé en Europe, a débuté par le génotypage et phénotypage de populations françaises, l'évaluation de la résistance des variétés et l'étude de mécanismes moléculaires impliqués dans l'infection. Dans une interaction sensible, un grand nombre de gènes sont surexprimés ou sous-exprimés au moment de l'apparition des premiers symptômes. En particulier, le blé surexprime des régulateurs négatifs des défenses suggérant que le champignon manipule la plante à son profit.

De même, l'étude des espèces responsables de la fusariose à l'origine de dégâts importants et du risque sanitaire lié aux mycotoxines a été conduite ces dernières années. Une étude épidémiologique a été menée à

Grignon et la compréhension du déterminisme moléculaire du processus infectieux est étudiée à Clermont Ferrand.

Concernant la lutte chimique, un nouveau phénomène de résistance aux fongicides a été mis en évidence chez l'agent de la septoriose du blé, MDR (multidrug resistance, un seul gène correspond à une résistance à plusieurs fongicides) ; il contribue à augmenter les facteurs de résistance des isolats concernés et accentue donc le risque de résistance en pratique qui devra être évalué.

3.1.2. Grands projets en cours à l'Inra

- ANR GESTER (2012 – 2016). Gestion territoriale des résistances aux maladies en réponse aux nouvelles contraintes d'utilisation des pesticides en grandes cultures.

Le projet (C. Lannou, département SPE) a pour objectif de produire des scénarios d'allocation des variétés résistantes à l'échelle des paysages cultivés. Telle qu'elle est utilisée actuellement, la résistance des variétés est peu durable face à l'évolution rapide des agents pathogènes. On montre par exemple que l'utilisation sur une grande portion du territoire d'une seule variété peut conduire au développement d'une population parasite particulièrement agressive. En associant une approche épidémiologique, qui consiste à analyser les populations parasites et modéliser leur développement sur un paysage variétal, et une approche en sciences sociales, qui consiste à analyser les contraintes organisationnelles des acteurs mais aussi leur perception des enjeux de protection des plantes, ce projet vise à produire des modalités de gestion des variétés résistantes acceptables par les filières et performantes aussi bien sur le plan biologique que sur le plan organisationnel.

- Dans le cadre du métaprogramme ACCAF

Le projet CLIFF (Laurent Huber, UMR EGC) intègre l'effet des changements climatiques sur les épidémies. Ce thème de l'effet des changements climatiques sur les risques épidémiques est par ailleurs repris dans un projet européen FACCE déposé récemment.

- Dans le cadre du métaprogramme SMaCH

-La simplification des paysages entraîne une plus grande vulnérabilité aux maladies et donc une utilisation accrue des pesticides. Dans ce cadre, David Blanchard (UMR BIOGER) réalise une thèse financée par le métaprogramme SMaCH et Arvalis pour étudier des solutions plus naturelles visant à réduire les épidémies. Ses recherches portent sur l'impact de la diversité variétale à l'échelle régionale sur une maladie du blé, afin de développer des stratégies de gestion des variétés résistantes.

Par ailleurs, deux programmes retenus à l'appel 2013 concernent notamment les maladies du blé :

- FONDU : Stratégies territoriales d'utilisation durable des antifongiques (concerne notamment la septoriose du blé)

- HISTOPEST : Recueil, mise en forme et mise à disposition de données historiques nationales sur les pressions biotiques en grande culture.

- Dans le cadre de l'appel à propositions de recherche « Pour et Sur le Plan Ecophyto 2018 » (PSPE) 2012

-Le projet PEBiP (Analyse stratégique des relations Pratiques (P) - Environnement (E) - Bioagresseurs (Bi) - Pertes de récoltes (P)) porté par l'Acta, l'Inra (UMR AGIR) et Arvalis. Il a pour but de proposer une démarche pour l'analyse des relations P-E-Bi-P basée essentiellement sur des données déjà collectées et organisées, notamment issues des dispositifs DEPHY et du dispositif de Surveillance Biologique du Territoire. Cette analyse doit permettre d'identifier les syndromes de santé végétale du blé en France et leurs relations avec les conditions climatiques et socio-économiques reflétées par les pratiques culturales.

3.1.3. Des projets conduits dans les pays européens

- Danemark.

Projet « Rustfight » relatif à l'étude des effecteurs de rouille et à la surveillance internationale des rouilles

- Royaume-Uni

Séquençage d'isolats de rouille jaune du blé, John Innes Centre, Norwich

Par ailleurs, le BGRI, Borlaug Global Rust Initiative, finançant des recherches dans les pays en voie de développement sur les résistances du blé aux rouilles, a contribué au un centre de détermination des races de rouilles au Danemark (AU) pour les pays en voie de développement.

Evolution des maladies fongiques au plan national et international

De nouvelles épidémies fongiques sont apparues :

- *Magnaporthe* sur blé en Amérique du sud. Cet agent pathogène était jusqu'alors inféodé au riz, responsable de la pyriculariose, il attaque le blé maintenant au Brésil, Bolivie, Uruguay et Argentine. Une étude est engagée aux Etats-Unis ainsi qu'au CIRAD CBGP à Montpellier.
- Une épidémie de rouille noire du blé, due au contournement d'un gène de résistance spécifique après 30 ans d'efficacité, s'est étendue de l'Afrique de l'est à l'Iran et au Yémen. En 2013, cette maladie a été observée dans plusieurs localités d'Allemagne, un projet européen Facec vient d'être déposé sur ce risque épidémique.

Des maladies réapparaissent en France suite à des changements de mode de culture :

Claviceps (agent de l'ergot), *Tilletia caries* (agent de la carie), ainsi que *Stagonospora nodorum* (septoriose)

3.2. Contaminants des céréales

3.2.1. Organisation de la recherche menée à l'Inra sur les mycotoxines inféodées aux céréales et autres contaminants

Depuis 2009, sous l'impulsion du département SPE s'est constitué un réseau de recherche intitulé Fusatox (<https://www6.inra.fr/fusatox>). Ce réseau regroupe l'ensemble des partenaires académiques Inra, CNRS, universitaires ainsi que les instituts techniques qui développent des activités de recherche sur la problématique mycotoxines des céréales et plus spécifiquement les mécanismes de genèse des contaminations. Six unités et cinq départements de recherche Inra sont impliqués : UR 1264 MycSA qui assure la coordination (MICA/SPE), UMR 1290 Bioger (SPE), UMR 1347 Agroécologie (SPE), UMR 1095 GDEC et UMR 1334 AGAP (GAP), UMR 1331 Toxalim (SA).

Fusatox est aussi partie prenante du RMT Quasaprove (Qualité sanitaire des productions végétales de grandes cultures), réseau mixte technologique qui s'intéresse aux contaminants des productions végétales : essentiellement mycotoxines ; éléments traces métalliques ; résidus de pesticides. En ce qui concerne les éléments traces métalliques, l'unité pilote est l'UMR 1220 TCEM. (<http://www.quasaprove.org/moodle>).

Plusieurs projets, soutenus par l'Anses et/ou l'ANR, concernant l'évaluation de l'exposition des consommateurs aux cocktails de pesticides et la caractérisation des dangers potentiellement induits par cette exposition ont été achevés durant la période 2011-2013. L'unité pilote sur cette thématique est l'UMR 1331 Toxalim.

3.2.2. Publications scientifiques des chercheurs Inra entre 2011 et 2013

• Mycotoxines/céréales

Entre 2011 et mi 2013, 18 publications consacrées à la thématique mycotoxines/céréales impliquant des chercheurs Inra sont répertoriées dans la banque de données Web of Knowledge (all databases). Ces publications peuvent être regroupées autour de 5 thèmes qui correspondent aussi aux domaines majeurs d'activité des acteurs du réseau Fusatox.

Thème 1 : Connaissance des espèces fongiques toxigènes et de leurs interactions

Plusieurs projets initiés en 2011 ont pour objectif majeur une caractérisation précise de la flore toxigène (ANR CESA DON&Co, FSOV Mycotek, Région Aquitaine Qualis, CASDAR Ecofusa) associée à l'étude de l'impact des événements d'interactions entre souche toxigène et non toxigène sur la contamination des grains. La

définition d'outils biomoléculaires de caractérisation et quantification des espèces fongiques a permis une description très précise, quantitative et exhaustive des équilibres d'espèces fusariennes présentes sur les blés et maïs français entre 2008 et 2011. Cette description peut être considérée comme la référence indispensable pour toute étude cherchant à analyser l'évolution de la flore toxigène des blés français que ce soit en conséquence de changement climatique ou de pratiques agricoles. Ces études ont aussi mis en évidence la fréquente contamination des récoltes par des espèces productrices de toxines décrites comme émergentes : enniatines, beauvéricin et moniliformin (Picat A. et al, 2012 ; Siou D. et al, 2013).

Thème 2 : Connaissance des mécanismes de biosynthèse des toxines

La définition de stratégies de maîtrise des niveaux de contamination des récoltes nécessite une meilleure compréhension des événements capables d'induire ou réprimer les voies de toxinogénèse. Les travaux récemment publiés soulèvent le fait que la régulation de ces voies métaboliques est très fortement connectée avec celle du métabolisme central (Merhej J. et al, 2011 ; Merhej J. et al, 2012).

Thème 3 : Comment la plante hôte peut-elle moduler le niveau de toxines accumulées dans les grains ?

Les connaissances sur les bases génétiques et moléculaires de la résistance du blé tendre à la fusariose ont fait l'objet de nombreuses publications, essentiellement par des équipes chinoises, américaines et plus récemment autrichiennes. En ce qui concerne les autres cultures céréalières, et en particulier blé dur et maïs, les avancées scientifiques sont beaucoup plus limitées. Un projet CTPS issu du GIE blé dur est en cours de démarrage : « Caractérisation d'une nouvelle source de résistance à la fusariose au sein de *Triticum turgidum* ssp. Développement d'outils d'aide à la sélection ». Plusieurs études menées au sein de l'UR 1264 MycSA se sont attachées à la mise en évidence de marqueurs biochimiques de la résistance à l'accumulation de mycotoxines chez le maïs. Les acides phénoliques et en particulier l'acide chlorogénique pourrait être un de ces marqueurs (Atanasova-Penichon V. et al., 2012 ; Hao C. et al., 2012 ; Picot A. et al., 2011 ; Picot A. et al, 2013)

Thème 4 : Recherche de solutions alternatives à l'emploi d'intrants chimiques

L'identification d'agents de biocontrôle ou de biomolécules efficaces permettant de limiter l'emploi des fongicides pour diminuer le risque fusariose et mycotoxines est explorée par les chercheurs. Plusieurs agents microbiens et molécules naturelles ont montré une efficacité très intéressante. Cette efficacité mise en évidence au laboratoire nécessite d'être validée par des études en conditions plein champ. L'étude de pratiques agronomiques (rotation, gestions des résidus) qui permettraient une réduction de la disponibilité de l'inoculum au niveau de la parcelle est aussi une voie privilégiée (ANR DON&Co, projet Casdar EcoFusa) (Broyde H. et al, 2013 ; Cardiet G. et al, 2012 ; Dalie D. et al, 2012 ; Leplat J. et al, 2013)

Thème 5 : Effets toxiques associées aux mycotoxines

Après avoir ciblé les toxines majeures (déoxynivalenol, fumonisines, zéaralénone), les études s'intéressent aux effets de ces mêmes toxines lorsqu'elles sont en mélange. Les conséquences d'une exposition aux mycotoxines dites minoritaires (formes acétylées du déoxynivalenol, nivalénol) ont fait l'objet de travaux récents. La recherche d'agents microbiens capables de métaboliser ou piéger les toxines dans des produits fermentés demeure une voie active de recherche (UMR Toxalim, UMR1213 URH) (Berthiller, F et al, 2013 ; Bracarense et al. 2012 ; Burel, C. et al, 2013 ; Cano, P. et al, 2013 ; Grenier, B. et al, 2012 ; Grenier, B. et al, 2013)

• Eléments traces/céréales

La contamination des récoltes céréalières par des éléments traces métalliques et en particulier par le cadmium fait l'objet de projets de recherche récemment initiés. L'identification de situations à risque en est un des enjeux. Gérer la problématique Cadmium dans les grains et en particulier ceux de blé dur (espèce très sensible à l'accumulation) pourrait résulter d'une gestion adaptée du tryptique pH du sol/ matière organique/génotype. Le programme Cadur, spécifique au blé dur et lancé en 2012 par l'Inra et Arvalis, s'inscrit dans cette approche. Plus large, le programme Casdar Multicontaminations vise à suivre les niveaux de contaminations liées aux ETM et aux mycotoxines dans les sols et les plantes à l'échelle du territoire (Cornu J-Y. et al, 2011 ; Redjala, T. et al, 2011 ; Schneider A. et al, 2011 ; Sivry Y. et al, 2011).

• Résidus de pesticides/céréales

Les résultats issus du projet PERICLES soutenu par l'ANR (CESA 2008) et coordonné par l'Anses ont été pour partie publiés (Crepet et al., 2013). Ces résultats concernent l'identification des mélanges de résidus de pesticides auquel est le plus fréquemment exposé le consommateur français. Une des conclusions majeures concerne aussi la difficulté de prédire la toxicité d'un cocktail de résidus de pesticides par la seule connaissance de la toxicité des résidus considérés individuellement.

Les projets EXPOMATPEST (ANR 2008-2010) et EPICEE (Anses 2010-2012) se sont intéressés aux modifications biologiques dans l'organisme que pouvaient induire l'exposition aux résidus de pesticides, individuels ou en mélanges. Le développement d'approches métabolomiques a permis de préciser les perturbations métaboliques induites par l'exposition à des résidus d'herbicide et insecticide utilisés dans les filières céréales (Demur et al., 2013 ; Canlet et al., 2013)

3.2.3. Analyse de la recherche internationale (mycotoxines/céréales) à dire d'expert

Une recherche dans Web of Knowledge (all databases) à l'aide des mots clés mycotoxines et céréales conduit à l'identification de plus de 900 études publiées depuis 2011. Ce nombre conséquent illustre le dynamisme de la communauté scientifique s'intéressant à cette problématique, conséquence directe des enjeux économiques et de santé publique liés. Près de la moitié de ces études concerne le résultat d'enquêtes d'occurrence (toxines, espèces fongiques) dans de nombreux pays et diverses productions céréalières (avec la mise en évidence de l'importance des mycotoxines décrites comme émergentes et mycotoxines masquées), l'optimisation de méthodes analytiques (méthodes rapides et multitoxines) ainsi que les conséquences toxicologiques d'une exposition aux mycotoxines.

Génétique et amélioration des plantes

Près de 200 articles publiés entre 2011 et 2013 concernent l'identification de sources de résistance à la fusariose chez le blé tendre et la recherche de leur déterminisme génétique (QTL/gènes). Plus de 100 QTL regroupés en 19 méga QTL indépendants ont été identifiés. Le rôle clef du QTL *Fhb1* et la recherche de gènes associés fait l'objet de nombreuses études (Kollers et al., 2012 ; Zhuang et al., 2013). En ce qui concerne les blé dur et maïs, les avancées scientifiques sont beaucoup moins abouties, la disponibilité de sources de résistance plus faible et le nombre de QTL identifiés reste limité (Li et al., 2011 ; Ruan et al., 2012). En complément de ces approches génétiques, plusieurs groupes internationaux s'intéressent aux mécanismes d'interactions *Fusarium*/plante hôte, à l'identification de facteurs de virulence chez les différentes espèces de *Fusarium*. Citons aussi les travaux nombreux de l'équipe de l'université de Vienne (BOKU) sur les mécanismes de métabolisation des toxines *in planta*.

Itinéraires techniques, systèmes de production et changement de pratiques des agriculteurs

L'utilisation raisonnée de l'emploi de fongicides (dose, période d'application) reste un sujet d'études tout comme la définition d'itinéraires techniques permettant de limiter le risque de contamination des récoltes. Ces dernières études soulignent l'impact prépondérant du schéma de rotation ainsi que de celui de la gestion des résidus et travail du sol. Si la recherche d'agents microbiens antagonistes des *Fusarium* est très active, l'efficacité des stratégies de biocontrôle n'a pas encore été démontrée en plein champ.

L'évaluation de l'impact de système de production en agriculture biologique sur les teneurs en mycotoxines a fait l'objet d'une dizaine de publications depuis deux ans (Juan et al., 2013 ; Rubert et al., 2013 ; Tangni et al., 2013). L'analyse de ces études ne permet pas de certifier qu'un mode de culture (conventionnel ou biologique) présente plus ou moins de risques qu'un autre en termes de contamination en mycotoxines. Les résultats contradictoires issus de ces travaux sont certainement liés à l'impact non négligeable que peuvent avoir les conditions environnementales et climatiques sur la contamination des céréales. La majorité des études précédentes est restée sur le plan descriptif et n'a pas cherché à identifier comment le mode de culture pouvait impacter l'équilibre de la flore fongique présente sur les épis et en conséquence moduler la production de mycotoxines par les espèces toxigènes.

Stockage, transformation, stratégies des acteurs des IAA

L'effet bénéfique des étapes de nettoyage et séchage des grains sur les teneurs en toxines des grains récoltés est confirmé par plusieurs travaux. L'impact/le devenir des toxines sur/au cours des processus de transformation (fractionnement, cuisson dont cuisson extrusion, fabrication du pain et de la bière) sont le sujet d'une quinzaine d'articles. Le point le plus actif est cependant l'identification de microorganismes capables d'adsorber ou métaboliser les toxines avec pour exemple les travaux d'une équipe hongroise sur la métabolisation de la Zéaralénone (Kriszt et al., 2012).

Environnement politique, économique et réglementaire

Le panel de l'EFSA sur les contaminants de la chaîne alimentaire a publié plusieurs opinions concernant les mycotoxines des céréales et en particulier la nivalénol, les trichothécènes de type A (T₂ et HT₂), la zéaralénone, les alcaloïdes d'ergot, les toxines d'*Alternaria*.

Scientific Opinion on the risks for public health related to the presence of zearalenone in food. EFSA Journal 2011;9(6):2197

Scientific Opinion on the risks for animal and public health related to the presence of Alternaria toxins in feed and food. EFSA Journal 2011;9(10):2407.

Scientific Opinion on the risks for animal and public health related to the presence of T-2 and HT-2 toxin in food and feed. EFSA Journal 2011;9 (12):2481

Scientific Opinion on Ergot alkaloids in food and feed. EFSA Journal 2012;10(7):2798

Scientific Opinion on risks for animal and public health related to the presence of nivalenol in food and feed. EFSA Journal 2013;11(6):3262.

Impact du changement climatique

Le projet EMTOX (FP7) a pour objectif d'évaluer l'effet de changements climatiques sur la présence de mycotoxines dans les récoltes céréalières d'Europe du Nord en 2040. Basés sur les modèles d'évolutions climatiques (2010-2050), des modèles ont été construits pour estimer les modifications induites sur la phénologie du blé et prédire le risque déoxynivalenol. Les prédictions indiquent une fréquence et des concentrations plus élevées en déoxynivalenol pour le blé de printemps (Van der Fels-Klerx et al., 2012).

4. Transformation, nutrition, consommation

Anthony Fardet, Valérie Lullien-Pellerin, Didier Marion

4.1. Le dispositif de recherche à l'Inra

Les travaux de recherche sur le potentiel santé des produits céréaliers ont quasiment été abandonnés par le département AlimH suite à ses nouvelles orientations axées notamment sur les grandes fonctions physiologiques et non plus sur les aliments et/ou les macro- et micronutriments.

Le potentiel santé des produits céréaliers est maintenant étudié au sein du département CEPIA :

1°) l'UR Biopolymères, Interactions Assemblages (BIA-Inra Nantes) travaille sur le pain et les céréales du petit-déjeuner ainsi que sur la caractérisation des allergènes du blé (BIA-InraNantes) ;

2°) l'UMR Ingénierie des Agropolymères et Technologies Emergentes (IATE-Inra Montpellier) sur les pâtes alimentaires et les fractions de mouture ;

3°) et l'UMR Ingénierie, Procédés, Aliments (GENIAL- AgroParisTech, Paris-Massy) sur les biscuits.

Au sein du département BAP, l'unité GDEC (Inra Crouël) travaille à la caractérisation des profils métabolomiques des grains, farines, pâtes, et pains de différents génotypes de blés cultivés en modes biologique et conventionnel, à la recherche de l'allèle perdu du gène Nam-B1 (pour les teneurs en protéines et fer du grain) pour améliorer la qualité nutritionnelle du blé tendre ainsi que sur l'allergénicité et l'intolérance associées au gluten des blés.

Les recherches du département CEPIA ont été particulièrement tournées vers la mastication des céréales de petit déjeuner, la transformation du blé dur en farines utilisables en panification et la diminution de l'impact énergétique des procédés de transformation des céréales (cuisson du pain, maltage de l'orge). Dans un objectif de durabilité dans les filières, des investigations sont également réalisées sur la valorisation des co-produits céréaliers (pailles de céréales notamment). Le département CEPIA mène également des recherches en amont sur la structure des grains de céréales et l'assemblage de leurs constituants macromoléculaires (polysaccharides pariétaux, amidon, protéines) dans l'objectif d'optimiser la transformation des céréales et la biodisponibilité de leurs nutriments. Dans ce contexte, des outils de caractérisation moyen débit sont développés pour phénotyper et chémotyper la structure et la composition des grains.

Les recherches dans le domaine non alimentaire liées à la filière céréales à paille visent principalement à comprendre et utiliser les mécanismes de déconstruction bio-technologique des ressources de type ligno-cellulosique et amylicées pour des objectifs de production de fibres, de molécules et de matériaux agro-sourcés, ainsi que de production d'énergie. Plusieurs unités du département CEPIA sont investies dans ces recherches avec des spécificités propres, principalement :

- l'UR BIA à Nantes sur l'analyse histologique et biochimique des assemblages lignocellulosiques ; l'UR BIA est également impliquée sur la valorisation sous forme de matériaux (matériaux à mémoire de forme) ou de synthons (dérivés de sucres simples ou de maltodextrines) pour la chimie des amidons de céréales. Ces travaux sont réalisés en lien avec l'institut d'excellence IFMAS (Institut français des matériaux agro-sourcés) et en collaboration avec l'UMR ISBP pour les approches enzymatiques
- l'UMR IATE sur le fractionnement par voie sèche des pailles et sons des grains pour fournir des fractions fonctionnelles, par successions d'opérations unitaires de prétraitements (mécaniques, enzymatiques et chimiques), broyage et tri des particules, mais aussi l'utilisation de l'énergie explosive de poudres issues de céréales ou autres (création en cours d'une start-up) et la mise en forme de matériaux à base de gluten, notamment pour la réalisation d'emballages fonctionnels ;
- l'UMR FARE à Reims sur la dégradation chimio-enzymatique des ressources ligno-cellulosiques ;
- l'UMR BCF à Marseille sur la sélection et l'usage de champignons filamenteux et enzymes pour la dégradation de la ligno-cellulose ;
- l'UMR ISBP de Toulouse sur les enzymes et les consortia microbiens permettant de transformer la matière ligno-cellulosique en lien avec TWB (Toulouse White Biotechnology). A ce réseau d'unités, il faut ajouter le LBE de Narbonne (département E&A) qui apporte ces compétences dans ces travaux notamment sur les procédés de méthanisation.

La majorité de ces recherches sont financées par l'ANR, via l'institut Carnot 3Bcar (Bioénergies, Biomatériaux, Biomolécules du carbone renouvelable).

4.2. Faits marquants et principales publications scientifiques des chercheurs Inra en 2011–2013

4.2.1 Transformation des céréales

Qualité technologique des blés

- La dureté du grain impacte la valeur meunière du blé tendre, mais aussi sa valeur d'usage en boulangerie ou biscuiterie. L'utilisation de lignées isogéniques se différenciant par le caractère de dureté – du fait d'une délétion du gène codant pour la puroindoline-a – a montré que les puroindolines suivent le même routage intracellulaire que les protéines de réserve du blé (prolamines) (Lesage et al., 2011, 2012). Une comparaison *in silico* de la structure des puroindolines permet de les rapprocher des protéines de type 2S. Il a été suggéré que les puroindolines jouent un rôle dans l'agrégation des polymères de la matrice protéique, et donc la texture des grains, puisqu'il a été observé que les tailles des polymères de protéines de réserve sont plus élevées en absence d'une des puroindolines. L'analyse des Grain Softness Protein (GSP1) révèle que ces protéines de structure très proche des puroindolines n'interagissent pas avec les lipides (Elmorjani et al., 2013). Par ailleurs, il a été montré en utilisant des blés quasi-isogéniques différant seulement par la forme allélique d'une des puroindolines (PinB) impliquées dans la dureté des blés que les blés porteurs de l'allèle de type d présentent une dureté et vitrosité plus faible en comparaison de ceux porteurs de l'allèle de type b. Les facteurs génétiques et environnementaux ont été impliqués dans les propriétés de texture du blé, paramètre critique de leur comportement en mouture. Les mesures de type SKCS (single kernel characterisation system) ont été reliées à la mesure de la vitrosité qui varie en fonction des conditions environnementales et qui est un paramètre important à prendre en compte pour la caractérisation du comportement des grains (Lasme et al., 2012).

- Une méthode utilisant la Microscopie à Force Atomique a été développée pour accéder aux propriétés mécaniques directement à l'échelle des constituants de l'albumen du grain qui joue un rôle important sur son comportement au broyage. Il a été montré que la résistance mécanique de l'amidon était plus importante que celle du gluten respectivement proche de polymères tels que la calcite et le talc. Cette méthode est utilisée aujourd'hui pour explorer les propriétés locales des polymères *in situ* au sein de la matière végétale et doit permettre d'affiner les modèles de prédiction du comportement à la rupture des grains (Chichti et al., 2013).

- Le projet QualitNblé (2008-2011) du Pôle de Compétitivité Céréales Vallée a développé de nouveaux outils pour prédire la quantité de protéines d'intérêt technologique du blé. Ces outils, rapides et fiables, sont utilisables directement par les sélectionneurs semenciers en vue de développer des variétés de blé dont la nature et la qualité des protéines sont adaptées aux applications de transformation en aval. Les partenaires se sont intéressés aux deux principaux facteurs déterminant la synthèse de protéines dans le blé : le patrimoine génétique des blés et les conditions de culture (UMR BIA Nantes, EGC Clermont-Ferrand).

- Le projet FSOV Tenacité-Extensibilité conduit avec l'ensemble des sélectionneurs en France a permis de préciser l'incidence des sous unités gluténines HPM et FPM, de la dureté de l'albumen ainsi que des caractéristiques des polymères des gluténines sur les variations du rapport tenacité/extensibilité des blés. Le volume du pain a été relativement bien approché par la mesure du comportement rhéologique de la pâte donnée par le Mixolab® (Branlard et al., 2013a). L'effet d'un choc thermique court au cours de la phase d'accumulation des réserves du grain a été étudié par une approche protéomique révélant une faible incidence sur le rapport entre protéines de réserve de type gliadines et gluténines (Majoul-Haddad et al., 2013). L'incidence de la température semble influencer clairement sur la masse nettement plus élevée des polymères protéiques (Tasleem-Tahir et al., 2012, Branlard et al., 2013b).

- Enfin, le projet européen AGTEC-Org (agronomical and technological methods to improve organic wheat quality (2009 – 2011), coordonné par l'Isara Lyon a permis d'identifier les leviers agronomiques et technologiques permettant d'améliorer conjointement la productivité et la qualité des blés et des farines biologiques. Il a réuni agronomes, technologues et économistes de 9 centres de recherche et universités européennes. Les UMR IATE (Montpellier) et Agronomie (Grignon) ont participé à ce projet.

Valorisation non alimentaire

- Le projet européen BIOCORE (2007-2013) a été coordonné par le département CEPIA. Il visait à concevoir et à analyser la faisabilité industrielle d'une bioraffinerie permettant de convertir différents résidus agricoles et forestiers (notamment les pailles de blé et de riz) en biocarburants de 2^{ème} génération, en molécules chimiques et en polymères plastiques biodégradables. L'INRA-CEPIA a été impliqué dans la caractérisation structurale de ces matières premières et la recherche d'enzymes permettant de déstructurer ces matières premières.

- Un des programmes prioritaires du département CEPIA est tourné sur la Bioraffinerie des Ligno-celluloses (<http://www.cepia.inra.fr/Le-departement-Les-recherches/Bioraffinerie-des-lignocelluloses>). Son ambition est de développer l'usage des ressources renouvelables en substitution des ressources fossiles pour obtenir non seulement des biocarburants, mais aussi des matériaux et des molécules pour la chimie à partir des connaissances combinées de la biomasse et de ses procédés de transformation sans pour autant accroître la pression sur les terres cultivables. Des modèles de parois végétales sont en cours de constitution pour mieux identifier les facteurs qui limitent la diffusion des enzymes utilisées pour déstructurer la biomasse lignocellulosique issues des industries de transformation des céréales. La déstructuration est actuellement un des verrous technologiques important pour la valorisation de ces biomasses céréalières (Paës et Chabbert, 2012).

- Le projet FSOV blé-éthanol a permis de définir un protocole de laboratoire pour mesurer le glucose obtenu par hydrolyse et le potentiel d'éthanol par fermentation (Gadonna-Widehem et al., 2012). Il a ainsi permis de comparer les blés actuels et un blé waxy quant à leur potentialité génétique et environnementale à répondre à cet objectif.

Réduction des coûts énergétiques

- Le maltage de l'orge brassicole fait intervenir trois étapes : le trempage pour augmenter l'humidité des grains aux environs de 42-45 %, la germination pour effectuer une digestion enzymatique des réserves du grain, et le touraillage pour sécher le malt, étape très gourmande en énergie (750-1000 kWh/tonne pour une production annuelle de malt en France de l'ordre de 1,4 MT). Les travaux de l'INRA ont montrés que le diagramme de trempage pouvait être modifié de façon à obtenir des orges contenant seulement 38 % d'eau sans abaisser la qualité du malt (Runavot et al., 2011). L'étape de germination est par contre prolongée à 24h, en partie compensée par la réduction du temps de trempage. Il a également été montré que la diffusion de l'eau dans les grains n'est pas le facteur limitant pour le maltage, mais bien le niveau d'activité des enzymes de germination. Enfin, la diffusion de l'eau est limitée par les enveloppes du grain, ainsi que par la texture de l'albumen (Mayolle et al., 2012 ; Runavot et al., 2011).

- Concernant la fabrication du pain, la cuisson constitue le poste le plus énergivore. Le projet BRAISE (2009 – 2012) a eu pour objectif de développer un nouveau prototype industriel de four, utilisant une source multi-énergie telles que micro-ondes, infrarouges, jets impactants et électro-convection (Li et al., 2012). Cette dernière source représente une technologie particulièrement innovante car elle permet des échanges convectifs grâce à un vent ionique créé par un champ électrostatique intense. Le projet a également permis de mieux comprendre les liens qui existent entre cinétiques de cuisson et évolution des propriétés physico-chimiques et qualitatives du pain.

4.2.2 Nutrition et potentiel santé

Phénotypage de la variabilité naturelle en amylose du grain de blé

La consommation d'aliments céréaliers à faible index glycémique, riche en fibres et en micro-nutriments est recommandée. Le projet ANR Nomac (2009-2012) visait à déterminer le rôle de l'amylose sur l'index glycémique du blé. L'Inra a développé dans ce cadre une nouvelle méthode d'analyse des grains de blé, basée sur de l'imagerie multispectrale et intégrée dans un automate de phénotypage de grains de blé à haut débit ; celui-ci sera utilisé dans le cadre du projet « Phénome ». Dans le cadre du projet ANR Nomac la Core Collection de Clermont-Ferrand a été explorée afin d'identifier des variétés de blé à forte teneur en amylose mais la variabilité naturelle s'avère assez faible.

Influence des facteurs génétiques et agronomiques sur la densité en micronutriments

La teneur des composés céréaliers est déterminée par des facteurs génétiques (arabinoxylanes, tocols et triénols, stérols et alkylrésorcinols...), environnementaux (zinc et sélénium...) ou par une interaction des deux paramètres (fer...) (Charmet et al., 2012 ; Shewry et al., 2011a, 2011b, 2012). Il devrait donc être possible de développer de nouvelles lignées de blé avec des teneurs plus élevées en composés bioactifs combinées à des rendements élevés, de bonnes performances agronomiques, et une bonne qualité lors des procédés technologiques. Bien que peu étudiés jusqu'à récemment, la bétaine et la choline sont également 2 composés aux propriétés nutritionnelles intéressantes et présents en quantité significative dans les céréales complètes. Leurs teneurs semblent dépendre - selon des proportions différentes - à la fois de facteurs génétiques et environnementaux (Corol et al., 2012).

Technologie et potentiel santé

- Afin d'utiliser pleinement la valeur santé des grains (Saulnier et al., 2012), de nouveaux procédés sont étudiés permettant de conserver l'intérêt de la voie sèche en enrichissant les produits en constituants d'intérêt (Delcour et al., 2012). La couche à aleurone du blé concentre un grand nombre de micro-nutriments et possède un pouvoir antioxydant élevé ; elle a été étudiée au travers du projet HealthGrain. Son isolement, sa dissociation en fractions d'intérêt associée ou non à des pré-traitements pour augmenter la biodisponibilité de ses composés (broyage ultra-fin, pré-hydrolyse et/ou pré-fermentation...) permettent l'enrichissement des produits céréaliers en composés d'intérêt (Brouns et al., 2012 ; Rosa et al., 2013a). Les conséquences de cet enrichissement sur la qualité technologique et santé sont encore en cours d'appréciation.

Les technologies d'isolement de la couche à aleurone, le devenir digestif de cette fraction, ses effets nutritionnels et métaboliques... ont également été étudiés dans le cadre du projet Franco-Finlandais Phenomat (2009-2012) (Rosa et al., 2013b).

- Des études sont menées sur le pouvoir de satiété des produits céréaliers (Touyarou et al., 2012). Les protéines et les fibres apparaissent plus efficaces que les glucides et les lipides pour induire la satiété. La formulation de biscuits à faibles teneurs en matières grasses et en sucres et enrichis en protéines et en fibres, améliorant ainsi leurs propriétés nutritionnelles et de satiété, a été étudiée (Villemejeane et al., 2012). Elle impose une modification du procédé de fabrication et un outil d'aide à la décision permettant d'ajuster les paramètres de fabrication a été mis au point et validé en pilote industriel (ANR BISENS – 2009-2012). L'enrichissement en protéines et/ou en fibres des pâtes biscuitières, sans augmenter les quantités de sucre et de matière grasse utilisées habituellement, nécessite d'ajuster l'hydratation pour les rendre façonnables (Nichele et al., 2012). Afin d'optimiser cette hydratation, deux outils ont été développés : 1) un outil mathématique de prédiction de la teneur en eau basé sur l'évaluation préalable de la capacité d'absorption d'eau des ingrédients (protéines, fibres, farine et sucre) mesurée à l'aide d'un farinographe en condition d'hydratation d'une pâte à pain ; 2) un outil sensoriel d'aide à la formulation comprenant une liste de descripteurs évalués au cours et après le pétrissage. L'outil mathématique permet de réduire les essais par 2 ou 3 en moyenne pour définir le bon ordre de grandeur de la quantité d'eau à ajouter à la pâte. L'outil sensoriel permet un ajustement plus fin de l'hydratation pour développer des formulations façonnables sans essai biscuitier préalable ; il a été validé à l'échelle pilote industriel.

- Enfin, une étude expérimentale couplée à une modélisation numérique de la mastication des céréales de petit déjeuner a permis de décrire les mécanismes de rupture du produit qui sont essentiels pour comprendre les premières étapes de digestion et pour envisager le contrôle de la biodisponibilité des éléments composant le produit (Guessasma et al., 2011, 2012 ; Hedjazi et al., 2012).

Allergénicité des protéines du blé

- Les recherches conduites par l'Inra ont pour objectifs de caractériser les allergènes majeurs et les structures moléculaires responsables des réponses d'allergies alimentaires au blé, et d'étudier l'influence de facteurs capables d'influencer le risque allergique tels que la variabilité génétique du blé ou les modifications induites par les procédés de transformation et la formulation des aliments (Denery-Papini et al., 2011, 2012; Larre et al., 2011; Lupi et al., 2013; Mameri et al., 2012 a-d). Dans le cadre du projet ANR PREDEXPITOPE (2009-2012), les épitopes des protéines du blé, c'est-à-dire les motifs reconnus par le système immunitaire entraînant la réponse allergique du patient, ont été identifiés chez des adultes ou enfants allergiques à la farine de blé. Il a été montré que les épitopes reconnus chez les adultes étaient différents de ceux provoquant la réponse immunitaire chez les enfants suggérant que les mécanismes de sensibilisation ne sont pas les mêmes si le contact avec l'allergène

intervient dans les premières années de la vie ou à l'âge adulte. Il a également été montré que des individus tolérant au blé pouvaient développer des allergies sévères au gluten si celui-ci est modifié par désamidation, un procédé technologique utilisé par les industriels pour augmenter sa solubilité et ainsi élargir son champ d'utilisation (utilisation dans des viandes cuisinées, pâtés, charcuterie...). Il s'est avéré que les protéines de blé désamidées sont beaucoup plus allergisantes et que l'allergie au gluten désamidé, étudiée grâce à un modèle souris, résulte de mécanismes différents de ceux observés dans le cas de l'allergie à la farine de blé (Gourbeyre et al., 2012).

Pouvoir protecteur des produits céréaliers vis-à-vis des maladies chroniques

- La consommation de céréales complètes est associée à une moindre prévalence d'obésité, diabète de type 2, maladies cardiovasculaires et cancers digestifs. Toutefois, au-delà de l'action des fibres, les mécanismes protecteurs restent encore mal compris. Une analyse bibliographique a permis de faire le point sur les connaissances acquises à ce jour (Fardet, 2010). Les résultats d'études récentes, couplés à un inventaire exhaustif de l'ensemble des constituants bioactifs et de leur concentration dans le grain de blé ont permis de formuler de nouvelles hypothèses pour expliquer l'effet protecteur des céréales complètes (Fardet, 2010), à savoir 1°) l'implication des polyphénols, des composés soufrés, des lignines et de l'acide phytique dans la protection anti-oxydante à la fois au niveau du tube digestif et des cellules de l'organisme ; 2°) l'aptitude de la bétaine et de la choline à réduire le taux de lipides hépatiques et certains risques cardiovasculaires ; 3°) les effets protecteurs de l'acide férulique au niveau colique ; 4°) les effets bénéfiques des vitamines B sur le système nerveux, des oligosaccharides sur la flore bactérienne (effet pré-biotique) et des nutriments associés à la physiologie du système osseux (vitamines, minéraux et polyphénols). Les techniques de biologie intégrative ouvrent de nouveaux horizons : en effet, ce n'est plus un seul nutriment qui est protecteur, mais un profil de composés aux mécanismes d'action complémentaires. Ce travail a aussi mis en évidence le manque d'études d'interventions randomisées contrôlées permettant d'identifier les relations de cause à effet entre la consommation de produits céréaliers complets versus raffinés et la prévention des maladies chroniques liées à une mauvaise alimentation.

4.2.3 Nouveaux produits

- La texture vitreuse de l'amande de blé dur ne permet traditionnellement que sa transformation en semoules, puis en pâtes alimentaires. Dans le cadre d'un projet conduit avec la coopérative Arterris, premier collecteur de blé dur en France, et les Moulins Pyrénéens, les travaux conduits sur la plateforme Fractionnement et le fournil expérimental de l'Inra ont permis de définir des modalités de réduction de l'amande de blé dur en farine. Cette farine peut être utilisée en panification pour l'obtention de pains français de type baguette, sans le moindre ajout d'additif. Cette baguette est commercialisée, depuis juin 2012, dans les boulangeries artisanales (75 points de vente) sous la marque Mie'nutie et se caractérise par une mie plus jaune et une conservation plus longue que la baguette issue de farine de blé tendre. Une demande de brevet est en cours.

- Le projet ANR Pastaleg (2009-2011) avait démontré la faisabilité technologique de l'incorporation d'une proportion élevée (35%) de légumineuses dans une pâte alimentaire et son intérêt nutritionnel (les pâtes "céréale-légumineuse" sont riches en protéines, en fibres, vitamines et minéraux, pauvres en lipides et en alpha-galactosides, composés responsables de flatulences ; un séchage adapté de la pâte mixte permet de réduire sa teneur en glucose rapidement disponible). Prometteurs, notamment en termes d'index glycémique, les effets démontrés par le projet Pastaleg font maintenant l'objet d'une étude *in vivo*, afin de valider leur intérêt sur l'homme (UMR IATE).

- Dans le cadre de l'Institut Carnot Qualiment (mars 2011 - octobre 2013), le contrat de Recherche entre BIA et le groupe Soufflet "Caractérisation et Stabilisation des fibres solubles d'orge" visait la mise au point d'une boisson à effet santé contenant 1% de β -glucanes d'orge de haut poids moléculaire. Les produits riches en fibres solubles issus de l'avoine et de l'orge sont reconnus par les agences américaines (FDA) et européennes (EFSA) de sécurité alimentaire pour leurs propriétés anticholestérolémiantes et leur utilité dans la prévention des maladies cardiovasculaires. La consommation d'au moins 3 g/jour de β -glucanes est considérée comme suffisante pour diminuer le taux de cholestérol LDL dans le sang (EFSA Journal, 2011).

4.2.4 Comportements alimentaires

- La modification de la structure des aliments céréaliers peut conduire à une amélioration de leur profil nutritionnel, mais se traduit également par un changement de leurs caractéristiques organoleptiques. Les critères de préférence des consommateurs ne sont pas toujours compatibles avec les innovations technologiques développées pour répondre aux recommandations nutritionnelles. Ainsi dans le cas de la baguette, l'introduction de fibres dégrade systématiquement l'acceptabilité visuelle, tandis que l'acceptabilité après dégustation est préservée uniquement pour certains produits, comme les baguettes de type « tradition » (Saulnier et Micard, 2012).
- Sur un plan plus général, il faut signaler la mise en place du méta-programme consacré aux déterminants des pratiques alimentaires et leurs conséquences sur le bien-être et la santé (DID'IT, Déterminants et impact de la diète, interactions et transitions) suite à l'expertise collective Inra « Les comportements alimentaires, quels en sont les déterminants, quelles actions pour quels effets », restituée à la DGAL en juin 2010.

4.3. Grands projets démarrés entre 2011 et 2013

ANR

- Le projet d'ANR Wheafi (Wheat Active Fiber, 2011-2014) a pour objectif la fabrication de produits céréaliers enrichis en fibres provenant de différents tissus du grain de blé dur ou tendre et le test de leurs effets potentiels sur la réduction des processus inflammatoires chroniques, dans une population en surpoids, via leurs effets prébiotiques et de modulation de la flore intestinale (UMR IATE, BIA, PHAN)
- Le projet ANR Satin (2012 – 2016) concerne les procédés de transformation des céréales (« Cuisson en moule des pains et biscottes : maîtrise des risques chimiques et enjeux énergétiques ») (UMR GENIAL).
- Enfin, il faut citer l'IFMAS « Institut Français des Matériaux AgroSourcés » (l'un des Instituts pour la Transition Énergétique sélectionnés en 2012-ANR Investissement d'avenir) ; il s'agit d'un projet qui traite de valorisation de la biomasse pour le développement de matériaux plastiques biosourcés. Il a pour vocation de stimuler la compétitivité de la filière française de chimie du végétal. Sa stratégie de R&D s'articule autour de trois programmes de recherche : optimisation des bioressources, étude de la chimie des monomères et polymères, Plasturgie des matériaux biosourcés. Des chercheurs de l'UR BIA se sont impliqués dans la transformation des amidons de céréales en bioplastiques.

Pôle de compétitivité

- Granoflax (2012-2015 - pôle de compétitivité Céréales Vallée). Ce projet associe l'amont (génétique) et l'aval (traitement technologique) pour développer une filière de maïs adaptée à la fabrication de corn-flakes en combinant des aspects de production agronomique de maïs à haut rendement en grains et de procédés technologiques (séchage, fractionnement...) qui permettent leur transformation efficace en cornflakes par des procédés de cuisson-extrusion. Des outils de prises de vues et d'analyse d'images adaptés aux attentes de caractérisations de la filière maïs-cornflakes seront développés. La matière première et les procédés seront validés par des industriels des céréales petit déjeuner et les industries semoulières. Des études sensorielles permettront de confirmer l'obtention de textures de cornflakes recherchée par les consommateurs (UMR IATE et BIA).
- Mimosa (2011-2014 - pôles de compétitivité NSL, Céréales Vallée, Végépolys) : « Fibres fonctionnelles innovantes par leurs bénéfices santé et leurs propriétés techniques améliorées : du concept au produit fini savoureux et attractif pour le consommateur » (UMR NH).
- Nutripan (2010-2014 - pôle de compétitivité Céréales Vallée) : l'objectif est de développer un pain français de grande consommation, nutritionnellement optimisé, en ayant une approche globale de la chaîne des procédés de fabrication : préservation des constituants bénéfiques (vitamines, minéraux, fibres, micronutriments) par le choix des meilleures variétés, des conditions optimales de culture, ainsi que des procédés de mouture et de panification ; limitation des composés antinutritionnels (sel, produits néoformés type acrylamide) ; optimisation de l'impact nutritionnel des ferments et mixes enzymatiques. Ce pain sera dans un premier temps, destiné à la restauration collective hors foyer, sous forme précuit-surgelé afin de faciliter sa distribution (UMR GDEC, UMR QuaPA, UNH).

Institut Carnot Qualiment

Qualiment Vegage (« Vitesse de digestion et intérêt nutritionnel des sources protéiques végétales sur la rétention azotée et le métabolisme protéique au cours du vieillissement : étude de deux nouveaux aliments », 2014-2016) ; il s'agit de concevoir et étudier de nouvelles matrices alimentaires (pâtes alimentaires et films protéiques modèles) enrichies en protéines végétales dont le contenu et la structure de la fraction protéique sont nutritionnellement adaptés au sujet âgé (UNH et UMR IATE).

Partenariat privé

Une thèse financée par un contrat Ets privés Pasquier SA et Minoterie Dupuy-Couturier et DGER a notamment pour ambition de développer une méthodologie d'analyse des métabolites (principales vitamines) de type liposolubles et hydrosolubles par spectrométrie de masse, d'analyser l'influence des transformations (farine, pâte et pain et biscottes) sur les teneurs en ces métabolites et d'étudier les facteurs génétiques et environnementaux associés à la variation de ces métabolites (UMR GDEC).

Plateforme pour la filière blé dur

La plateforme Blé dur a été mise en place en 2013. Elle rassemble les sélectionneurs, les producteurs, les coopératives, les industriels, FranceAgriMer, l'Inra, Arvalis, l'Actia et l'enseignement supérieur. Elle vise à coordonner les actions de recherche, de formation et de développement, depuis la sélection jusqu'aux process industriels en passant par l'agronomie et l'économie. L'UMT Novadur fait partie intégrante de cette plateforme.

5. Focus sur la recherche internationale relative aux céréales en alimentation humaine

Anthony Fardet

Cette synthèse s'appuie sur les articles importants publiés dans la période 2011-2013 (voir p.55) ainsi que sur les conclusions et perspectives abordées lors des congrès majeurs sur le sujet, notamment le Whole-grain Summit (Minneapolis, May 19-22 2012), l'AACC International Annual Meeting (Albuquerque, September 29-October 2 2013), le Whole Grain International Workshop (3 November 2013, Taichung, Taiwan) et le HealthGrain Forum Symposium de l'IUNS Nutrition Congress (ICN2013, Granada, Spain, 18 September 2013).

5.1 Généralités

Il est clair que les céréales restent une denrée vitale pour nourrir la population mondiale, et elles sont l'aliment quotidien le plus important dans de nombreux pays. Récemment, les Nations Unies ont fait une proclamation pour contrer le développement rapide des maladies chroniques, la prévention alimentaire étant l'un des moyens. Une approche internationale consistant à utiliser les grains de céréales de la meilleure façon possible fait partie de cet objectif. Les recommandations diététiques désignent les céréales complètes comme une composante importante d'une alimentation favorable à la santé, et de nombreuses entreprises agro-alimentaires cherchent à améliorer le profil nutritionnel des aliments à base de céréales. Les travaux du monde entier ont mis l'accent sur l'exploration des questions de consommation menant au choix des céréales, sur l'étude des mécanismes physiologiques et des facteurs des aliments céréaliers induisant une protection de la santé, et sur le développement de technologies appropriées pour incorporer davantage de grain dans les produits alimentaires (Poutanen, 2012). Outre la recherche et l'industrie, les organismes de réglementation et les acteurs de la santé publique ont un rôle important à jouer dans les processus d'amélioration de l'apport de nutriments protecteurs, de fibres alimentaires et de composés bioactifs dans les aliments à base de céréales. Il est également très important d'augmenter les connaissances sur le bien-fondé du potentiel santé des céréales dans les pays en développement rapide, de sorte qu'ils n'abandonnent pas leurs traditions consistant souvent en l'utilisation de céréales locales pour l'alimentation (Poutanen, 2012). Le traitement technologique des grains et le développement d'aliments à base de céréales devraient s'appuyer sur les connaissances relatives aux changements induits par les procédés technologiques sur la qualité des aliments et la nutrition, et combiner cela avec la production locale de céréales et les habitudes alimentaires de façon à produire de nouveaux aliments induisant de façon justifiée du bien-être.

5.2 Technologie et potentiel santé des céréales

Sept sujets émergents et/ou d'intérêt croissant ressortent :

- **Le besoin d'approches plus globales, intégratives et holistiques** : aucune expérimentation n'a étudié l'effet de la consommation de céréales complètes sur l'induction/répression de gènes codant pour des composés antioxydants. D'autres travaux sont nécessaires pour explorer ce nouveau domaine de recherche en utilisant les techniques de génomique et transcriptomique les plus récentes. L'impact de la consommation de céréales peut également être étudié par une autre approche récente, la métabolomique. Cette dernière permettra d'approfondir comment des aliments complexes riches en antioxydants comme les céréales et les produits céréaliers peuvent modifier le métabolisme général, et quelles sont les voies métaboliques affectées par les antioxydants (Fardet, 2010).
- **La nécessité de combiner de nouveaux procédés technologiques avec une bonne acceptabilité des produits céréaliers** : l'invention de nouvelles technologies de traitement des céréales pour améliorer leur valeur nutritionnelle et leur acceptabilité par les consommateurs sera un objectif de travaux dans un proche avenir (enrichissement en composés d'intérêt, réduction de sel, sucre, suppression de l'acrylamide...) (McMackin et al., 2013).
- **L'incorporation accrue de céréales complètes ou de fractions riches en composés protecteurs** : l'intérêt du son de céréales comme source de fibres alimentaires et de composants fonctionnels a augmenté ces dernières années (Bartlomiej et al., 2012). Les études se concentrent activement sur la définition de fibres

alimentaires, l'analyse, la formulation de produits alimentaires favorables aux consommateurs, les traitements technologiques et les effets bénéfiques pour la santé. Bien que la composition du son et ses avantages physiologiques aient été étudiés, son rôle technologique comme ingrédient est encore à l'étude pour une variété de produits alimentaires à base de céréales, ainsi que les modifications organoleptiques qu'il peut conférer au produit (Pavlovich-Abril et al., 2012). Parmi les composés protecteurs du son, on peut particulièrement citer les antioxydants, la bétaine et la choline. Par ailleurs, on a pu montrer comment des antioxydants sont néoformés durant la réaction de Maillard après traitement hydro-thermique des grains de céréales. Mais il est indéniable que le rôle des produits céréaliers complets dans la protection anti-oxydante chez l'homme reste à démontrer. Enfin, on constate un intérêt croissant pour la bétaine et la choline, issues des céréales complètes, deux composés aux propriétés physiologiques essentielles, notamment comme donneurs de méthyles (Björck et al., 2012).

• **Le rôle de la structure de la matrice alimentaire des produits céréaliers** : ce rôle est aujourd'hui bien reconnu comme participant à leur potentiel santé (Frølich et al., 2013)(Mishra et Monro, 2012). On comprend de mieux en mieux les mécanismes physiologiques mis en jeu. La préservation de la structure "native" primaire, et l'utilisation de la technologie pour créer une structure "secondaire", sont les deux moyens utilisés pour conserver la structure physique de l'aliment plus ou moins intacte (développer des céréales de type muesli, des pains avec des mies plus denses...). Cela influence la digestion des glucides et permet d'obtenir des aliments de faible impact glycémique comparés à la plupart des produits riches en glucides hautement transformés actuellement disponibles sur le marché. Par ailleurs cela augmente le pouvoir satiatoire des produits céréaliers (Fardet, 2010).

• **Le concept de fibre co-passengers et la réévaluation du rôle de la fraction fibre** : ce sont tous les composés bioactifs associés aux fibres de céréales et qui sont délivrés progressivement dans le tube digestif : acides aminés et peptides, minéraux, lipides, vitamines, phytostérols/stanols, bétaine et choline, les lignanes (phyto-estrogènes), avénanthramides, alkylrésorcinols, autres composés phénoliques (Laerke et Knudsen, 2011 ; Fardet, 2010). Il y a de plus en plus de preuves scientifiques que la libération dans l'intestin de métabolites issus des acides phénoliques liés aux fibres soit un facteur contributif du potentiel santé des céréales (Björck et al., 2012 ; Gani et al., 2012 ; Neacsu et al., 2013). Ainsi, bien que les additifs de fibres fournissent une approche pratique pour combler l'écart important entre la consommation de fibres recommandées et effectives, les isolats de fibres – selon le degré de raffinage et l'intensité de l'extraction – peuvent être déficients en constituants des grains entiers qui confèrent à ces derniers des avantages potentiels supplémentaires pour la santé. Les essais cliniques établissant les avantages relatifs de grains entiers vs extraits de fibres manquent, et les implications de l'utilisation généralisée des extraits de fibres ne sont pas claires (Smith et Tucker, 2011).

• **Le rôle des produits céréaliers dans le processus inflammatoire, l'allergie au gluten et la maladie cœliaque** : La consommation de blé provoque trois types de réponses immunitaires anormales chez un petit nombre d'individus : 1) la maladie cœliaque ou intolérance au gluten qui touche environ 1% de la population européenne et se déclenche chez des personnes ayant une prédisposition génétique particulière ; 2) l'allergie alimentaire au blé qui semble concerner moins de 0,5% de la population ; 3) l'allergie respiratoire au blé (ou asthme du boulanger) qui est par contre une pathologie fréquente (>10%) parmi les professionnels de la meunerie et boulangerie. La sensibilité au gluten, nouveau type de pathologie lié au blé qui s'exprime par des signes digestifs est très mal caractérisée aussi bien sur le plan clinique, que sur le plan des mécanismes biologiques. Aucun facteur déclenchant (fraction protéique, oligo-saccharides...) n'est formellement identifié actuellement (Catassi et al., 2013). Rappelons aussi que parmi les allergies alimentaires, le blé n'est pas en première position. Cependant, de Punder et al. (2013) soutiennent l'hypothèse que la consommation régulière de produits céréaliers contribuerait à un état d'inflammation chronique et à certaines maladies auto-immunes en augmentant la perméabilité intestinale et en initiant une réponse immunitaire pro-inflammatoire (de Punder et al., 2013). Cette propriété délétère supposée des céréales est une question scientifique d'importance qui mérite d'être largement plus approfondie car de nombreux composés des céréales complètes sont considérés comme anti-inflammatoires, ce qui semble contredire cette hypothèse.

Par ailleurs, de nombreuses recherches sont menées sur les moyens de réduire l'allergie ou l'intolérance au gluten (Brouns et al., 2013) : utilisation de céréales sans gluten (Botero Omary et al., 2012), utilisation de variétés de blé avec de faibles teneurs en alpha et bêta-gliadines, préparations pro-biotiques par *lactobacilli* (*sourdough bread*...), clivage enzymatique des fragments de gliadines par des prolyl-endopeptidases de microorganismes, dégradation des peptides allergisant par des enzymes issues de la germination des céréales et la séquestration des épitopes stimulant l'allergie par des polymères conçus pour les inactiver. Ces stratégies permettent de développer des outils pour détecter avec précision et sensibilité la présence de gluten et de protéines de blé dans les aliments afin d'améliorer notamment l'étiquetage des produits alimentaires.

● **L'utilisation de la germination et de la pré-fermentation pour améliorer la densité nutritionnelle** : sur la base de ce qui se fait notamment dans les pays en développement, l'intérêt de l'utilisation de la germination et de la pré-fermentation est aujourd'hui de plus en plus reconnu comme un moyen d'augmenter la valeur nutritionnelle des produits céréaliers (Das et al., 2012 ; Hübner et Arendt, 2013 ; Katina et Poutanen, 2013). La majorité des études ont montré que la germination peut améliorer le contenu en nutriments, vitamines, minéraux, polyphénols totaux et l'activité anti-oxydante tout en diminuant les anti-nutriments, en comparaison avec les graines non germées (Botero Omary et al., 2012). Un avantage de la germination est qu'elle ne nécessite pas de matériel complexe pour améliorer la qualité nutritionnelle des graines comestibles. Toutefois, les conditions de traitement ou de germination, tels que le temps, la température, les conditions de pré-trempage et la lumière entre autres peuvent influencer sur leur qualité. L'aspect microbiologique est également très important. Des résultats contradictoires identifiés dans la littérature indiquent la nécessité d'approfondir les recherches pour le choix des cultivars et les conditions de germination de certaines graines sans gluten. En outre, les chercheurs doivent se pencher sur les effets de ces graines germées chez les humains et les animaux en réalisant davantage d'études. Enfin, les céréales sans gluten et les pseudo-céréales germées ont le potentiel d'être utilisées comme moyen naturel de fortification et d'enrichissement dans les aliments sans allergènes et sans gluten, et de profiter aux personnes intolérantes au gluten. Cependant, leur substitution peut affecter la texture et le goût des aliments, ce qui devrait être étudié davantage.

5.3 Comportements alimentaires vis-à-vis des produits céréaliers

Il existe une différence de perception entre pays envers le pain, les pâtes et les biscuits élaborés à partir de céréales plus ou moins complètes : par exemple, les bénéfiques "santé" des produits céréaliers complets sont fortement perçus en Finlande, et assez peu en Italie. Globalement, les femmes et les personnes âgées ont une perception plus positive des produits céréaliers complets et la modification du pain et des pâtes est mieux reçue que celle des biscuits. Enfin, le plaisir à la consommation, les bénéfiques santé perçus et les motivations de santé sont les principaux critères qui semblent guider le consentement à utiliser les produits riches en céréales complètes. Les obstacles importants et les facilitateurs à la consommation de ces produits complets sont liés à la perception des propriétés sensorielles (facteur dominant), aux connaissances sur la façon de localiser, identifier et utiliser les produits céréaliers complets, et à la sensibilisation aux bienfaits santé, au coût perçu et aux influences familiales. Parallèlement aux efforts d'enseignement général, les opportunités et les défis existent pour l'industrie alimentaire afin de développer de nouveaux produits alimentaires abordables qui soient en mesure de fournir des céréales complètes dans une grande variété de formes, y compris non directement visibles dans l'aliment pour ceux qui sont les plus résistants au changement (McMackin et al., 2013).

Dans divers pays, notamment anglo-saxons, certaines stratégies de promotion des céréales complètes sont utilisées comme le "Go Grains 4+ Serves a Day" en Australie (Griffiths, 2010) ou l'utilisation d'une étiquette/timbre « whole-grain » aux USA. Ces stratégies de communication sont à mettre en relation avec le fort accroissement des publications visant à démontrer l'effet bénéfique des céréales complètes et de certains de leurs composés (fibres, vitamines, antioxydants) sur la santé humaine (obésité, diabète, cancer, etc.) (Björck, I., et al., 2012). Ces travaux largement soutenus par des acteurs économiques de la filière céréales visent à redorer l'image nutritionnelle des produits céréaliers vis-à-vis des consommateurs. Cette stratégie a des effets pervers dans la mesure où il est difficile, *in fine*, de sortir ce qui relève de la simple allégation "marketing" de l'allégation santé démontrée. Ceci conduit à des polémiques contre-productives comme en témoigne le livre du cardiologue américain William Davis (*Wheat Belly: lose the wheat, lose the weight, and find your path back to health*) et la réponse de Brouns et al. (Brouns et al., 2013). Il faut peut-être ici s'interroger sur cette vision santé très anglo-saxonne des céréales et des recherches qui en découlent. En effet la tradition française, et pour partie la réglementation, notamment en ce qui concerne le pain, est peu encline à promouvoir des stratégies de formulations multiples pour améliorer la qualité nutritionnelle des produits de panification (ajout de protéines, enzymes, vitamines, fibres, acides gras oméga3, etc.). Contrairement aux consommateurs américains et anglo-saxons, les consommateurs français sont avant tout intéressés par la qualité organoleptique des produits et très peu pour leur valeur nutritionnelle (Observatoire du pain, Point sur la consommation de pain des Français, Credoc 2010).

Une définition des produits à base de « whole-grain » a été établie suite à la formation d'un groupe de pression influent aux USA (<http://wholegrainscouncil.org/about-us>).

6. Les recherches en sciences économiques et sociales

Sylvie Bonny, Fabrice Levert

Les recherches en sciences économiques et sociales sur les céréales et leurs filières peuvent concerner des aspects économiques, commerciaux, politiques et sociologiques, depuis l'exploitation agricole jusqu'à la planète. Mais en sciences économiques et sociales le repérage des travaux sur ce thème est souvent plus difficile qu'en sciences biologiques et agronomiques car les intitulés des articles sont fréquemment abstraits, plutôt théoriques ou d'ordre méthodologique. En outre les publications concernant l'agriculture sont assez mal répertoriées dans le WoS (cf. Annexe. Une très faible présence d'articles concernant l'agriculture et l'alimentation dans le WoS).

6.1. Le paysage des recherches à l'Inra

A l'Inra les recherches en sciences économiques et sociales sont effectuées dans le département SAE2, mais également SAD ; aussi certains travaux mentionnés ci-après ont été effectués au SAD. Le département SAE2 est structuré en trois grands champs thématiques :

- (1) Alimentation, consommateurs, industries et politiques publiques,
- (2) Agriculture, environnement, ressources naturelles et politiques publiques,
- (3) Localisation, commerce, changement climatique et politiques publiques.

Le SAD comporte lui deux grands champs thématiques :

- (1) Transformations des systèmes sociotechniques en agriculture et dans les filières,
- (2) Gouvernance des territoires et des systèmes socio-écologiques.

Tous ces champs thématiques peuvent chacun traiter des céréales sous divers angles, depuis l'économie du secteur semencier jusqu'aux comportements des consommateurs, en passant par les pratiques des agriculteurs et les échanges commerciaux. Les thèmes de recherche suivants, récents ou parfois présents de longue date, en traitent plus particulièrement :

- **Economie des exploitations**, avec notamment l'évolution des pratiques agricoles et la prise en compte des risques par les agriculteurs (voir ci-après).
- **Modélisation et évaluation multicritères**. Divers travaux en SAE2 et SAD visent à caractériser la durabilité des systèmes de production (entre autres céréalières) avec des indicateurs, et à modéliser les décisions des agriculteurs, par exemple dans leurs choix de productions et d'assolement.
- **Perspectives et possibilités d'évolution vers une agriculture plus durable**. De nombreux aspects sont concernés: pesticides, réduction des pollutions, biodiversité, agroécologie... Cela s'est traduit et se traduit par de nombreux travaux, par exemple un développement des investigations concernant l'usage des pesticides, les possibilités et les freins à leur diminution dans le cadre du programme EcoPhyto du Ministère de l'agriculture et du MétaProgramme SMaCH (Sustainable Management of Crop Health). A cela s'ajoutent de nombreuses recherches sur les voies et possibilités de transition vers une agriculture plus agroécologique et vers l'intensification écologique, ainsi que sur la biodiversité et l'agriculture biologique. Enfin, diverses investigations ont porté sur les impacts et adaptations au changement climatique et sur les possibilités de réduction des gaz à effet de serre d'origine agricole (MétaProgramme ACCAF Adaptation au Changement Climatique de l'Agriculture et de la Forêt, rapports commandités par le Ministère de l'agriculture, l'ADEME, etc.). Les grandes cultures, notamment le blé, le maïs, le riz, sont fortement concernées par ces travaux.
- **Les effets des politiques publiques et leur évaluation**. Il s'agit notamment des recherches menées de longue date sur les impacts des réformes de la PAC en matière de choix de production, d'intensification et de revenus. Par ailleurs, des travaux analysent les impacts de la recherche agronomique (ASIRPA Analyse Socio-économique des Impacts de la Recherche Publique Agronomique) ; des analyses de cas concrets pourraient

concerner la fertilisation azotée (outils d'aide à la décision) et les itinéraires techniques à bas niveau d'intrants avec variétés de blés adaptées.

- **Les déterminants des comportements des consommateurs.** En la matière il faut noter la participation à la Réflexion stratégique DuALine "Pour une alimentation durable" et au MétaProgramme DiD'IT (Déterminants et Impact de la Diète, Interactions et Transitions). Par ailleurs des travaux de facture plus récente mobilisent les méthodes de l'économie expérimentale ou des approches micro-économétriques pour analyser les choix et pratiques d'achat de denrées ou de consommation.
- **Analyse et évaluation des politiques nutritionnelles ou d'engagements volontaires** pour améliorer la composition nutritionnelle des céréales, e.g. celles consommées au petit déjeuner.
- **Marchés et échanges des produits agricoles et sécurité alimentaire mondiale.** Les travaux en la matière sont assez nombreux, mais en général ils ne concernent pas spécifiquement les céréales, mais tous les produits. Divers modèles ont été et sont construits pour représenter l'offre, la demande et les échanges de produits agricoles à diverses échelles, notamment mondiale. Une certaine intégration des aspects non marchands commence à être effectuée, par exemple les relations entre commerce international et environnement. Enfin depuis plusieurs années, notamment depuis les émeutes de la faim de 2008, le thème de la sécurité alimentaire mondiale et notamment la question omniprésente "comment nourrir 9 ou 10 milliards d'hommes en 2050 ?" font l'objet de travaux prospectifs, avec divers modèles analysant offre et demande alimentaires et leurs comparaisons selon divers scénarios. Ce domaine fait notamment l'objet d'un important projet européen FoodSecure ("Exploring the Future of Global Food and Nutrition Security") et du MétaProgramme Glofoods (Etude des transitions pour la sécurité alimentaire mondiale, coordonné par A. Thomas).
- **Localisation des activités agricoles,** en particulier avec la participation à l'ANR Moduland (Usage des sols : modèles, dynamique et décisions).
- **Concurrence entre les usages des terres.** Le développement d'une production ou d'une nouvelle utilisation, par exemple les biocarburants, peut fortement affecter celles qu'elles remplacent. Cette question est abordée dans plusieurs travaux et fait aussi l'objet d'investigation par la DEPE (Expertise collective, Prospective et Etudes) avec la Prospective Agrimonde-Terra, et par le GIS "changement d'affectation des sols" (CAS) rassemblant l'INRA, l'ADEME et les Ministères en charge de l'agriculture et de l'environnement.

6.2 Illustrations par diverses recherches 2011-2013

Méthodes, outils et bases de données. En sciences économiques et sociales, l'une des questions cruciales toujours mal résolue est celle de l'accès aux données nécessaires aux recherches. L'accès des chercheurs aux données individuelles des exploitations collectées par les services du ministère de l'agriculture est désormais régi par des conventions strictes et des méthodes sécurisées (Centre d'accès sécurisé distant aux données, CASD) rendant leur utilisation plus formalisée, mais moins souple. En parallèle, le Département SAE2 a développé l'ODR (Observatoire du Développement Rural) dont la mission est de regrouper les données sur les aides publiques agricoles ou agri-environnementales (fournies par convention par les organismes payeurs) et de les rendre disponibles à la communauté scientifique, notamment en les enrichissant par appariement à d'autres données spatialisées et en les anonymisant. Par ailleurs, le Département SAE2 soutient et investit dans plusieurs opérations importantes d'assemblage et de gestion de bases de données, notamment celles permettant le suivi de la base des achats alimentaires (TNS Kantar) et l'OQALI (Observatoire de la Qualité de l'Alimentation). L'OQALI est une opération des Ministères en charge de l'agriculture et de la santé dont la mission est de centraliser et traiter les données sur les caractéristiques des produits alimentaires afin d'assurer un suivi de l'évolution de l'offre alimentaire.

Illustrations de diverses recherches concernant les céréales

Remarque. *Diverses publications sont mentionnées ci-après et dans les références bibliographiques en les rattachant à certaines thématiques impliquant les céréales. Il va sans dire qu'une telle affectation est arbitraire car un même article peut être analysé sous plusieurs angles. Que les auteurs cités ne se formalisent pas de voir*

leur travail classé dans telle ou telle catégorie, et que ceux non mentionnés ne s'offusquent pas : il s'agit seulement d'exemples illustratifs, non d'un recensement exhaustif des publications concernant les céréales de près ou de loin.

La production des céréales

- Voies, moyens, coûts et freins pour une transition vers de nouvelles pratiques agricoles et de nouvelles formes d'agriculture, avec réduction des pesticides et de certaines pollutions ainsi que l'adoption de pratiques agroécologiques et d'intensification écologique. Evaluation multicritères de certaines options. Cf. Bonny 2011; Chantre 2011; De Cara et al. 2011; Fares M. et al. 2012; Lamine 2011; Loyce et al. 2012.
- Mesures pouvant contribuer à la préservation de la biodiversité via la taxation d'intrants ou des incitations à un usage plus extensif des sols. Cf. Barraquand, Martinet 2011; Berthet 2011.
- Evolution des coûts de productions, des prix, des revenus et des soutiens des différentes catégories d'agriculteurs, en lien avec les politiques agricoles. Cf. Chatellier, Guyomard 2011; Desbois, Butault, Surry 2013; Lécuyer, Chatellier, Daniel 2013.
- Effets de réglementations et politiques publiques sur la gestion de la coexistence des cultures GM et non GM et la régulation des bioagresseurs comme la pyrale du maïs. Cf. Coleno, Hannachi 2011; Desquilbet, Ambec 2012; Fargue-Lelièvre 2011; Hannachi 2011; Lecroart, Messéan, Soler 2012.

Les utilisations des céréales (alimentation humaine et animale, biocarburants) et leurs impacts.

- Impacts du renchérissement des céréales sur les élevages. Concurrence entre céréales et espaces pâturés avec en France depuis 4 décennies un recul des systèmes de polyculture-élevage au profit des systèmes de grandes cultures et retournement des prairies. Cf. Benoit, Laignel 2011; RMT Economie des filières animales; Plateforme MEANS [MulticritEria AssessmeNt of Sustainability] ; et divers travaux des départements SAD et agronomie sur l'évolution des systèmes de culture et la céréalisation des surfaces agricoles en France (Mignolet 2013.)
- Effets du développement des biocarburants sur les revenus des agriculteurs, l'environnement, la compétition avec l'alimentation et les prairies via l'affectation des sols, cf. Chakir, Vermont 2013; Forslund, Levert, Gohin, Le Mouel 2013; Louhichi, Valin 2012; Persillet 2012.

Les mécanismes de marchés et leurs instruments de régulation

- Normes et standards publics et privés agissant sur les échanges; facteurs déterminants les choix des partenaires commerciaux Cf. Jean et al 2011; Madignier 2011.
- Perspectives des marchés, volatilité des prix alimentaires mondiaux et moyens de la réguler, rôle de la spéculation financière. Cf. Cordier, Gohin 2012; Huchet-Bourdon 2011; Levert et al. 2012; Colloque INRA au Salon de l'Agriculture 2012: *L'agriculture face aux aléas: de la variabilité du climat à la volatilité des prix.*

6.3 Les recherches internationales en Sciences Economiques et Sociales concernant les céréales et leurs filières. Un bref aperçu pour 2011- mi 2013 à partir du WoS.

Il est difficile de repérer les publications de sciences économiques et sociales dans les bases bibliographiques multidisciplinaires comme le WOS ou les CAB, même s'il existe dans le WOS une catégorie "Sciences Sociales" (SSCI) et dans les CAB des codes indiquant les champs disciplinaires. En effet beaucoup de travaux sont de nature multidisciplinaire. La solution simple consistant à répertorier les travaux ayant les termes "*economic*" ou "*soci*" dans leur "Topic" n'est pas valide car ces termes peuvent être simplement mentionnés dans le résumé sans que l'article relève de ces disciplines.

Après plusieurs essais pour sélectionner les publications en sciences sociales, on a retenu celles répertoriées dans la base SSCI du WOS (bien que certains articles multidisciplinaires incluant les sciences sociales soient parfois seulement répertoriés dans le SCI du WoS, et non dans le SSCI). Pour effectuer une recherche similaire à celle faite dans les autres sciences, on a sélectionné les publications où figurait dans le titre le terme "*cereal*" ou l'une de ses composantes "*maize OR corn OR wheat OR rice OR rye OR barley OR quinoa OR amaranth OR buckwheat OR oat OR millet OR sorghum OR bread OR pasta OR bulgur OR bran OR aleurone OR spaghetti* OR biscuit* OR lasagne OR pseudocereal* OR pseudo-cereal**". Cependant il aurait été sans doute préférable de faire cette recherche dans le champ *Topic*. En effet en sciences sociales une recherche sur les mots du titre ne

retient pas tous les articles consacrés aux céréales car beaucoup de chercheurs optent pour des titres dont la terminologie est plus abstraite, ou plus économique /sociologique, ou d'ordre méthodologique sans mentionner de termes précis se rapportant aux domaines concrets étudiés, l'accent étant mis sur les concepts et méthodes plus que les sujets concrets. De plus certains travaux utilisent des vocables plus englobants : crop, field, "field crops", "grandes cultures", farming, etc.

Malgré cette approche restrictive, pour les années 2011-mi 2013 on a obtenu 505 articles dans le WoS (2111 dans les CAB) que l'on a analysés.

Depuis les années 2000, les recherches en économie agricole et sociologie rurale se sont orientées bien plus qu'auparavant vers divers thèmes liés à l'évolution du contexte notamment :

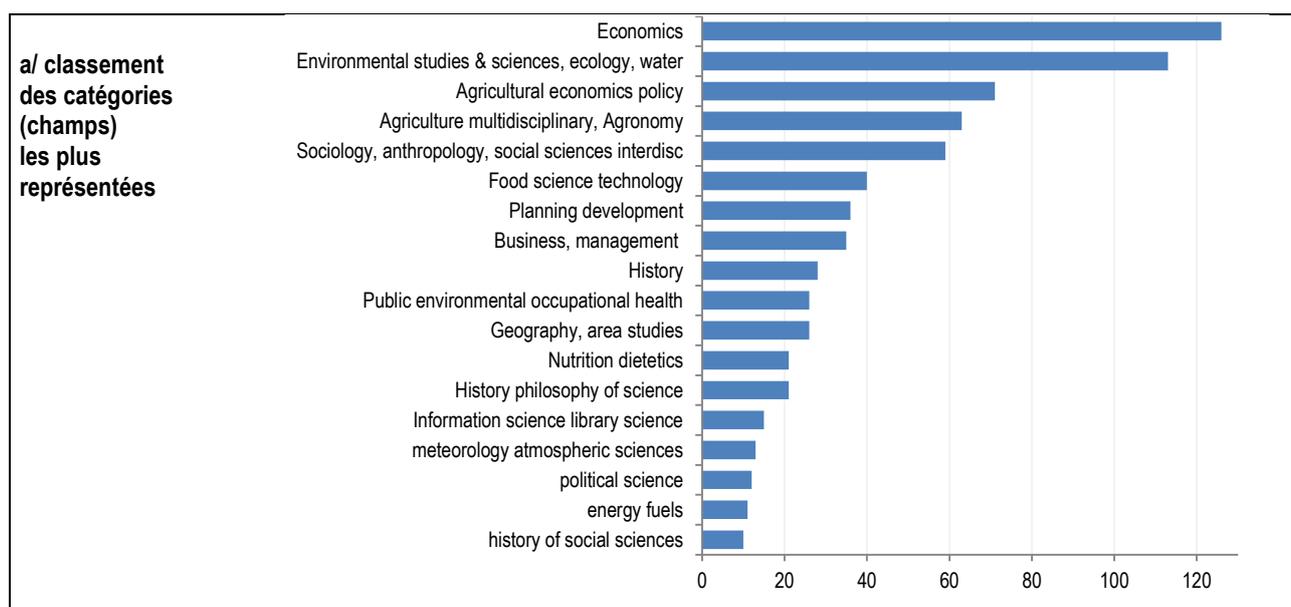
- 1/ impact des activités humaines sur la biosphère, environnement, durabilité, changement climatique ;
- 2/ consommation alimentaire, alimentation, nutrition, sécurité alimentaire ;
- 3/ mondialisation impliquant un nombre croissant de domaines et secteurs.

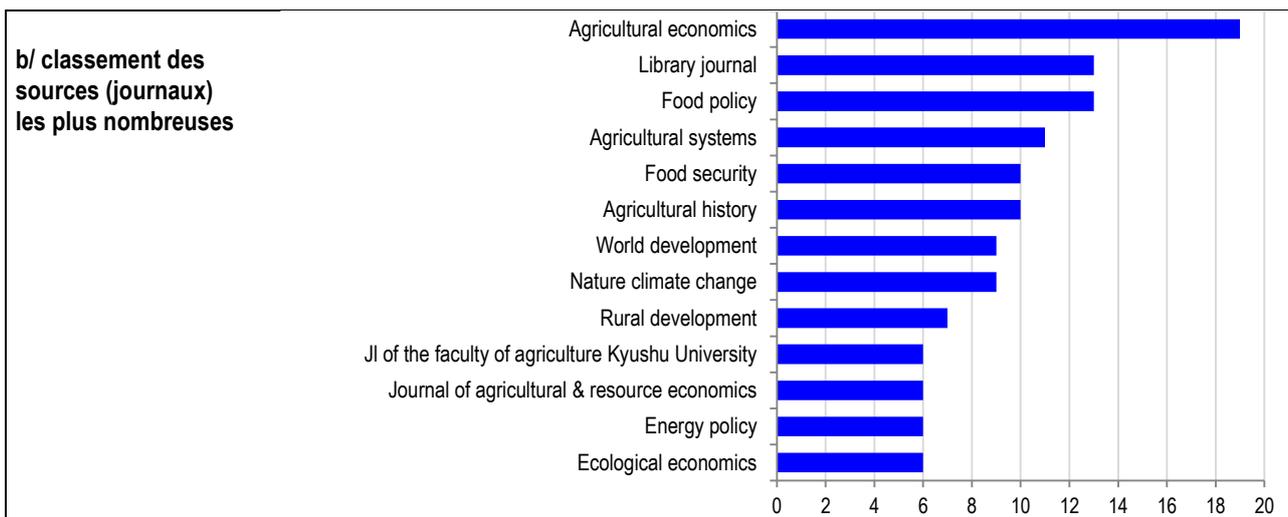
Dans les publications en sciences sociales concernant les céréales en 2011-2013 répertoriées dans le WoS, on retrouve ces grandes tendances. Les travaux menés relèvent de

- l'économie stricto sensu (prix, marchés),
- des aspects environnementaux,
- des politiques agricoles,
- d'agriculture ou d'agronomie,
- de sciences des aliments, nutrition ; alimentation,
- de sociologie, anthropologie et autres,
- de planification et développement.

Un essai de classification des publications selon leurs champs disciplinaires a été fait à partir des "catégories du WoS" (fig. 2a). Mais ces dernières se réfèrent au contenu habituel des journaux où figurent les articles, non à la teneur de chaque article individuellement. De ce fait la classification est approximative. Une autre catégorisation des articles a été effectuée selon les revues où ils ont été publiés (fig. 2b).

Figure 2. Principaux champs disciplinaires et revues scientifiques des articles portant sur les céréales répertoriés dans le WoS en sciences économiques et sociales (champ SSCI, terme générique CEREAL* et al. in TITLE, période 2011-20/08/2013)

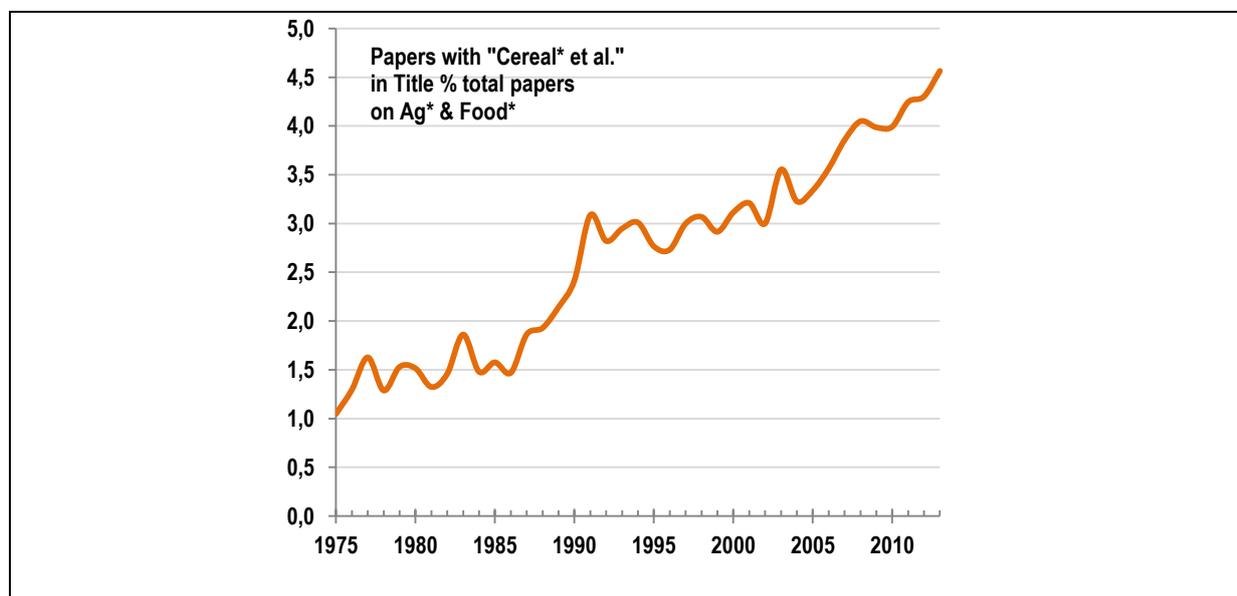




NB *Library Journal* est une revue qui analyse des livres, revues, bases de données, etc.

Enfin on a cherché à estimer l'importance relative des articles consacrés aux céréales parmi ceux traitant d'agriculture et alimentation. Pour chaque année, on a établi le nombre d'articles ayant le terme "Cereal* et al." in "Title" que l'on comparé au nombre de ceux traitant d'agriculture ou d'alimentation (i.e. articles ayant "agric* OR farm* OR Food* OR horticultur* OR agro*" in "Topic"). La moyenne sur les 37 ans est de 3.5 %. Elle a augmenté progressivement ces dernières années pour atteindre 4.5 % (fig. 3).

Figure 3. Evolution du nombre d'articles consacrés aux céréales parmi ceux traitant d'agriculture et alimentation dans le WoS au fil des années (en %, 1975-2012).



Annexe. Une très faible présence d'articles concernant l'agriculture et l'alimentation dans le WoS (Web of Science) : 3,2% en 2012

Comme l'objectif était de repérer les articles portant sur les céréales et leurs filières, on a cherché à avoir une vue globale de l'importance des articles concernant l'agriculture et l'alimentation parmi les publications répertoriées dans le WoS. Pour cela, on a calculé dans le WoS le nombre d'articles ayant "agric* OR farm* OR food* OR horticultur* OR agro*" in "Topic" selon les années. La part dévolue à l'agriculture ou l'alimentation apparaît très faible dans le WoS: la proportion des articles qui en traitent atteint seulement 3,2 % en 2013 ! Et encore ce chiffre est surestimé car, même si un terme est mentionné dans le résumé, rien n'indique que tout l'article traite de ce thème.

Ainsi sur les près de 43 millions d'articles répertoriés dans le WoS de 1975 à fin 2013, 802.000 concernent l'agriculture ou l'alimentation, soit 1,9% en moyenne, en légère progression au fil du temps.

Rappel. Rechercher un terme dans le champ "Topic" du WoS revient à le rechercher simultanément dans les champs titre, résumé, mots-clés auteurs, keywords plus. Or un terme peut être présent dans le résumé sans que tout l'article traite du sujet lié.

Fig. A. Proportion des articles traitant d'agriculture* et d'alimentation* dans le total des articles du WoS, 1975-2013

(*) ces articles traitant d'agriculture ou d'alimentation sont ceux ayant "agric* OR farm* OR Food* OR horticultur* OR agro*" in "Topic", c'est donc une estimation haute.

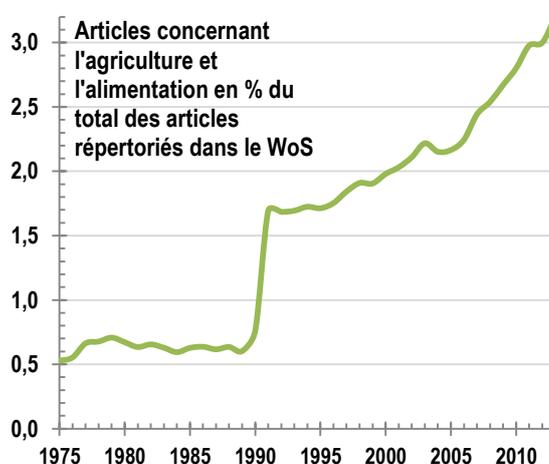
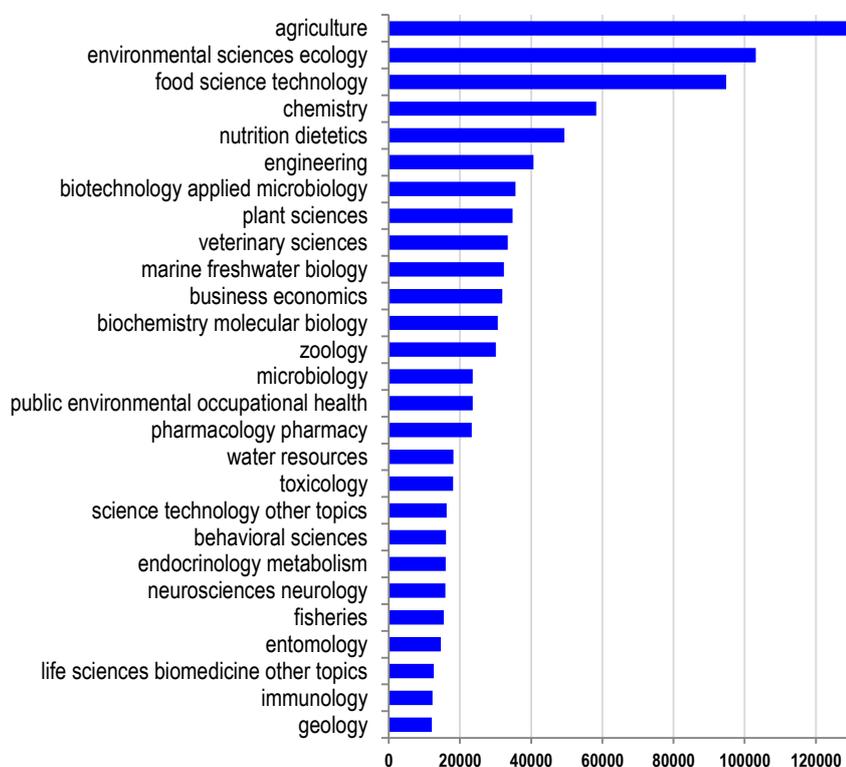


Fig. B. Principaux domaines des articles traitant d'agriculture et d'alimentation selon la classification établie par le WoS des divers supports dépouillés. Période 1975- 2013, environ 800000 articles.



Conclusion

Depuis quelques années, l'agriculture et les céréales en particulier sont revenues sur le devant de la scène, notamment du fait des perspectives démographiques, alimentaires, environnementales, climatiques et énergétiques. En France également, le secteur des céréales est important pour des raisons micro et macro-économiques, environnementales, territoriales, alimentaires et de santé. Des enjeux notables concernent cette filière à différentes échelles et à ses divers maillons :

- Les orientations, méthodes et résultats de l'amélioration des plantes : rendements, composition des grains, acceptabilité des méthodes utilisées, etc.
- L'évolution des pratiques agricoles selon les rapports de prix entre productions et intrants, les choix technico-économiques des agriculteurs et les réglementations.
- Les retombées des techniques agricoles au niveau environnemental et qualité des produits, sachant que les critères de qualité sont nombreux et varient selon les acteurs.
- La qualité des récoltes qui doit garantir des teneurs en contaminants (résidus de pesticides, mycotoxines, éléments traces métalliques) inférieures aux valeurs seuils fixées (ou en cours d'élaboration) par la réglementation européenne et qui doit se maintenir avec l'adoption d'itinéraires culturaux à plus faible niveau d'intrants chimiques.
- L'importance relative des céréales dans les systèmes de culture et de production et au niveau des territoires.
- La complexification de la chaîne collecte – stockage – transformation – distribution selon sa longueur, ses débouchés et la sophistication des produits finaux.
- L'efficacité et la durabilité des techniques et circuits de distribution pour diminuer pertes et gaspillages.
- Le fréquent appauvrissement –en fibres, micronutriments et autres composés bioactifs protecteurs– des céréales transformées destinées à l'alimentation humaine et leur enrichissement en sel, sucres simples, parfois matières grasses. Malgré leurs effets santé défavorables, ces opérations demeurent fréquentes dans l'industrie de transformation pour des raisons économiques et organoleptiques notamment, même si la tendance s'inverse pour certains produits céréaliers.
- L'équilibre entre offre et demande alimentaire au niveau qualitatif, quantitatif et économique pour les différentes catégories de personnes, à différentes échelles, régions et périodes de temps.
- Les inquiétudes et les doutes d'une partie des consommateurs envers la qualité des produits alimentaires, y compris pour les céréales, comme le montrent les craintes envers le gluten et les résidus de pesticides.

Inscrites sous la bannière de l'agroécologie, les questions de recherche au sein de la filière céréales interrogent désormais les impacts aux interfaces production, transformation et consommation. Si la réduction des intrants est l'un des objectifs, elle peut susciter des questionnements quant à sa conciliation avec les résultats économiques (Guillou et al., 2013; Guyomard et al., 2013), et avec les exigences de l'aval de la filière. Pour exemple, deux points. Le premier se situe au niveau de la maîtrise des contaminants, du champ aux grains transformés ; le second porte sur les conséquences d'une diminution de l'apport azoté sur la teneur protéique des grains. La conduite culturale à moindres niveaux d'intrants ne doit pas induire une baisse de cette teneur susceptible d'entraîner des difficultés pour les processus de transformation et pour les marchés exports, difficultés déjà observées ces dernières années. Si au niveau français, le taux protéique des grains baisse, le risque est d'engendrer une baisse de compétitivité des produits sur les marchés exports. L'Inra et d'autres acteurs investissent des pistes de recherche afin de concilier réduction des empreintes environnementales des cultures céréalières, qualité et compétitivité des produits.

Des recherches conséquentes sont consacrées à la filière céréalière à l'Inra, recherches que cette note a cherché à présenter. Vu les domaines d'investigation de l'Inra, le champ des travaux concernant les céréales et leurs filières est très vaste : du gène au nutriment final, de la semence à l'aliment tout préparé, en passant par les pratiques des agriculteurs, les diverses voies de collecte, stockage, transformation, commercialisation, distribution, les choix des consommateurs, les adaptations production/consommation à divers niveaux, les aspects nutritionnels, les marchés, les prix... Le recensement des travaux effectué dans cette note s'appuie sur les publications répertoriées dans le WoS, les faits marquants signalés par les Départements, les expertises ainsi que sur la participation des chercheurs Inra aux grands programmes internationaux, européens ou français. Il montre en général une bonne insertion de l'institut dans la communauté scientifique impliquée dans la filière

céréalière. Des collaborations variées existent également avec les organismes de développement et instituts techniques (cf. annexe 1).

En matière de positionnement des recherches publiques et privées, leur importance relative varie fortement selon les segments de la filière, phénomène que l'on retrouve dans la plupart des pays. Ainsi Fuglie & Toole (2014) qui ont établi pour les Etats-Unis la répartition des investissements de R&D publics et privés dans le domaine agricole et alimentaire estiment qu'ils portent sur des segments assez différents, sauf pour les cultures où recherches publique et privée ont un montant globalement assez proche (Fig. 4). Mais au niveau des cultures aussi, les dépenses publiques et privées de R&D se répartissent sur des aspects différents, selon qu'elles soient plus génériques ou plus proches de l'application. Les estimations de Fuglie et Toole pour les Etats-Unis montrent aussi que, si au 20ème siècle les dépenses publiques de recherche agricole l'emportaient largement sur celles du privé, c'est beaucoup moins le cas depuis le début du 21ème siècle car l'investissement public diminue alors que celui du privé augmente nettement (Fig. 5). A l'échelle mondiale, une évaluation des dépenses de R&D indique que, en 2008, les investissements publics en recherche agricole et alimentaire étaient nettement plus importants que ceux du secteur privé, mais aux Etats-Unis au contraire les investissements du privé surpassaient largement ceux du public (Fig. 6). En ce qui concerne la France, on ne dispose pas de données assez détaillées pour pouvoir faire une comparaison, a fortiori au niveau d'un secteur particulier comme les céréales.

Dans cet inventaire il s'est avéré assez ardu de répertorier toutes les investigations de l'Inra en 2011-2013 sur l'ensemble de la filière céréales et ses divers maillons ou ramifications. La méthode utilisée en premier lieu – répertorier dans le Web of Science (WoS) toutes les publications dont le titre comprend un terme de la famille des céréales et dont un auteur au moins travaille à l'Inra – a minoré les résultats obtenus, dans la mesure où, notamment en agronomie globale ou sciences sociales, des publications traitant des céréales en même temps que d'autres produits ou productions peuvent avoir un intitulé plus large, plus englobant, ou plus méthodologique. Toutefois l'option –souvent choisie dans des travaux similaires– de faire une requête des termes par leur "topic" peut aboutir à l'inverse à des résultats trop larges dans la mesure où, dans le WoS en choisissant le champ "topic", on cherche le ou les termes simultanément dans : titre, résumé, mots-clés indiqués par les auteurs et keywords-plus². Or un résumé peut mentionner certains termes sans que l'article entier leur soit consacré. Aussi l'exploration a-t-elle été complétée par diverses autres sources déjà mentionnées et par l'interrogation de ProdInra.

Il s'avère de fait assez difficile de situer les recherches de l'Inra parmi l'ensemble des recherches mondiales portant sur la filière céréales en raison de l'importante longueur de celle-ci. En effet peu de mots clés sont pertinents pour repérer la diversité des investigations menées dans toute la filière. Aussi est-il délicat de positionner l'Inra dans les travaux internationaux portant sur les céréales si on considère l'ensemble de la chaîne du gène aux nutriments ; cette opération est plus aisée pour un domaine plus restreint. Par ailleurs, bien que le WoS soit très souvent utilisé comme source de base pour répertorier les articles scientifiques de qualité portant sur tel ou tel thème, le secteur agricole et alimentaire y paraît un parent pauvre : en première approche, en 2010-2013 seulement 3% des articles présents paraissent porter sur ce domaine.

Enfin il ne faut pas oublier qu'une part notable des travaux n'est pas répertoriée dans le WoS et relativement mal dans le présent inventaire alors qu'elle peut avoir des retombées importantes. Il ne s'agit pas seulement de investigations non divulguées conduites dans le secteur privé, mais aussi des articles ou ouvrages destinés à un public plus large que le lectorat scientifique pointu, des rapports gouvernementaux ou intergouvernementaux, des analyses de cabinets de consultants, des rapports d'activité et d'orientation des firmes, des études publiées par diverses agences, des travaux conduits par des associations professionnelles ou des ONG, des communications à des colloques sans actes référencés, des conférences, etc. Ces supports peuvent avoir des impacts importants car ils touchent parfois un public assez large, surtout quand ils bénéficient d'une bonne couverture médiatique. Aussi serait-il utile d'accorder plus de considération à des publications et activités non répertoriées dans le WoS, mais susceptibles d'atteindre un cercle bien plus large qu'une poignée de spécialistes d'un domaine pointu. Peut-être faudrait-il aussi diffuser davantage de communiqués de presse suite aux publications des chercheurs INRA ? Les activités des scientifiques en matière de transmission des connaissances et participation aux débats publics (au sens large) gagneraient également à être mieux reconnues et valorisées pour être plus nombreuses et plus

² Les keywords-plus sont créés par Thomas Reuters à partir des titres des articles cités en références bibliographiques

conséquentes. En effet la recherche publique repose sur un financement public qui suppose implicitement que la société civile soutient les recherches menées et leurs orientations. Or la méconnaissance et les questionnements, voire la perplexité, à leur sujet paraissent assez fréquents dans la population.

Fuglie, K. O., & Toole, A. A. (2014). The Evolving Institutional Structure of Public and Private Agricultural Research. *American Journal of Agricultural Economics*, January 2014, pp. 1–22. doi: 10.1093/ajae/aat107

Guillou M, Guyomard H., Huyghe C., Peyraud JL. (2013). *Le projet agro-écologique : vers des agricultures doublement performantes pour concilier compétitivité et respect de l'environnement. Propositions pour le Ministre*. Agreenium, Inra, Paris, mai 2013.

Guyomard H., Huyghe C., Peyraud JL, Coudurier B., Jeuland F., Urruty N., Groupes Filières de l'Inra (2013). *Le projet agro-écologique : vers des agricultures doublement performantes pour concilier compétitivité et respect de l'environnement ; déclinaison pour quelques orientations productives*. Inra, mai 2013.

Fig. 4. Répartition des dépenses de recherche agricole publiques et privées selon les secteurs aux États-Unis (Fuglie, Toole, 2014).

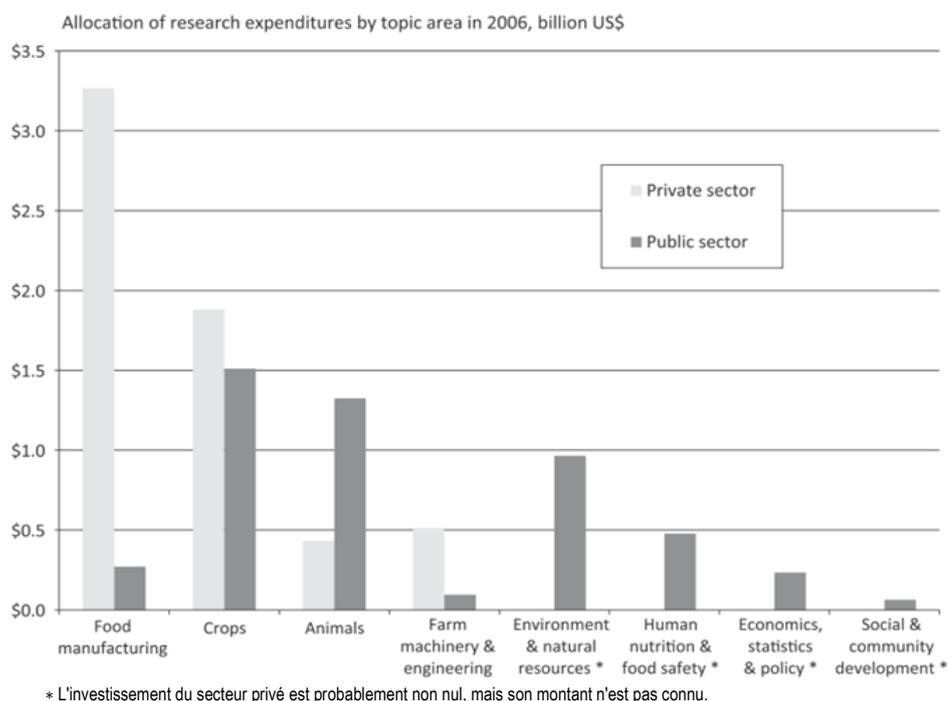


Fig. 5. Evolution des investissements publics et privé en R&D en agriculture aux États-Unis depuis le début du 20^{ème} siècle (la R&D privée portant sur la transformation des aliments n'est pas comptabilisée) (Fuglie, Toole, 2014).

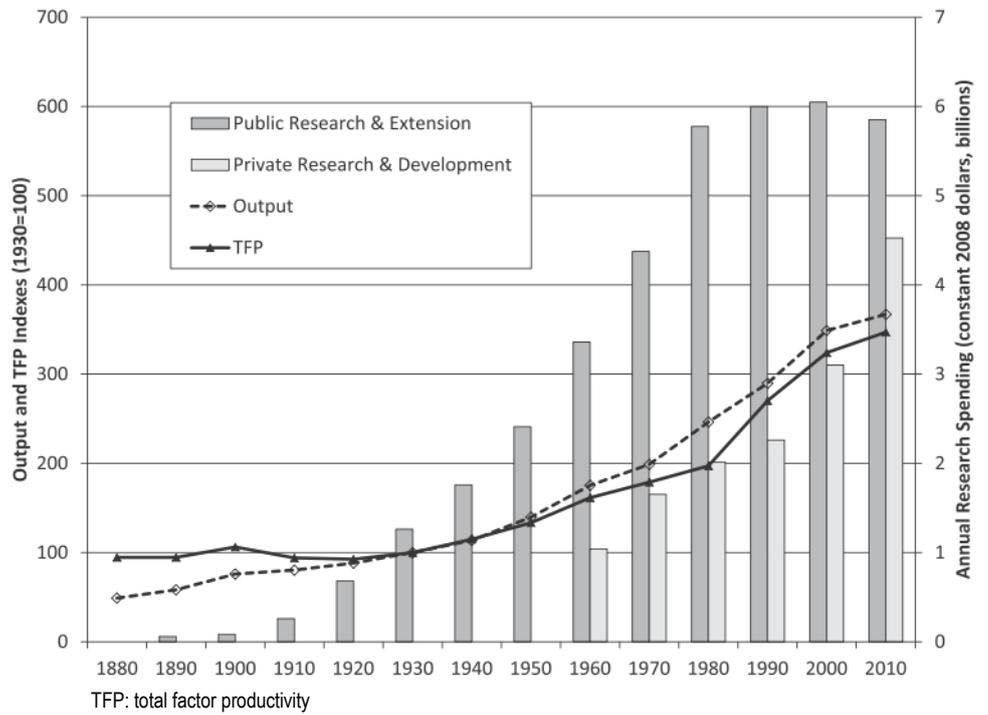
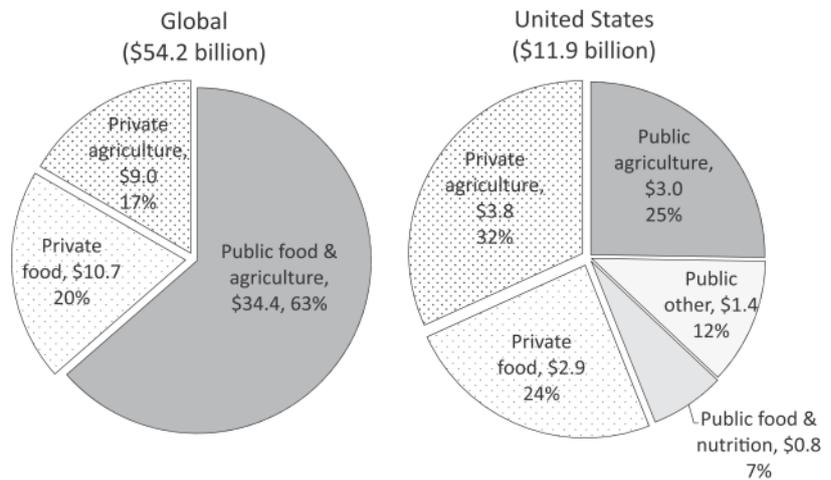


Fig. 6. Montant des dépenses en recherche publique et privée pour l'agriculture et l'alimentation dans le monde et aux États-Unis en 2008 (Fuglie, Toole, 2014).



Références bibliographiques

Références Bibliographiques Chapitre 1 « Génétique et amélioration des céréales »

- Allard, Vincent; Martre, Pierre; Le Gouis, Jacques (2013) Genetic variability in biomass allocation to roots in wheat is mainly related to crop tillering dynamics and nitrogen status. *EUROPEAN JOURNAL OF AGRONOMY* Volume: 46 Pages: 68-76 DOI: 10.1016/j.eja.2012.12.004
- Bouchet S, Servin B, Bertin P, Madur D, Combes V, et al. (2013) Adaptation of Maize to Temperate Climates: Mid-Density Genome-Wide Association Genetics and Diversity Patterns Reveal Key Genomic Regions, with a Major Contribution of the Vgt2 (ZCN8) Locus. *PLoS ONE* 8(8): e71377. doi:10.1371/journal.pone.0071377
- Chelaifa, Houda; Chague, Veronique; Chalabi, Smahane; et al. (2013) Prevalence of gene expression additivity in genetically stable wheat allohexaploids. *NEW PHYTOLOGIST* Volume: 197 Issue: 3 Pages: 730-736 DOI: 10.1111/nph.12108
- Feuillet, C; Stein, N; Rossini, L ; Praud, S ; Mayer, K ; Schulman, A ; Eversole, K ; Appels, R (2012) Integrating cereal genomics to support innovation in the Triticeae. *FUNCTIONAL & INTEGRATIVE GENOMICS* Volume: 12 Issue: 4 Pages: 573-583 DOI: 10.1007/s10142-012-0300-5
- Groupe céréales (2011) Inscription de 2 variétés pour l'agriculture biologique. Après 10 années d'essais en agriculture biologique (AB) puis 2 années d'expérimentation spéciale VAT du CTPS en agriculture biologique, les variétés (lignées pures) de blé tendre Hendrix et Skerzzo ont été inscrites au catalogue français avec une mention « AB ». Apportant un gain de 10 à 15% de rendement par rapport à Renan, variété la plus cultivée en AB (Agriculture Biologique), leurs performances antérieures obtenues dans le réseau ITAB sont ainsi confirmées. Et, condition indispensable en AB, la bonne qualité boulangère à faible teneur en protéines a été validée sur la récolte 2010. Skerzzo et Hendrix permettent un gain de rendement significatif par rapport à Renan (obtention INRA 1988), la variété de blé tendre la plus cultivée en agriculture biologique (30 % de la sole), tout en ayant une valeur en panification équivalente à celle de Renan.
- Martin W. Ganai, Gregor Durstewitz, Andreas Polley, Aurélie Bérard, Edward S. Buckler, Alain Charcosset, Joseph D. Clarke, Eva-Maria Graner, Mark Hansen, Johann Joets, Marie-Christine Le Paslier, Michael D. McMullen, Pierre Montalent, Mark Rose, Chris-Carolin Schön, Qi Sun, Hildrun Walter, Olivier C. Martin, Matthieu Falque (2011) A Large Maize (*Zea mays* L.) SNP Genotyping Array: Development and Germplasm Genotyping, and Genetic Mapping to Compare with the B73 Reference Genome. *PLOS ONE* Volume: 6 Issue: 12 Article Number: e28334 DOI: 10.1371/journal.pone.0028334
- A. Larièpe*, B. Mangin, S. Jasson, V. Combes*, F. Dumas*, P. Jamin*, C. Lariagon*, D. Jolivot*, D. Madur*, J. Fiévet*, A. Gallais*, P. Dubreuil†, A. Charcosset*, 1 and L. Moreau* (2012) The Genetic Basis of Heterosis: Multiparental Quantitative Trait Loci Mapping Reveals Contrasted Levels of Apparent Overdominance Among Traits of Agronomical Interest in Maize (*Zea mays* L.) *GENETICS* 190(2), p. 795-U835 DOI: 10.1534/genetics.111.133447
- Leroy P, Guilhot N, Sakai H, Bernard A, Choulet F, Theil S, Reboux S, Amano N, Flutre T, Pelegri C, Ohyanagi H, Seidel M, Giacomoni F, Reichstadt M, Alaux M, Gicquello E, Legeai F, Cerutti L, Numa H, Tanaka T, Mayer K, Itoh T, Quesneville H, Feuillet C. (2012) TriAnnot: A Versatile and High Performance Pipeline for the Automated Annotation of Plant Genomes. *Front Plant Sci.* 2012 Jan 31;3:5. doi: 10.3389/fpls.2012.00005.
- Merlino, Marielle; Bousbata, Sabrina; Svensson, Birte; et al. (2012) Proteomic and genetic analysis of wheat endosperm albumins and globulins using deletion lines of cultivar Chinese Spring *THEORETICAL AND APPLIED GENETICS* Volume: 125 Issue: 7 Pages: 1433-1448 DOI: 10.1007/s00122-012-1924-5
- Oury, FX ; Godin, C ; Mailliar, A; Chassin, A ; Gardet, O; Giraud, A; Heumez, E; Morlais, JY; Rolland, B; Rousset, M; Trottet M ; Charmet, G (2012) A study of genetic progress due to selection reveals a negative effect of climate change on bread wheat yield in France. *EUROPEAN JOURNAL OF AGRONOMY* 40: 28-38 DOI: 10.1016/j.eja.2012.02.007
- Paux, E ; Sourdille, P ; Mackay, I ; Feuillet, C (2012) Sequence-based marker development in wheat: Advances and applications to breeding. *BIOTECHNOLOGY ADVANCES* Volume: 30 Issue: 5 Special Issue: SI Pages: 1071-1088 DOI: 10.1016/j.biotechadv.2011.09.015
- Plessis, Anne; Ravel, Catherine; Bordes, Jacques; et al. (2013) Association study of wheat grain protein composition reveals that gliadin and glutenin composition are trans-regulated by different chromosome regions. *JOURNAL OF EXPERIMENTAL BOTANY* Volume: 64 Issue: 12 Pages: 3627-3644 DOI: 10.1093/jxb/ert188
- R. Rincent, D. Laloë, S. Nicolas, T. Altmann, D. Brunel, P. Revilla, V.M. Rodríguez, J. Moreno-Gonzalez, A. Melchinger, E. Bauer, C-C. Schoen, N. Meyer, C. Giauffret, C. Bauland, P. Jamin, J. Laborde, H. Monod, P. Flament, A. Charcosset, and L. Moreau (2012) Maximizing the Reliability of Genomic Selection by Optimizing the Calibration Set of Reference Individuals:

Comparison of Methods in Two Diverse Groups of Maize Inbreds (*Zea mays* L.) GENETICS Volume: 192 Issue: 2 Pages: 715-+ DOI: 10.1534/genetics.112.141473

-Rousset, Michel; Bonnin, Isabelle; Remoue, Carine; et al. (2011) Deciphering the genetics of flowering time by an association study on candidate genes in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) THEORETICAL AND APPLIED GENETICS Volume: 123 Issue: 6 Pages: 907-926 DOI: 10.1007/s00122-011-1636-2

-Storlie, Eric; Charmet, Gilles (2013) Genomic Selection Accuracy using Historical Data Generated in a Wheat Breeding Program. PLANT GENOME Volume: 6 Issue: 1 DOI: 10.3835/plantgenome2013.01.000

-M. Truntzler, N. Ranc, M. C. Sawkins, S. Nicolas, D. Manicacci, D. Lespinasse, V. Ribière, P. Galaup, F. Servant, C. Muller, D. Madur, J. Betran, A. Charcosset, L. Moreau (2012) Diversity and linkage disequilibrium features in a composite public/private dent maize panel: consequences for association genetics as evaluated from a case study using flowering time. THEORETICAL AND APPLIED GENETICS Volume: 125 Issue: 4 Pages: 731-747 DOI: 10.1007/s00122-012-1866-y

-Wei, Le; Muranty, Helene; Zhang, Huaigang (2011) Advances and Prospects in Wheat Eyespot Research: Contributions from Genetics and Molecular Tools JOURNAL OF PHYTOPATHOLOGY Volume: 159 Issue: 7-8 Pages: 457-470 DOI: 10.1111/j.1439-0434.2011.01795.x

-Welcker, C; Sadok, W; Dignat, G; Renault, M; Salvi, S; Charcosset, A; Tardieu, F (2011) A Common Genetic Determinism for Sensitivities to Soil Water Deficit and Evaporative Demand: Meta-Analysis of Quantitative Trait Loci and Introgression Lines of Maize. PLANT PHYSIOLOGY Volume: 157 Issue: 2 Pages: 718-729 DOI: 10.1104/pp.111.176479

Références bibliographiques Chapitre 2 « Itinéraires techniques, systèmes de production et changement de pratiques des agriculteurs »

-Akplogan, M., de Givry, S., Metivier, J.-P., Quesnel, G., Joannon, A., Garcia, F., 2013. SOLVING THE CROP ALLOCATION PROBLEM USING HARD AND SOFT CONSTRAINTS. RAIRO-Oper. Res. 47, 151–172. doi:10.1051/ro/2013032

-Amossé C., Jeuffroy M.-H., Celette F., David C.; 2013. Relay intercropping of legume cover crops in organic winter wheat: Effects on performance and resource availability. Field Crops Research 145: 78-87.

-Aubertot J.-N., Robin M.-H., 2013. Injury Profile SIMulator, a Qualitative Aggregative Modelling Framework to Predict Crop Injury Profile as a Function of Cropping Practices, and the Abiotic and Biotic Environment. I. Conceptual Bases. Plos One, 8, article 73202

-Baccar R., Fournier C., Dornbusch, T., Andrieu B, Gouache D, Robert C., 2011. Modelling the effect of wheat canopy architecture as affected by sowing density on Septoria tritici epidemics using a coupled epidemic-virtual plant model. Annals of Botany 108: 1179-1194.

-Bedoussac, L., Justes E.; 2011. A comparison of commonly used indices for evaluating species interactions and intercrop efficiency: Application to durum wheat-winter pea intercrops. Field Crops Research 124(1): 25-36

-Belhouchette, H., Louhichi, K., Therond, O., Mouratiadou, I., Wery, J., van Ittersum, M., Flichman, G., 2011. Assessing the impact of the Nitrate Directive on farming systems using a bio-economic modelling chain. Agric. Syst. 104, 135–145. doi:10.1016/j.agsy.2010.09.003

-Bertheloot J., Andrieu B., Martre P, 2012. Light-nitrogen relationships within reproductive wheat canopy are modulated by plant modular organization. European Journal of Agronomy 42: 11-21.

-Berthet, E.T.A., Bretagnolle, V., Segrestin, B., 2012. Analyzing the Design Process of Farming Practices Ensuring Little Bustard Conservation: Lessons for Collective Landscape Management. J. Sustain. Agric. 36, 319–336. doi:10.1080/10440046.2011.627988

-Clavel, L., Soudais, J., Baudet, D., Leenhardt, D., 2011. Integrating expert knowledge and quantitative information for mapping cropping systems. LAND USE POLICY 28, 57–65. doi:10.1016/j.landusepol.2010.05.001

-Dawson, J.C., Serpolay, E., Giuliano, S., Schermann, N., Galic, N., Berthelot, J.-F., Chesneau, V., Ferte, H., Mercier, F., Osman, A., Pino, S., Goldringer, I., 2013. Phenotypic diversity and evolution of farmer varieties of bread wheat on organic farms in Europe. Genet. Resour. CROP Evol. 60, 145–163. doi:10.1007/s10722-012-9822-x

-Dawson, J.C., Serpolay, E., Giuliano, S., Schermann, N., Galic, N., Chable, V., Goldringer, I., 2012. Multi-trait evolution of farmer varieties of bread wheat after cultivation in contrasting organic farming systems in Europe. GENETICA 140, 1–17. doi:10.1007/s10709-012-9646-9

- Delmotte, S., Lopez-Ridaura, S., Barbier, J.-M., Wery, J., 2013. Prospective and participatory integrated assessment of agricultural systems from farm to regional scales: Comparison of three modeling approaches. *J. Environ. Manage.* 129, 493–502. doi:10.1016/j.jenvman.2013.08.001
- Delmotte, S., Tiftonell, P., Mouret, J.-C., Hammond, R., Lopez-Ridaura, S., 2011. On farm assessment of rice yield variability and productivity gaps between organic and conventional cropping systems under Mediterranean climate. *Eur. J. Agron.* 35, 223–236. doi:10.1016/j.eja.2011.06.006
- Dufour L., Metay A., Talbot G., Dupraz C.; 2013. Assessing Light Competition for Cereal Production in Temperate Agroforestry Systems using Experimentation and Crop Modelling. *Journal of Agronomy and Crop Science* 199(3): 217-227.
- Dury, J., Garcia, F., Reynaud, A., Bergez, J.-E., 2013. Cropping-plan decision-making on irrigated crop farms: A spatio-temporal analysis. *Eur. J. Agron.* 50, 1–10. doi:10.1016/j.eja.2013.04.008
- Dury, J., Schaller, N., Garcia, F., Reynaud, A., Bergez, J.E., 2012. Models to support cropping plan and crop rotation decisions. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 567–580. doi:10.1007/s13593-011-0037-x
- Gosme M., Villemandy M. de, Bazot M., Jeuffroy M.-H., 2012. Local and neighbourhood effects of organic and conventional wheat management on aphids, weeds, and foliar diseases. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 161: 121-12
- Hossard, L., Jeuffroy, M.H., Pelzer, E., Pinochet, X., Souchere, V., 2013. A participatory approach to design spatial scenarios of cropping systems and assess their effects on phoma stem canker management at a regional scale. *Environ. Model. Softw.* 48, 17–26. doi:10.1016/j.envsoft.2013.05.014
- Jeuffroy M.-H., Casadebaig P., Debaeke P., Loyce C., Meynard J.-M., 2014. Agronomic model uses to predict cultivar performance in various environments and cropping systems. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 34:121–137
- Kelemen, E., Nguyen, G., Gomiero, T., Kovacs, E., Choisis, J.-P., Choisis, N., Paoletti, M.G., Podmaniczky, L., Ryschawy, J., Sarthou, J.-P., Herzog, F., Dennis, P., Balazs, K., 2013. Farmers' perceptions of biodiversity: Lessons from a discourse-based deliberative valuation study. *LAND USE POLICY* 35, 318–328. doi:10.1016/j.landusepol.2013.06.005
- Legrand, A., Gaucherel, C., Baudry, J., Meynard, J.-M., 2011. Long-term effects of organic, conventional, and integrated crop systems on Carabids. *Agron. Sustain. Dev.* 31, 515–524. doi:10.1007/s13593-011-0007-3
- Lucie M., Makowski D. 2013. Comparison of Statistical Models for Analyzing Wheat Yield Time Series. *Plos One* 8, article n° 78615.
- Mailly, F., Delmotte, S., Schaller, N., Mouret, J.-C., Lopez-Ridaura, S., Barbier, J.-M., 2013. A cropping plan decision model in conventional and organic rice cropping systems to predict land use changes under various scenarios: The case of the Camargue Delta, Southern France. *Cah. Agric.* 22, 424–431. doi:10.1684/agr.2013.0662
- Marraccini, E., Rapey, H., Galli, M., Lardon, S., Bonari, E., 2013. Assessing the Potential of Farming Regions to Fulfill Agro-Environmental Functions: A Case Study in Tuscany (Italy). *Environ. Manage.* 51, 759–776. doi:10.1007/s00267-012-9997-0
- Mawois, M., Le Bail, M., Navarrete, M., Aubry, C., 2012. Modelling spatial extension of vegetable land use in urban farms. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 911–924. doi:10.1007/s13593-012-0093-x
- Nesme T., Toublant M., Mollier A., Morel C., Pellerin S., 2012. Assessing phosphorus management among organic farming systems: a farm input, output and budget analysis in southwestern France. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 92 : 225-236
- Pelzer, E., Bazot M., Makowski D., Corre-Hellou G., Naudin C., Al Rifai M., Baranger E., Bedoussac L., Biarnès V., Boucheny P., Carrouée B., Dorvillez D., Foissy D., Gaillard B., Guichard L., Mansard M.C., Omon B., Prieur L., Yvergniaux M., Justes E., Jeuffroy M.H.; 2012. Pea-wheat intercrops in low-input conditions combine high economic performances and low environmental impacts. *European Journal of Agronomy* 40: 39-53.
- Petit, S., Alignier, A., Colbach, N., Joannon, A., Le Coeur, D., Thenail, C., 2013. Weed dispersal by farming at various spatial scales. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 33, 205–217. doi:10.1007/s13593-012-0095-8
- Rizzo, D., Marraccini, E., Lardon, S., Rapey, H., Debolini, M., Benoit, M., Thenail, C., 2013. Farming systems designing landscapes: land management units at the interface between agronomy and geography. *Geogr. Tidsskr.-Dan. J. Geogr.* 113, 71–86. doi:10.1080/00167223.2013.849391
- Robin M.H., Colbach N., Lucas P., Montfort F., Cholez C., Debaeke P., Aubertot J.-N., 2013. Injury Profile SIMulator, a qualitative aggregative modelling framework to predict injury profile as a function of cropping practices, and abiotic and biotic environment. II. Proof of concept: design of IPSIM-Wheat-Eyespot. *PloS ONE*, 8 article 75829.
- Sausse, C., Le Bail, M., Lecroart, B., Remy, B., Messean, A., 2013. How to manage the coexistence between genetically modified and conventional crops in grain and oilseed collection areas? Elaboration of scenarios using role playing games. *LAND USE POLICY* 30, 719–729. doi:10.1016/j.landusepol.2012.05.018

- Schaller, N., Lazrak, E.G., Martin, P., Mari, J.-F., Aubry, C., Benoit, M., 2012. Combining farmers' decision rules and landscape stochastic regularities for landscape modelling. *Landsc. Ecol.* 27, 433–446. doi:10.1007/s10980-011-9691-2
- Senthilkumar K., Nesme T., Mollier A., Pellerin S., 2012. Regional-scale phosphorus flows and budgets within France: the importance of agricultural production systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 92: 145-159.
- Smits, N., Dupraz C., Dufour L.; 2012. Unexpected lack of influence of tree rows on the dynamics of wheat aphids and their natural enemies in a temperate agroforestry system. *Agroforestry Systems* 85: 153-164.
- Therond, O., Hengsdijk, H., Casellas, E., Wallach, D., Adam, M., Belhouchette, H., Oomen, R., Russell, G., Ewert, F., Bergez, J.-E., Janssen, S., Wery, J., Van Ittersum, M.K., 2011. Using a cropping system model at regional scale: Low-data approaches for crop management information and model calibration. *Agric. Ecosyst. Environ.* 142, 85–94. doi:10.1016/j.agee.2010.05.007
- Vasseur, C., Joannon, A., Aviron, S., Burel, F., Meynard, J.-M., Baudry, J., 2013. The cropping systems mosaic: How does the hidden heterogeneity of agricultural landscapes drive arthropod populations? *Agric. Ecosyst. Environ.* 166, 3–14. doi:10.1016/j.agee.2012.08.013

Références bibliographiques Chapitre 3 « Maladies et contaminants des céréales »

Chapitre 3.1 « Maladies des céréales »

- Ali, S., Gautier, A., Leconte, M., Enjalbert, J., de Vallavieille-Pope, C., 2011. A rapid genotyping method for an obligate fungal pathogen, *Puccinia striiformis f.sp. tritici*, based on DNA extraction from infected leaf and Multiplex PCR genotyping. *BMC research notes* 4, 240.
- Azzimonti, G., Lannou, C., Sache, I., Goyeau, H., 2013. Components of quantitative resistance to leaf rust in wheat cultivars: diversity, variability and specificity. *Plant Pathology* (UK),
- Bahri, B., Shah, S.J.A., Hussain, S., Leconte, M., Enjalbert, J., de Vallavieille-Pope, C., 2011. Genetic diversity of the wheat yellow rust population in Pakistan and its relationship with host resistance. *Plant Pathology* (UK) 60, 649-660.
- Bancal, M.O., Hansart, A., Sache, I., Bancal, P., 2012. Modelling fungal sink competitiveness with grains for assimilates in wheat infected by a biotrophic pathogen. *Annals of Botany* (UK). 110, 113-123
- Battaglia, E., Klaubauf, S., Vallet, J., Ribot, C., Lebrun, M.H., de Vries R.P., 2013. Xlr1 is involved in the transcriptional control of the pentose catabolic pathway, but not hemi-cellulolytic enzymes in *Magnaporthe oryzae*. *Fungal Genetics and Biology* (US) IN PRESS.
- Bernard, F., Sache, I., Suffert, F., Chelle, M., 2013. The development of a foliar fungal pathogen does react to leaf temperature! *New Phytologist* (UK). 198, 232-240.
- Caubel, J., Launay, M., Lannou, C., Brisson, N., 2012. Generic response functions to simulate climate-based processes in models for the development of airborne fungal crop pathogens. *Ecological Modelling* (NL) 242, 92-104.
- de Vallavieille-Pope, C., Ali, S., Leconte, M., Enjalbert, J., Delos, M., Rouzet, J., 2012. Virulence dynamics and regional structuring of *Puccinia striiformis f. sp. tritici* in France between 1984 and 2009. *Plant Disease* (US) 96, 131-140.
- Gigot, C., Saint-Jean, S., Huber, H., Kerhornou, B., Maumené, C., Leconte, M., De Vallavieille Pope, C., 2013. Protective effects of a wheat cultivar mixture against splash-dispersed septoria tritici blotch epidemics. *Plant Pathology* (UK) 62, 1011–1019.
- Goyeau, H., Berder, J., Czerepak, C., Gautier, A., Lanen, C., Lannou, C., 2012. Low diversity and fast evolution in the population of *Puccinia triticina* causing durum wheat leaf rust in France from 1999 to 2009, as revealed by an adapted differential set. *Plant Pathology* (UK) 61, 761-772.
- Goyeau, H., Lannou, C., 2011. Specific resistance to leaf rust expressed at the seedling stage in cultivars grown in France from 1983 to 2007. *Euphytica* (NL) 178, 45-62
- Huerta-Espino, J., Singh, R.P., German, S., McCallum, B.D., Park, R.F., Chen, W.Q., Bhardwaj, S.C., Goyeau, H., 2011. Global status of wheat leaf rust caused by *Puccinia triticina*. *Euphytica* (NL) 179 SI, 143-160.
- Kolmer, J.A., Hanzalova, A., Goyeau, H., Bayles, R., Morgounov, A., 2013. Genetic differentiation of the wheat leaf rust fungus *Puccinia triticina* in Europe. *Plant Pathology* (UK) 62, 21-31.
- Lannou, C., 2012. Variation and Selection of Quantitative Traits in Plant Pathogens. *Annual Review of Phytopathology* (US) 50, 319-338

- Leroux, P., Gredt, M., Remuson, F., Micoud, A., Walker, A.S., 2013. Fungicide resistance status in french populations of the wheat eyespot fungi *Oculimacula acuformis* and *Oculimacula yallundae*. *Pest Management Science (UK)* 69, 15-26
- Leroux, P., Walker, A.S., 2011. Multiple mechanisms account for resistance to sterol 14 alpha-demethylation inhibitors in field isolates of *Mycosphaerella graminicola*. *Pest Management Science (UK)* 67, 44-59.
- Mboup, M., Bahri, B., Leconte, M., De Vallavieille-Pope, C., Kaltz, O., Enjalbert, J., 2012. Genetic structure and local adaptation of European wheat yellow rust populations: the role of temperature-specific adaptation. *Evolutionary Applications (UK)* 5, 341-352.
- Paillard, S., Trotoux-Verplancke, G., Perretant, M.R., Mohamadi, F., Leconte, M., Coedel, S., de Vallavieille-Pope, C., Dedryver, F., 2012. Durable resistance to stripe rust is due to three specific resistance genes in french bread wheat cultivar Apache. *Theoretical and Applied Genetics (DE)* 125, 955-965.
- Papaix, J., David, O., Lannou, C., Monod, H., 2013. Dynamics of adaptation in spatially heterogeneous metapopulations. *PLoS One (US)* 8,
- Papaix, J., Goyeau, H., Du Cheyron, P., Monod, H., Lannou, C., 2011. Influence of cultivated landscape composition on variety resistance: an assessment based on wheat leaf rust epidemics. *New Phytologist (UK)* 191, 1095-1107.
- Pariaud, B., Goyeau, H., Halkett, F., Robert, C., Lannou, C., 2012. Variation in aggressiveness is detected among *Puccinia triticina* isolates of the same pathotype and clonal lineage in the adult plant stage. *European Journal of Plant Pathology (NL)* 134, 733-743.
- Pariaud, B., van den Berg, F., van den Bosch, F., Powers, S.J., Kaltz, O., Lannou, C., 2013. Shared influence of pathogen and host genetics on a trade-off between latent period and spore production capacity in the wheat pathogen, *Puccinia triticina*. *Evolutionary Applications (UK)* 6, 303-312.
- Picot, A., Barreau, C., Pinson-Gadais, L., Piraux, F., Caron, D., Lannou, C., Richard-Forget, F., 2011. The dent stage of maize kernels is the most conducive for fumonisin biosynthesis under field conditions. *Appl. Environ. Microbiol.(US)* 77, 8382-8390.
- Picot, A., Hourcade-Marcolla, D., Barreau, C., Pinson-Gadais, L., Caron, D., Richard-Forget, F., Lannou, C., 2012. Interactions between *Fusarium verticillioides* and *Fusarium graminearum* in maize ears and consequences for fungal development and mycotoxin accumulation. *Plant Pathology (UK)* 61, 140-151.
- Raboin, L.M., Ramanantsoanirina, A., Dusserre, J., Razasolofonahary, F., Tharreau, D., Lannou, C., Sester, M., 2012. Two-component cultivar mixtures reduce rice blast epidemics in an upland agrosystem. *Plant Pathology (UK)* 61, 1103-1111
- Ribot, C., Cesari, S., Abidi, I., Chalvon, V., Bournaud, C., Vallet, J., Lebrun, M.H., Morel, J.B., Kroj, T., 2013. The *Magnaporthe oryzae* effector AVR1CO39 is translocated into rice cells independently of a fungal-derived machinery. *Plant Journal (UK)* 74, 1-12.
- Sapoukhina, N., Paillard, S., F., D., de Vallavieille-Pope, C., 2013. Quantitative plant resistance in cultivar mixtures: wheat yellow rust as a modeling case study. *New Phytologist (UK)*, 200 (3) 888-897.
- Slimane, R.B., Bancal, P., Suffert, F., Bancal, M.O., 2012. Localized Septoria leaf blotch lesions in winter wheat flag leaf do not accelerate apical senescence during the necrotrophic stage. *Journal of Plant Pathology "Rivista di patologia vegetale" (IT)* 94, 543-553.
- Suffert, F., Sache, I., 2011. Relative importance of different types of inoculum to the establishment of *Mycosphaerella graminicola* in wheat crops in north-west Europe. *Plant Pathology (UK)*, 878-889.
- Suffert, F., Sache, I., Lannou, C., 2011. Early stages of *Septoria tritici* blotch epidemics of winter wheat: build-up, overseasoning, and release of primary inoculum. *Plant Pathology (UK)* 60, 166-177.
- Suffert, F., Sache, I., Lannou, C., 2013. Assessment of quantitative traits of aggressiveness in *Mycosphaerella graminicola* on adult wheat plants. *Plant Pathology (62)*: 1330–1341. doi: 10.1111/ppa.12050
- Van den Berg, F., Bacaer, N., Metz, J.A.J., Lannou, C., van den Bosch, F., 2011. Periodic host absence can select for higher or lower parasite transmission rates *Evolutionary Ecology (NL)* 25, 121-137.
- Walker, A.S., Bouguennec, A., Confais, J., Morgant, G., Leroux, P., 2011. Evidence of host-range expansion from new powdery mildew (*Blumeria graminis*) infections of triticale (*xTriticosecale*) in France. *Plant Pathology (UK)* 60, 207-220.
- Wicker, T., Oberhaensli, S., Parlange, F., Buchmann, J.P., Shatalina, M., Roffler, S., Ben-David, R., Dolezel, J., Simkova, H., Schulze-Lefert, P., Spanu, P.D., Bruggmann, R., Amselem, J., Quesneville, H., van Themaat, E.V.L., Paape, T., Shimizu, K.K., Keller, B., 2013. The wheat powdery mildew genome shows the unique evolution of an obligate biotroph. *Nature Genetics (US) Online*, 7 p. <http://dx.doi.org/10.1038/ng.2704>.

Chapitre 3.2 « Mycotoxines et contaminants »

- Atanasova-Penichon V., Pons S., Pinson-Gadais L., Picot A., Marchegay G., Bonnin Verdal MN, Ducos C., Barreau C., Roucolle J., Sehabiague P., Carolo P., Richard-Forget F., 2012. Chlorogenic acid and maize ear rot resistance: A dynamic study investigating *Fusarium graminearum* development, deoxynivalenol production, and phenolic acid accumulation. *MPMI*, 25 (12), 1605-1616.
- Berthiller, F; Crews, C; Dall'Asta, C; De Saeger, S; Haesaert, G; Karlovsky, P; Oswald, I; Seefelder, W; Speijers, G; Stroka, J. (2013) Masked mycotoxins: A review. *Molecular nutrition & food research* 57 (1): 165-186
- Bracarense, APFL; Luciola, J; Grenier, B; Pacheco, GD ; Moll, WD Schatzmayr, G Oswald, I (2012) Chronic ingestion of deoxynivalenol and fumonisin, alone or in interaction, induces morphological and immunological changes in the intestine of piglets. *British journal of nutrition* 107 (12): 1776-1786
- Broyde H., Dore T., 2013. Effects of cropping systems on food and feed contamination by *Fusarium* and *Aspergillus* mycotoxins. *CAHIERS AGRICULTURES*, 22(3), 182-194.
- Burel, C ; Tanguy, M ; Guerre, P ; Boilletot, E ; Cariolet, R ; Queguiner, M ; Postollec, G ; Pinton, P ; Salvat, G ; Oswald, I ; Fravallo, P . (2013) Effect of Low Dose of Fumonisin on Pig Health: Immune Status, Intestinal Microbiota and Sensitivity to Salmonella. *Toxins* 5 (4): 841-864
- Canlet C, Tremblay-Franco M, Gautier R, Molina J, Métais B, Blas-Y Estrada F, **Gamet-Payraastre L**. Specific metabolic fingerprint of a dietary exposure to a very low dose of endosulfan. *J Toxicol*. 2013 ID 545802
- Cano, P; Seeboth, J ; Meurens, F ; Cognie, J ; Abrami, R ; Oswald, I ; Guzylack-Piriou, L (2013) Deoxynivalenol as a New Factor in the Persistence of Intestinal Inflammatory Diseases: An Emerging Hypothesis through Possible Modulation of Th17-Mediated Response. *PLOS ONE* 8- 1 Article Number: e53647
- Cardiet G., Fuzeau B., Barreau C., Fleurat-Lessard F. (2012) Contact and fumigant toxicity of some essential oil constituents against a grain insect pest *Sitophilus oryzae* and two fungi, *Aspergillus westerdijkiae* and *Fusarium graminearum*. *Journal of Pest Science* 85(3): 351-358.
- Cornu J-Y., Schneider A., Jezequel K., Denaix L. (2011) Modelling the complexation of Cd in soil solution at different temperatures using the UV-absorbance of dissolved organic matter. *Geoderma*, 162, 65-70.
- Crepet A., Heraud F., Bechaux C., Gouze M.E., Pierlot S., Fastier A., Leblanc J.Ch., Le Hégarat L., Takakura N., Fessard V., Tressou J., Maximilien R., de Sousa G., Nawaz A., Zucchini-Pascal N., Rahmani R., Audebert M., Graillot V., Cravedi J.P., 2013. The PERICLES research program: an integrated approach to characterize the combined effects of mixtures of pesticide residues to which the French population is exposed. *Toxicology*, 313(2-3):83-93.
- Dalie D., Pinson-Gadais L., Atanasova-Penichon V., Marchegay G., Barreau C., Deschamps A., Richard-Forget F. (2012). Impact Of *Pediococcus Pentosaceus* Strain L006 And Its Metabolites On Fumonisin Biosynthesis By *Fusarium Verticillioides*. *Food Control*, 23(2), 405-411.
- Demur C, Métais B, Canlet C, Tremblay-Franco M, Gautier R, Blas-Y-Estrada F, Sommer C, **Gamet-Payraastre L**. Dietary exposure to a low dose of pesticides alone or as a mixture: the biological metabolic fingerprint and impact on hematopoiesis. *Toxicology*. 2013 7;308:74-87.
- Grenier, B ; Bracarense, APFL ; Schwartz, HE ; Luciola, J ; Cossalter, AM ; Moll, WD ; Schatzmayr, G ; Oswald, I. (2013) Biotransformation Approaches To Alleviate the Effects Induced by *Fusarium* Mycotoxins in Swine. *Journal of agricultural and food chemistry* 61(27): 6711-6719
- Grenier, B; Bracarense, APFL; Schwartz, HE; Trumel, C ; Cossalter, AM ; Schatzmayr, G; Kolf-Clauw, M; Moll, WD; Oswald, I. (2012) The low intestinal and hepatic toxicity of hydrolyzed fumonisin B-1 correlates with its inability to alter the metabolism of sphingolipids. *Biochemical pharmacology* 83(10): 1465-1473
- Hao C., Wang Y., Hou J., Feuillet C., Balfourier F., Zhang X., 2012. Association Mapping and Haplotype Analysis of a 3.1-Mb Genomic Region Involved in *Fusarium* Head Blight Resistance on Wheat Chromosome 3BS. *PLOS One*, 7(10), e46444.
- Leplat J., Friberg H., Abid M., Steinberg C., 2013. Survival Of *Fusarium Graminearum*, The Causal Agent Of *Fusarium* Head Blight. A Review. *Agronomy For Sustainable Development*. 33 (1), 97-111.
- Merhej J., Richard-Forget F., Barreau C., (2011). Regulation of Trichothecene Biosynthesis In *Fusarium*: Recent Advances And New Insights. *Applied Microbiology And Biotechnology*, 91 (3): 519-528.
- Merhej J., Urban M., Dufresne M., Hammonnd-Kosack K.E., Richard-Forget F., Barreau C. (2012) The Velvet Gene *Fgve1* Affects Fungal Development And Positively Regulates Trichothecene Biosynthesis And Pathogenicity In *Fusarium Graminearum*. *Molecular Plant Pathology*, 13(4), 363-374.

- Picot A., Atanasova-Penichon V., Pons S., Marchegay G., Barreau C., Pinson-Gadais L., Roucolle J., Daveau F., Caron D., Richard-Forget, 2013. Maize Kernel Antioxidants And Their Potential Involvement In Fusarium Ear Rot Resistance. *J Agric Food Chem*, 61(14), 3389-3395.
- Picot A., Barreau C., Pinson-Gadais L., Piraux F., Caron D., Lannou C., Richard-Forget F., 2011. The Dent Stage Of Maize Kernels Is The Most Conducive For Fumonisin Biosynthesis Under Field Conditions. *Applied And Environmental Microbiology*, 77(23), 8382-8390.
- Picot A., Hourcade-Marcolla D., Barreau C., Pinson-Gadais L., Caron D., Richard-Forget F., Lannou C. (2012). Interactions between fusarium verticillioides and fusarium graminearum in maize ears and consequences for fungal development and mycotoxin accumulation. *plant pathology*, 61(1), 140-151.
- Redjala, T., Zelko, I., Sterckeman, T., Legue, V., Lux, A., 2011. Relationship between root structure and root cadmium uptake in maize. *Environmental and Experimental Botany*, 71 (2) : 241-248.
- Schneider A., Nguyen C. (2011) Use of an exchange method to estimate the association and dissociation rate constants of Cd complexes formed with low-molecular-weight organic acids commonly exuded by plant roots, *Journal of the Environmental Quality*, 2013 40(6):1857-62.
- Siu D., Gelisse S., Laval V., Repinçay C., Suffert F., Lannou C., 2013. Effect of wheat spike infection timing on Fusarium head blight development and mycotoxin accumulation. *Plant Pathology*, Doi: 10.1111/ppa.12106
- Sivry Y., Riotte J., Sappin-Didier V., Munoz M., Redon P-O., Denaix L., Dupre B. (2011). Multielementary (Cd, Cu, Pb, Zn, Ni) Stable Isotopic Exchange Kinetic (SIEK) Method To Characterize Polymetallic Contaminations. *Environmental Science & Technology*, 45(15), 6247-6253.

Références internationales Chapitre 3.2. Mycotoxines

- Kollers S., Rodemann B., Ling J., Korzun V., Ebmeyer E., Argilier O., Hinze M., Plieske J., Kulosa D., Ganal M., Roder M., 2013. Whole genome association mapping of Fusarium Head Blight Resistance in European Winter Wheat. *Plos One*, 8(2), e57500.
- Li ZM, Ding JQ, Wang RX, Chen JF, Sun XD, Chen W, Song WB, Dong HF, Dai XD, Xia ZL, Wu JY, 2011. A new QTL for resistance to Fusarium ear rot in maize. *J appl genet*, 52(4), 403-406.
- Ruan, YF, Comeau, A, Langevin, F, Hucl, P, Clarke, JM, Brule-Babel, A Pozniak, CJ, 2012. Identification of novel QTL for resistance to Fusarium head blight in a tetraploid wheat population. *Genome*, 55(12), 853-864.
- Zhuang Y., Gala A., Yang Y., 2013. Identification of functional genic components of Major Fusarium head blight resistance quantitative trait loci in wheat cultivar sumai 3. *MPMI*, 26(4), 442-450.
- Juan C., Ritieni A., Manes J., 2013. Occurrence of Fusarium mycotoxins in Italian cereal and cereal products from organic farm. *Food Chemistry*, 141, 1747-1755.
- Tangni EK, Pusselier L., Schneider YJ, Larondelle Y., 2013. Mycotoxines dans les céréales et produits dérivés : revue de la littérature sur les filières biologiques et conventionnelles en Europe. *Cahiers agricultures*, 22(3), 152-164.
- Rubert J., Soriano J.M., Soler C., 2013. Occurrence of fumonisins in organic and conventional cereal-based products commercialized in France, Germany and Spain. *Food and Chemical Toxicology*, 56, 387-391.
- Kriszt, R, Krifaton, C, Szoboszlay, S, Cserhati, M, Kriszt, B, Kukolya, J, Czeh, A, Feher-Toth, S, Torok, L, Szoke, Z, Kovacs, KJ, Barna, T, Ferenczi, S, 2012. A New Zearalenone biodegradation Strategy Using Non-Pathogenic *Rhodococcus pyridinivorans* K408 Strain. *Plos one*, 7(9), e43608.
- Van der Fels-Klerx HJ, van Asselt ED, Madsen MS, Olesen JE (2013) Impact of Climate Change Effects on Contamination of Cereal Grains with Deoxynivalenol. *PLoS ONE* 8(9): e73602
- Fleurat-Lessard F. (2013). Les freins à la diversification des productions d'oléo-protéagineux et de céréales au niveau des entreprises de collecte, stockage et mise en marché. *OCL* 2013, 20(4) D406.

Références bibliographiques Chapitre 4. « Transformation, nutrition, alimentation »

- Branlard G, Lesage VS, Bancel E, Martre P, Méleard B, Rhazi L 2013b Coping with wheat quality in a changing environment - Proteomics evidence for stress caused by environmental changes. In "Proceedings of the 12th International Wheat Genetics Symposium" Yokohama, Japon, 8-14 septembre 2013, in press.
- Branlard, G, Méleard B, Oury FX, Rhazi L, Boinot N, et al. 2013a, Compréhension du rapport Ténacité/ Extensibilité et du volume du pain in : « Synthèse du programme de recherche FSOV , actes de la rencontre scientifique 15 mars 2013, Paris, 18-26.
- Brouns, F., Hemery, Y., Price, R. and Anson, N. M. (2012). Wheat aleurone: Separation, composition, health aspects, and potential food use. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 52: 553-568.
- Charmet, G., Perretant, M. R. and Ravel, C. (2012). Variabilité génétique et environnementale de la teneur des blés en nutriments. *Innovations Agronomiques* 19: 27-36.
- Chichtl E., George M., Delenne J. Y., Lullien-Pellerin V. 2013. Nano-mechanical properties of wheat grain polymers determined using atomic force microscopy. *Europ Polymer J* 49, 3788-95.
- Corol, D.-I., Ravel, C., Raksegi, M., Bedo, Z., Charmet, G., Beale, M. H., Shewry, P. R. and Ward, J. L. (2012). Effects of genotype and environment on the contents of betaine, choline, and trigonelline in cereal grains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 60: 5471-5481.
- Delcour, J. A., Rouau, X., Courtin, C. M., Poutanen, K. and Ranieri, R. (2012). Technologies for enhanced exploitation of the health-promoting potential of cereals. *Trends in Food Science and Technology*.
- Denery-Papini, S., et al., Allergy to deamidated gluten in patients tolerant to wheat: specific epitopes linked to deamidation. *Allergy*, 2012. 67(8): p. 1023-32.
- Denery-Papini, S., et al., Immunoglobulin-E-binding epitopes of wheat allergens in patients with food allergy to wheat and in mice experimentally sensitized to wheat proteins. *Clinical and Experimental Allergy*, 2011. 41(10): p. 1478-1492.
- EFSA, P. o. D. P., Nutrition and Allergies (NDA) (2011). Scientific opinion on the substantiation of a health claim related to barley beta-glucans and lowering of blood cholesterol and reduced risk of (coronary) heart disease pursuant to article 14 of regulation (ec) no 1924/2006 European Food Safety Authority Journal 9: 2471.
- Elmorjani, K., Geneix, N., Dalgalarondo, M., Branlard, G. and Marion, D. (2013). Wheat grain softness protein (gsp1) is a puroindoline-like protein that displays a specific post-translational maturation and does not interact with lipids. *Journal of Cereal Science* 58: 117-122.
- Fardet, A. (2010). New hypotheses for the health-protective mechanisms of whole-grain cereals: What is beyond fibre? *Nutrition Research Reviews* 23: 65-134.
- Gadonna-Widehem, P., Debiton, C., Marier, D., Rhazi, L. and Branlard, G. (2012). A laboratory protocol for determining glucose and maximum ethanol production from wheat grain: Application to a complete genetic set of near-isogenic waxy lines. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 60: 985-990.
- Gourbeyre, P., et al., Wheat gliadins modified by deamidation are more efficient than native gliadins in inducing a Th2 response in Balb/c mice experimentally sensitized to wheat allergens. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2012. 56(2): p. 336-344.
- Guessasma S., Chaunier L., Della Valle G., Lourdin D.. 2011. Mechanical modelling of cereal solid foods. *Trends in Food Science and Technology*, 22, 142-153,
- Guessasma S., Hedjazi L.. 2012 On the fragmentation of airy cereal products exhibiting a cellular structure: mechanical characterization and 3D finite element computation. *Food Res.Intern.* 49, 242-252.
- Hedjazi L., Martin C.L., Guessasma S., Della Valle G., Dendievel R... 2012. Application of the discrete element method to crack propagation and crack branching in a vitreous dense biopolymer material. *Intern. J. of Solids and Structures.* 49,1893-1899.
- Larre, C., et al., Assessment of allergenicity of diploid and hexaploid wheat genotypes: Identification of allergens in the albumin/globulin fraction. *Journal of Proteomics*, 2011. 74(8): p. 1279-1289.
- Lasme P., Oury FX, Michelet C., Abecassis J., Mabile F., Bar-L'Helgouac'h C., Lullien-Pellerin V. 2012. A study of puroindoline b involvement in the milling behavior of hard type common wheats. *Cereal Chem* 89, 44-51

- Lesage VS, Bouchet B, Rhazi L, Elmorjani K, Branlard G, Marion D. 2011. New insight into puroindoline function inferred from their subcellular localization in developing hard and soft near-isogenic endosperm and their relationship with polymer size of storage proteins. *J. Cereal Sci.*, 53, 231-238.
- Lesage VS, Merlino M, Chambon C, Bouchet B, Marion D, Branlard G. 2012. Proteomes of hard and soft near-isogenic wheat lines reveal that kernel hardness is related to the amplification of a stress response during endosperm development. *J. Exp. Bot.* 63 (2), 1001-1011.
- Li X., M. Alamir and E. Witrant, G. Della Valle, O. Rouaud, L. Boillereaux and C. Josset, 2012. Further investigation on energy saving by jet impingement in bread baking process. *Proceedings of the 5th IFAC Symposium on Systems Structure and Control*
- Lupi, R., et al., How much does transgenesis affect wheat allergenicity? Assessment in two GM lines over-expressing endogenous genes. *Journal of Proteomics*, 2013. 80: p. 281-291.
- Majoul-Haddad, T., Bancel, E., Martre, P., Triboui, E. and Branlard, G. (2013). Effect of short heat shocks applied during grain development on wheat (*Triticum aestivum* L.) grain proteome. *Journal of Cereal Science* 57: 486-495.
- Mameri, H., et al., A Recombinant omega-Gliadin-like D-Type Glutenin and an alpha-Gliadin from Wheat (*Triticum aestivum*): Two Immunoglobulin E Binding Proteins, Useful for the Diagnosis of Wheat-Dependent Allergies. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012d. 60(32): p. 8059-8068.
- Mameri, H., et al., Immunoglobulin-E Reactivity and Structural Analysis of Wheat Low-Molecular-Weight Glutenin Subunits and Their Repetitive and Nonrepetitive Halves. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012a. 60(30): p. 7538-7547.
- Mameri, H., et al., Molecular and immunological characterization of wheat Serpin (Tri a 33). *Molecular Nutrition & Food Research*, 2012c. 56(12): p. 1874-1883.
- Mameri, H., et al., Serin Protease Inhibitors (Serpins) are wheat allergens containing mainly conformational epitopes. *Allergy*, 2012b. 67: p. 602-602.
- Mayolle J.E., Lullien-Pellerin V., Corbineau F., Boivin P., Guillard V. 2012. Water diffusion and enzyme activities during malting of barley grains : a relationship assessment. *J. Food Engin.*
- Nichele, V. (2012). Recent evolution of breakfast cereals' nutritional composition: Which impacts on products' quality? *Cahiers de Nutrition et de Diététique* 47: S23-S31.
- Paës G. et Chabbert B. 2012. Characterization of Arabinoxylan/Cellulose Nanocrystals Gels to Investigate Fluorescent Probes Mobility in Bioinspired Models of Plant Secondary Cell Wall. *Biomacromolecules* 13, 206-214.
- Rosa, N. N., Aura, A.-M., Saulnier, L., Holopainen-Mantila, U., Poutanen, K. and Micard, V. (2013b). Effects of disintegration on in vitro fermentation and conversion patterns of wheat aleurone in a metabolic colon model. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*.
- Rosa, N. N., Barron, C., Gaiani, C., Dufour, C. and Micard, V. (2013a). Ultra-fine grinding increases the antioxidant capacity of wheat bran. *Journal of Cereal Science* 57: 84-90.
- Runavot JL, Bakan B, Geneix N, Saulnier L, Moco K, Guillon F, Corbineau F, Boivin P, Marion D. 2011. Impact of low hydration of barley grain on β -glucan degradation and lipid transfer protein (LTP1) modifications during the malting process. *J. Agric. Food Chem.* 59, 8256-8264.
- Saulnier, L. (2012). Les grains de céréales : Diversité et compositions nutritionnelles. *Cahiers de Nutrition et de Diététique* 47: S4-S15.
- Saulnier, L. and Micard, V. (2012). Impact de la structure de l'aliment sur les propriétés nutritionnelles et l'acceptabilité du pain et des pâtes. *Innovations Agronomiques* 19: 63-74.
- Shewry, P. R., Charmet, G., Branlard, G., Lafiandra, D., Gergely, S., Salgo, A., Saulnier, L., Bedo, Z., Mills, E. N. C. and Ward, J. L. (2012). Developing new types of wheat with enhanced health benefits. *Trends in Food Science and Technology* 25: 70-77.
- Shewry, P. R., Van Schaik, F., Ravel, C., Charmet, G., Mariann, R., Zoltan, B. and Ward, J. L. (2011b). Genotype and environment effects on the contents of vitamins b1, b2, b3, and b6 in wheat grain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 59: 10564-10571.
- Shewry, P. R., Ward, J. L., Zhao, F., Ravel, C., Charmet, G., Lafiandra, D. and Bedo, Z. (2011a). Improving the health benefits of wheat. *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding* 47: S169-S173.
- Tasleem-Tahir, A., Nadaud, I., Chambon, C. and Branlard, G. (2012). Expression profiling of starchy endosperm metabolic proteins at 21 stages of wheat grain development. *Journal of Proteome Research* 11: 2754-2773.

- Touyarou, P., Sulmont-Rosse, C., Gagnaire, A., Issanchou, S. and Brondel, L. (2012). Monotonous consumption of fibre-enriched bread at breakfast increases satiety and influences subsequent food intake. *Appetite* 58: 575-581.
- Villemejeane, C., Suciuc, I., Lesdema, A., Delarue, J., Ndiaye, A., Marsset-Baglieri, A., Aymard, P., Marcuz, M. C., Vinoy, S. and Michon, C. (2012). Conception raisonnée de biscuit à bénéfice satiété. *Innovations Agronomiques* 19: 75-93.

Références Bibliographiques Chapitre 5 « Focus sur la recherche internationale relative aux céréales en alimentation humaine »

- Bartłomiej, S., R.-K. Justyna, and N. Ewa, Bioactive compounds in cereal grains - occurrence, structure, technological significance and nutritional benefits - a review. *Food Science And Technology International*, 2012. 18(6): p. 559-568.
- Björck, I., et al., Cereal grains for nutrition and health benefits: overview of results from in vitro, animal and human studies in the HEALTHGRAIN project. *Trends in Food Science & Technology*, 2012. 25(2): p. 87-100.
- Botero Omary, M., Fong, C., Rothschild, J. and Finney, P. (2012). Effects of germination on the nutritional profile of gluten-free cereals and pseudocereals: A review. *Cereal Chemistry* 89: 1-14.
- Brouns, F.J.P.H., V.J. Van Buul, and P.R. Shewry, Does wheat make us fat and sick? *Journal of Cereal Science*, 2013. 58(2): p. 209-215.
- Das, A., U. Raychaudhuri, and R. Chakraborty, Cereal based functional food of Indian subcontinent: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 2012. 49(6): p. 665-672.
- de Punder, K. and L. Pruimboom, The Dietary Intake of Wheat and other Cereal Grains and Their Role in Inflammation. *Nutrients*, 2013. 5(3): p. 771-787.
- Fardet, A. (2010). New hypotheses for the health-protective mechanisms of whole-grain cereals: What is beyond fibre? *Nutrition Research Reviews* 23: 65-134.
- Frølich, W., P. Åman, and I. Tetens, Whole grain foods and health - a Scandinavian perspective. 2013. 2013.
- Gani, A., et al., Whole-Grain Cereal Bioactive Compounds and Their Health Benefits: A Review. *Journal of Food Processing and Technology*, 2012. 3(3)
- Catassi, C., et al., Non-Celiac Gluten sensitivity: the new frontier of gluten related disorders. *Nutrients*, 2013. 5(10): p. 3839-3853.
- Griffiths, T., Promoting Cereal Grain and Whole Grain Consumption: An Australian Perspective. *Cereal Chemistry*, 2010. 87(2): p. 159-161.
- Hübner, F. and E.K. Arendt, Germination of cereal grains as a way to improve the nutritional value: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2013: 53(8) p. 853-861.
- Katina, K. and K. Poutanen, Nutritional Aspects of Cereal Fermentation with Lactic Acid Bacteria and Yeast (Chapter Book), in *Handbook on Sourdough Biotechnology*, M.G. Marco Gobbetti, Editor. 2013, Springer: New-York. p. 229-244.
- Laerke, H.N. and K.E.B. Knudsen, Copassengers of Dietary Fiber in Whole Grain Rye and Oats Compared with Wheat and Other Cereals. *Cereal Foods World*, 2011. 56(2): p. 65-69.
- McMackin, E., et al., Whole grains and health: attitudes to whole grains against a prevailing background of increased marketing and promotion. *Public Health Nutrition*, 2013. 16(4): p. 743-751.
- Mishra, S. and J. Monro, Wholeness and primary and secondary food structure effects on in vitro digestion patterns determine nutritionally distinct carbohydrate fractions in cereal foods. *Food Chemistry*, 2012. 135(3): p. 1968-1974.
- Neacsu, M., McMonagle, J., Fletcher, R. J., Scobbie, L., Duncan, G. J., Cantlay, L., de Roos, B., Duthie, G. G. and Russell, W. R. (2013). Bound phytochemicals from ready-to-eat cereals: Comparison with other plant-based foods. *Food Chemistry* 141(3): p. 2880-2886.
- Pavlovich-Abril, A., et al., Cereal bran and wholegrain as a source of dietary fibre: technological and health aspects. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 2012. 63(7): p. 882-892.
- Poutanen, K. (2012). Past and future of cereal grains as food for health. *Trends in Food Science and Technology*.
- Shepherd, R., Dean, M., Lampila, P., Arvola, A., Saba, A., Vassallo, M., Claupein, E., Winkelmann, M. and Lahteenmaki, L. (2012). Communicating the benefits of wholegrain and functional grain products to european consumers. *Trends in Food Science & Technology* 25: 63-69.

-Smith, C.E. and K.L. Tucker, Health benefits of cereal fibre: a review of clinical trials. *Nutrition Research Reviews*, 2011, 24(1): p. 118-131

Références bibliographiques Chapitre 6 « Les recherches en sciences économiques et sociales »

-Ambec S., Desquilbet M. 2012. Regulation of a Spatial Externality: Refuges versus Tax for Managing Pest Resistance. *Environmental and Resource Economics*, 2012, 51, 79-104. <http://prodinra.inra.fr/record/174127>

-Barraquand F., Martinet V. 2011. Biological conservation in dynamic agricultural landscapes: Effectiveness of public policies and trade-offs with agricultural production. *Ecological Economics* 70(5). <http://prodinra.inra.fr/record/48103>

-Benoit M., Laignel G. 2011. Analyse sur le long terme de systèmes d'élevage ovins allaitants en France. Quelles trajectoires et quels facteurs de réussite économique ? *INRA Productions Animales* 24, p. 211-220. <http://prodinra.inra.fr/record/47101>

-Berthet, E. 2011. *La capacité d'innovation, un enjeu sous-estimé des politiques environnementales ? Cas de la mise en œuvre de Natura 2000 en plaine céréalière*. Colloque National Unité - Ecodéveloppement: Ecologisation des politiques publiques et des pratiques agricoles, Avignon. <http://prodinra.inra.fr/record/51454>

-Bonny S. 2011. L'agriculture écologiquement intensive : nature et défis. *Cahiers Agricultures* 20 (6), nov-déc 2011. DOI: 10.1684/agr.2011.0526 <http://prodinra.inra.fr/record/176260>

-Bretagnolle, V. 2012. Gestion de la biodiversité en milieu céréalier intensif : importance des prairies aux échelles locales et régionales. *Innovations Agronomiques*, 22, 31-43. <http://prodinra.inra.fr/record/172124>

-Chakir R., Vermont B. 2013. *Etude complémentaire à l'analyse rétrospective des interactions du développement des biocarburants en France avec l'évolution des marchés français et mondiaux et les changements d'affectation des sols*. INRA, Grignon, 69 p. <http://prodinra.inra.fr/record/190587>

-Chantre E. 2011. *Apprentissages des agriculteurs vers la réduction d'intrants en Grandes Cultures : Cas de la Champagne Berrichonne de l'Indre dans les années 1985-2010*. Thèse de doctorat en Agronomie, AgroParisTech: ABIES, 402p. <http://prodinra.inra.fr/record/188686>

-Chatellier V., Guyomard H. 2011. Le bilan de santé de la PAC et le rééquilibrage des soutiens à l'agriculture française. *Economie rurale* (323), pp 4-20. <http://prodinra.inra.fr/record/43898>

-Coleno, FC., Hannachi, M. 2011. A Simulation model to evaluate the effect of cooperation between grain merchants in managing GM and non-GM segregation for maize in Europe. In: *Proceedings of the 18. International Farm Management Congress*. Cambridge, GBR, International Farm Management Association. <http://prodinra.inra.fr/record/44389>

-Combris, P., et al 2011. *Consommation et consommateurs*. In: C. Esnouf, M. Russel, N. Bricas (Eds), Pour une alimentation durable. Réflexion stratégique DuALIne (p. 37-59). Matière à Débattre-Décider. Versailles, Editions Quae. <http://prodinra.inra.fr/record/51069>

-Cordier J., Gohin A. 2012. Quelle(s) intervention(s) publique(s) pour la gestion des risques de marché en agriculture ? *INRA Sciences Sociales* (4-5). <http://prodinra.inra.fr/record/169047>

-De Cara, et al 2011. Economic Analysis of Summer Fallow Management to Reduce Take-All Disease and N Leaching in a Wheat Crop Rotation. *Environmental Modeling & Assessment*. 16 (1). DOI:10.1007/s10666-010-9234-2 <http://prodinra.inra.fr/record/204229>

-Desbois D, Butault JP, Surry Y 2013. Estimation des coûts de production en phytosanitaires pour les grandes cultures. Une approche par la régression quantile. *Economie Rurale* (333). <http://prodinra.inra.fr/record/183123>

-Fares M. et al, 2012. Transition agro-écologique, innovation et effets de verrouillage : le rôle de la structure organisationnelle des filières. Le cas de la filière blé dur française. *Cahiers Agricultures*, 21(1). DOI:10.1684/agr.2012.0539 <http://prodinra.inra.fr/record/49947>

-Fargue-Lelièvre, A. 2011. Comparing maize management and coexistence means between GM and non GM maize in two French regions. In: *Proceedings of the 18. International Farm Management Congress*. 18. International Farm Management Congress, Methven, NZL (2011-03-20-25). Cambridge, GBR: International Farm Management Association. <http://prodinra.inra.fr/record/40839>

-Forslund, A., Levert, F., Gohin, A., Le Mouel, C. 2013. Etude complémentaire à l'analyse rétrospective des interactions du développement des biocarburants en France avec l'évolution des marchés français et internationaux et les changements d'affectation des sols - Volet 2 : Evaluation des effets du développement des biocarburants en France sur les marchés des

grandes cultures et sur le changement d'affectation des sols : Le modèle MATSIM-LUCA. INRA, Rennes, 119 p. <http://prodinra.inra.fr/record/190145>

-Hannachi M 2011. *La coopération au service du bien commun. Les stratégies des entreprises de collecte et de stockage de céréales face aux OGM*. Thèse, Un. Versailles Saint Quentin, <http://prodinra.inra.fr/record/188689>

-Huchet-Bourdon, M. 2011. *Agricultural Commodity Price Volatility: An Overview*. OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers (52). OECD. <http://prodinra.inra.fr/record/47445>

-Jean S., Bricas N., Gouel C., et al. 2011. Commerce international, volatilité des prix et standards durables. In: C. Esnouf, M. Russel, N. Bricas (Eds). *Pour une alimentation durable. Réflexion stratégique du ALIne*, (p. 165-181. Matière à Débattre - Décider. Versailles, Editions Quae. <http://prodinra.inra.fr/record/51501>

-Lamine, C. 2011. Anticiper ou temporiser: injonctions environnementales et recompositions des identités professionnelles en céréaliculture. *Sociologie du travail* 53.1. <http://prodinra.inra.fr/record/43258>

-Lecroart B., Messéan A., Soler LG, 2012. Modelling and Assessing the Impacts of the CoExistence Between GM and non-GM Supply Chains: The Starch Maize Supply Chain Example. In: Bertheau Y (Ed) *Genetically Modified and Non-Genetically Modified Food Supply Chains: Co-Existence and Traceability*. Wiley-Blackwell, Oxford, UK. Doi: 10.1002/9781118373781.ch11 <http://prodinra.inra.fr/record/167660>

-Lécuyer B., Chatellier V., Daniel K. 2013. Les engrais minéraux dans les exploitations agricoles françaises et européennes. *Economie Rurale* (333), 147-157. <http://prodinra.inra.fr/record189471>

-Levert F., Le Mouel C., Jean, S. 2012. Perspectives 2010-2020 des marchés et des revenus agricoles de l'Union européenne. *INRA Sciences Sociales*, 4-5, 3 p. <http://prodinra.inra.fr/record/168937>

-Louhichi K., Valin H. 2012. Impact of EU biofuel policies on the French arable sector: A micro-level analysis using global market and farm-based supply models. *Review of Agricultural and Environmental Studies*, 93(3), DOI: 10.4074/S1966960712003013 <http://prodinra.inra.fr/record/174048>

-Loyce, C et al, 2012. Growing winter wheat cultivars under different management intensities in France: A multicriteria assessment based on economic, energetic and environmental indicators. *Field Crops Research*, 125. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2011.08.007> <http://prodinra.inra.fr/record/216052>

-Madignier A 2011. Déterminants du choix des partenaires commerciaux dans les échanges de blé et de produits dérivés du blé des pays du Maghreb. Thèse Univ. Montpellier 1, 274 p. <http://prodinra.inra.fr/record/48391>

-Mailly, F. et al. 2013. Un modèle de décision d'assolement en riziculture conventionnelle et biologique pour prédire les usages des sols sous différents scénarios : cas de la Camargue (Sud de la France). *Cahiers Agricultures*, 22 (5), 424-431. DOI : 10.1684/agr.2013.0662 <http://prodinra.inra.fr/record/212009>

-Mignolet C. 2013. Changements d'usage des terres par l'agriculture en France depuis les années 1970 : une spécialisation des territoires aux conséquences environnementales majeures. *Communication à l'Académie d'Agriculture de France*, 20/11/2013.

-Nichèle, V., 2012. Évolution récente de la composition nutritionnelle des céréales pour le petit déjeuner: quels impacts sur la qualité des produits? *Cahiers de Nutrition et de Diététique* 47.1: S23-S31. [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-9960\(12\)70294-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-9960(12)70294-8)

-Pellerin S., Bamière L., et al. 2013. *Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques*. Rapport d'étude, INRA, 92 p. <http://prodinra.inra.fr/record198570>

-Persillet, V. 2012. Les biocarburants de première génération : un bilan mondial mitigé. *INRA Sciences Sociales* N°1/2012. <http://prodinra.inra.fr/record/43220>

Etudes, expertises et prospectives conduites par la Direction de l'Expertise collective, de la Prospective et des Etudes (DEPE – INRA)

- Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benoît M., Butault J.P., Chenu C., Colnenne-David C., De Cara S., Delama N., Doreau M., Dupraz P., Faverdin P., Garcia-Launay F., Hassouna M., Hénault C., Jeuffroy M.H., Klumpp K., Metay A., Moran D., Recous S., Samson E., Savini I., Pardon L., 2013. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Synthèse du rapport d'étude, INRA, 92p.
- J.M. Meynard, A. Messéan, A. Charlier, F. Charrier, M. Fares, M. Le Bail, M.B. Magrini, I. Savini (2013). Freins et leviers à la diversification des cultures. Etude au niveau des exploitations agricoles et des filières. Synthèse du rapport d'étude, INRA, 52 p.
- Justes E., Beaudoin N., Bertuzzi P., Charles R., Constantin J., Dürr C., Hermon C., Joannon A., Le Bas C., Mary B., Mignolet C., Montfort F., Ruiz L., Sarthou J.P., Souchère V., Tournebize J., 2012. Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires : conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques. Rapport d'étude, INRA (France), 418p.
- Justes E., Beaudoin N., Bertuzzi P., Charles R., Constantin J., Dürr C., Hermon C., Joannon A., Le Bas C., Mary B., Mignolet C., Montfort F., Ruiz L., Sarthou J.P., Souchère V., Tournebize J., Savini I., Réchauchère O., 2012. Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires : conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques. Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 60p. , INRA (France), 68p.
- M. Beckert, Y. Dessaux, C. Charlier, H. Darmency, C. Richard, I. Savini, A. Tibi (éditeurs), 2011. Les variétés végétales tolérantes aux herbicides. Effets agronomiques, environnementaux, socio-économiques. Expertise scientifique collective, rapport, CNRS-INRA (France). 430p.
- M. Beckert, Y. Dessaux, C. Charlier, H. Darmency, C. Richard, I. Savini, A. Tibi (éditeurs), 2011. Les variétés végétales tolérantes aux herbicides. Effets agronomiques, environnementaux, socio-économiques. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, CNRS-INRA (France), 84p.
- Esnouf C., Russel M., Bricas N., juillet 2011 Le rapport de la prospective du ALIn

Les carrefours de l'innovation agronomique consacrés aux céréales.

- Du champ à l'assiette, nouveaux enjeux pour la filière blé. Mars 2012. Clermont Ferrand
<http://www6.inra.fr/ciag/Colloques-Alimentation/Cereales>