

Intégration des outils biotechnologiques et agrophysiologiques

Le blé, une plante modèle

S. El Jaafari¹ M. Fagroud³

L. Qariani¹ R. Paul⁴

I. El Hadrami²

Introduction

La tolérance à la sécheresse est un phénomène complexe, faisant intervenir de nombreux mécanismes interagissant entre eux, et à déterminisme génétique complexe. Face à cette réalité, l'amélioration génétique de la tolérance à la sécheresse devrait se concevoir selon une stratégie qui valorise les apports potentiels des différentes disciplines (génétique, physiologie, biotechnologies, agro-météorologie, modélisation...) et qui prend en compte plusieurs niveaux d'intégration.

¹ Laboratoire BAP, faculté des Sciences, université Moulay Ismaïl, Meknès, Maroc.

² Laboratoire de Physiologie végétale, faculté des Sciences Semlalia, université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc.

³ Département d'Agronomie, centre de Calcul, École nationale d'agriculture, Meknès, Maroc.

⁴ Faculté des Sciences agronomiques, Gembloux, Belgique.

Cet article fait le point sur l'état actuel des programmes d'amélioration génétique du blé dans les milieux méditerranéens à risque de sécheresse, utilisant des approches multidisciplinaires. La contribution potentielle des nouvelles biotechnologies en parallèle avec l'approche traditionnelle et l'analyse des caractères morphophysiologiques sera discutée. L'apport des modèles de simulation du fonctionnement du blé dans l'intégration des connaissances à des échelles allant des organes de la plante au peuplement végétal et dans la hiérarchisation des effets de la sécheresse sur les fonctions biologiques sera évoqué.

Le blé en tant que plante modèle pour de telles approches est mis en évidence à travers les acquis réalisés chez cette culture, à savoir :

- le développement de techniques écophysiologiques et la validation de traits intégratifs ;
- l'existence d'un pool d'espèces apparentées ;
- le développement de techniques de culture *in vitro* et leur application chez le blé ;
- le développement de marqueurs moléculaires associés à des caractères morpho-physiologiques chez le blé ;
- l'élaboration de modèles intégratifs pour la croissance et le développement ;
- l'existence de bases de données ;
- l'existence de réseaux et de programmes internationaux interdisciplinaires.

■ Développement de techniques écophysiologiques et validation de traits intégratifs

Chez le blé, le gain génétique du rendement a augmenté de 0,9 % par an sur les 30 dernières années. Ces progrès ont été associés à un

meilleur indice de récolte, à une augmentation du nombre de grains par m² et dans les cultivars plus récents à une biomasse plus élevée. Cependant, il est prévu que la demande globale du blé augmente de 1,6 % par an sur les 20 prochaines années. Dès lors, des stratégies physiologiques telles qu'une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau et du rayonnement, la manipulation du bilan sources-puits et l'application d'instruments de sélection rapide des premières générations devraient être considérées pour accélérer le progrès génétique (Reynolds *et al.*, 1999 ; Reynolds et Pfeiffer, 2000).

Les variétés modernes se caractérisent par une force des sources et des puits plus importante. En ce qui concerne les puits, le nombre de grains par m² est plus élevé chez les cultivars récents ce qui s'explique par un nombre de grains par épi plus élevé ou, de façon plus nette, par un nombre de plantes au m² plus important, permis, chez le blé, par l'utilisation des « raccourcisseurs ». En ce qui concerne la source, l'indice foliaire a augmenté, suite au nombre plus élevé de tiges au m² chez le blé.

L'analyse écophysologique du progrès génétique devrait permettre d'en dégager les bases physiologiques et ainsi, orienter et rendre encore plus efficace le travail futur d'amélioration. En combinant l'information sur les bases physiologiques des limitations du rendement en conditions de sécheresse avec le développement de nouveaux instruments biophysiques (porométrie, spectroradiométrie, fluorimétrie, osmométrie, psychrométrie...), les progrès génétiques dans l'amélioration du blé en conditions de sécheresse devraient augmenter à travers l'intégration des outils morphophysiologiques aux approches classiques de sélection (El Jaafari, 2000).

Plusieurs caractères morphophysiologiques d'adaptation à la sécheresse chez le blé ont été reportés dans la littérature (pour une revue bibliographique voir Blum, 1988 ; Acevedo, 1987 ; Monneveux, 1991). Face à la multiplicité de ces caractères, il convient d'effectuer un « tri ». Le choix des caractères à sélectionner peut relever en fait de deux types de démarches :

– une première, de type théorique, consiste à se baser sur les connaissances physiologiques acquises sur ces mécanismes pour en déduire leur pertinence. Une telle démarche doit avoir en particulier pour objectif de « valoriser » les connaissances acquises sur différents mécanismes d'adaptation, ou sur la physiologie de différents génotypes ;

– une deuxième démarche, de type expérimental, consiste à rechercher, dans le cadre d'essais effectués dans différentes conditions environnementales, les relations existant entre le rendement, ou certains indices exprimant la tolérance du génotype, et l'expression de certains caractères morphophysiologiques ou phénologiques. Cette approche a permis d'identifier les principaux caractères associés à la tolérance à la sécheresse chez le blé. Plusieurs caractères (efficacité d'utilisation de l'eau, discrimination isotopique du carbone, teneur relative en eau), ainsi identifiés, ont été validés en créant des lignées issues d'une sélection divergente (Acevedo et Ceccarelli, 1989 ; Al Hakimi *et al.*, 1995, 1996).

■ L'existence d'un pool d'espèces apparentées au blé

Les espèces sauvages apparentées aux blés constituent un important réservoir de gènes utilisables dans l'amélioration des formes cultivées. Les transferts les plus faciles sont ceux qui sont réalisés à partir d'espèces ayant au moins un génome homologue à celui du blé. Les transferts à partir d'espèces ayant des génomes homéologues peuvent se réaliser par substitution d'un chromosome entier ou d'un bras chromosomique. Plusieurs variétés possèdent ainsi la substitution 1B/1R du seigle ou la translocation 1BL/1RS.

L'adaptation du blé aux conditions de sécheresse peut être améliorée en introduisant chez des variétés productives des caractères morphophysiologiques de tolérance au déficit hydrique. La variabilité génétique de ces caractères au sein du blé étant souvent limitée, les croisements interspécifiques et l'introgression de caractères favorables présents chez les espèces « primitives » pourraient constituer une voie intéressante de recherche. Une telle approche a d'ailleurs été préconisée et suivie pour améliorer chez le blé la tolérance au froid (Tahir et Pashayani, 1990) et la tolérance à la salinité (Gorham et Jones, 1991). Pour la tolérance à la sécheresse, une variabilité génétique importante a pu être observée au sein des

espèces apparentées au blé en ce qui concerne des caractères liés à l'enracinement (Al Hakimi et Monneveux, 1993), la transpiration foliaire (Araus *et al.*, 1989), l'ajustement osmotique (Sinha et Bansal, 1991), l'activité photosynthétique (Austin *et al.*, 1982), le contenu relatif en eau (Al Hakimi *et al.*, 1995) et la discrimination isotopique du carbone (Al Hakimi *et al.*, 1996).

L'utilisation des espèces tétraploïdes (génomés AB et AG) apparaît particulièrement prometteuse pour l'amélioration génétique de la tolérance à la sécheresse du blé :

- les barrières génétiques sont peu fréquentes à l'intérieur du groupe tétraploïde et, en cas de récalcitrance, la culture d'embryons immatures peut être utilisée pour améliorer le taux de fertilité tout en permettant d'accélérer les cycles de sélection (Claesson *et al.*, 1990) ;
- des niveaux élevés de tolérance à la sécheresse ont été signalés chez *T. dicoccum*, *T. polonicum* et *T. cathlicum* (Van Slageren *et al.*, 1991) ;
- certains croisements réalisés avec des blés primitifs ont donné des résultats intéressants en zones sèches (variété Zenati et *T. polonicum*, variété Sébou et *T. polonicum*, variété Sahel et *T. dicocum*). Des travaux ont également été mis en chantier pour introduire chez le blé, des caractères de résistance aux stress issus d'espèces sauvages (*Triticum dicoccoïdes*, espèces du genre *Aegilops*. Monneveux *et al.*, 2000).

L'handicap majeur se situe cependant dans la « signification agronomique » des caractères introduits : les espèces apparentées, par rapport aux espèces cultivées, sont généralement rustiques et certaines d'entre elles sont tolérantes à la sécheresse. Toutefois, ayant toutes un niveau de productivité faible, les répercussions et les risques sont réels qu'un lien physiologique existe entre le caractère de résistance. Il peut d'ailleurs être un caractère de « survie », plus qu'un caractère assurant le maintien d'une production en grains. Ainsi, il se peut que le caractère introduit chez l'espèce cultivée soit « contre productif ». Il est donc peut être convenable de chercher à introduire chez l'espèce cultivée plutôt des caractères ou des mécanismes inductibles, à faible coût énergétique (cas de l'ajustement osmotique par exemple), que des caractères de résistance qui pénalisent la production en grains.

■ Développement de techniques de culture *in vitro* et leur application chez le blé

De nombreux sélectionneurs de céréales visent l'intégration des nombreuses biotechnologies *in vitro*, développées au cours des dernières années, dans les schémas traditionnels de production et d'amélioration génétique du blé. Ces biotechnologies ont élargi l'éventail des possibilités d'intégration qui s'offrent au phytogénéticien tout en modifiant les méthodologies de croisements, de sélection, d'évaluation et de mise en marché de semences améliorées. Essentiellement les biotechnologies particulières aux céréales cherchent à enrichir la diversité génétique et à produire des lignées fixées. Il s'agit de l'haplodiploïdisation, l'hybridation interspécifique (ou intergénérique), la culture *in vitro* et la cytogénétique.

L'haplodiploïdisation

L'haplodiploïdisation est un outil efficace tant en sélection que dans les programmes de marquage moléculaire : deux modèles cellulaires sont actuellement testés chez le blé, à savoir la culture de cellules isolées embryogènes (culture de suspensions cellulaires obtenues à partir de tissus somatiques d'embryons haploïdes ou diploïdes), et la culture de microspores isolées.

Les premiers travaux de recherche sur la culture d'anthères du blé ont été effectués en Chine et en France. Des plantes haploïdes ont été obtenues pour la première fois par culture *in vitro* chez le blé cultivé en 1970 (Bajaj, 1990). Depuis, la culture d'anthères de blé a connu une utilisation notable dans le cadre de programmes d'amélioration. D'autres études ont permis d'obtenir des plantes haploïdes à partir de microspores isolées des anthères de blé (Mejsca *et al.*, 1993).

Outre la fixation à l'état homozygote, ces techniques présentent l'avantage de bien se prêter à l'évaluation au niveau cellulaire de la résistance à divers stress abiotiques. En facilitant la régénération,

elles devraient par ailleurs favoriser la réussite de la transformation génétique chez le blé dur. De par la rapidité d'obtention de lignées pures, l'haplodiploïdisation offre l'avantage de faciliter et de simplifier la sélection et certaines analyses en génétique quantitative. Elle constitue un outil efficace, en marquage moléculaire, car les performances agronomiques de ces lignées haplodiploïdes sont plus faciles à évaluer à cause de leur stabilité génétique.

Les méthodes de production de lignées haploïdes doublées (HD) ont permis d'accélérer considérablement le processus d'obtention de lignées homozygotes, soit par androgenèse, soit par croisement interspécifique. En effet, cette technique permet de produire, en une seule génération de culture *in vitro*, des plantes dont les gènes sont fixés, c'est-à-dire à l'état homozygote. La culture d'anthères de blé a connu une plus grande utilisation dans le cadre de programmes d'amélioration. Les progrès récents en androgenèse *in vitro* ont permis la mise au point d'une nouvelle technique d'androgenèse *in vitro* : la culture des microspores isolées de blé. Les avantages d'une telle technique reposent surtout du côté des applications potentielles de la culture des microspores, qui sont la transformation génétique, la mutagenèse *in vitro*, la sélection *in vitro* et la réalisation d'études génétiques (Kasha *et al.*, 1992 ; Kasha *et al.*, 1991).

La production d'haploïdes peut se faire par d'autres voies que la culture d'anthères ou de microspores, en recourant aux croisements interspécifiques ou intergénériques. Ces méthodes alternatives de production d'haploïdes, qui furent découvertes accidentellement chez l'orge, exploitent le phénomène d'élimination des chromosomes du parent mâle. Cette méthode dite *bulbosum* est applicable au blé. Les plantes haploïdes sont peu utiles, puisqu'elles sont chétives et stériles. Leur utilité découle du doublement de leurs chromosomes pour donner des diploïdes homozygotes.

Les hybridations et le sauvetage d'embryons immatures

Les mécanismes de résistance à l'aridité agissent à différents niveaux d'organisation de la plante. L'existence de gènes particuliers ou de régulations particulières de gènes agit sur certaines

réponses cellulaires au stress. Dans ce sens, la recherche de gènes de résistance aux stress abiotiques a été envisagée chez les espèces apparentées et sauvages.

Les croisements entre espèces cultivées et leurs espèces apparentées non domestiquées ont même permis la création de nouvelles espèces, dont le triticales est sans doute l'exemple le mieux connu. Pour le blé dur, des croisements avec des espèces apparentées domestiquées (*Triticum polonicum*, *Triticum dicoccum*) ont donné des résultats consistants et encourageants. Toutefois, deux catégories d'handicaps peuvent se présenter lors de ces croisements. Les unes sont liées à la fertilité d'hybrides obtenus et à l'expression des caractères recherchés dans le « fond génétique » de l'espèce cultivée, les autres à la nécessité de plusieurs rétrocroisements.

Le sauvetage d'embryons immatures est une technique permettant l'élargissement des possibilités de croisements interspécifiques. Cette méthode permet de préserver des hybrides nouveaux qui ne peuvent survivre pour des raisons d'incompatibilité génétique. Les méthodologies de croisement et de sauvetage d'embryons permettent d'obtenir des plantes haploïdes dont le doublement de la garniture chromosomique assure la production de lignées fixées. Le premier succès a sans doute été celui de la culture des triticales, obtenu par croisement du blé avec du seigle. En effet, l'intégration des technologies et des manipulations *in vitro* permettent de donner des nouveautés très différentes de celles de la nature. La fréquence des haploïdes naturels est normalement trop faible pour être utilisable à des fins d'amélioration.

Le développement progressif des techniques de culture *in vitro* a facilité l'hybridation interspécifique en permettant le sauvetage et la culture d'embryons. Plusieurs hybridations interspécifiques ont été réalisées à partir des très nombreuses espèces du genre *Triticum*. De nombreux gènes d'adaptation aux facteurs abiotiques sont rapportés dans la littérature. L'hybridation interspécifique ouvre des perspectives nouvelles et complémentaires aux techniques conventionnelles de croisements intraspécifiques et de sélection de populations. Elle permet d'enrichir la diversité génétique en créant des espèces entièrement nouvelles par l'apport de matériel nouveau ou de refaire la synthèse d'espèces connues. Les hybrides interspécifiques sont, entre autres, une source de résistance à la sécheresse chez les céréales. De très nombreuses combinaisons de gènes provenant de grains hybrides

interspécifiques et intergénériques permettent ainsi d'enrichir la diversité génétique des espèces cultivées. Diverses analyses cytogénétiques et l'hybridation *in situ* permettent de mieux les caractériser. L'hybridation interspécifique est appelée à profiter davantage du développement des connaissances en cytologie moléculaire. La méthode des bandes (chromosome banding) est considérée comme une méthode rapide, relativement fiable et peu coûteuse. Mais, il convient généralement de coupler les observations sur les bandes avec d'autres méthodes de localisation des gènes telle l'hybridation *in situ*.

Les vitrovariations et la sélection in vitro

Des vitrovariations (gamétoclonales ou somaclonales) sont couramment observées à la suite d'un ou de plusieurs cycles de culture de cellules chez les haploïdes doublés. L'analyse de ces variations a été faite également au niveau des ADN nucléaires et cytoplasmiques. Puisque ces modifications se produisent assez fréquemment, elles sont souvent étudiées en sélection *in vitro*. Celle-ci présente l'avantage d'un contrôle des conditions de culture, tout en permettant la manipulation d'un grand nombre de cellules, ce qui augmente la probabilité de génotypes pouvant être sélectionnés.

Chez le blé plusieurs travaux ont rapporté l'utilisation des anthères, des microspores, des embryons ou des cellules somatiques soumis à des pressions de sélection simulant des conditions de stress hydrique : osmoticum, forte salinité, ABA... L'objectif de telles recherches repose à la fois sur la possibilité d'obtention de vitrovariations et sur la perspective de sélectionner au niveau gamétique ou somatique, dans des conditions de stress, de nouvelles lignées tolérantes à la sécheresse. Très peu de résultats ont été obtenus jusqu'à aujourd'hui dans ce domaine. Citons cependant les travaux de Ye *et al.* (1987) qui ont montré pour la première fois qu'une sélection *in vitro* était possible chez l'orge pour la résistance à la salinité. Chez le blé, la croissance des cals cultivés *in vitro* en présence d'ABA semble être corrélée positivement à un effet réduit de cette hormone sur les processus photosynthétiques de la plante. Ceci suggère la possibilité de sélectionner, *in vitro*, des génotypes dont l'activité photosynthétique serait moins affectée par l'ABA. En effet, des études des effets, *in vitro*, de l'acide abscissique exogène sur le blé semblent

révéler l'existence d'une relation entre le type d'adaptation variétale à la sécheresse et la réponse à l'ABA (El Jaafari *et al.*, 1993).

Le développement de marqueurs moléculaires associés à des caractères morpho-physiologiques chez le blé

Les travaux conduits sur blé au Cimmyt et à l'Icarda (Nachit *et al.*, 2000) ont établi de fortes relations entre plusieurs marqueurs moléculaires, le rendement, la composantes du rendement et plusieurs caractères physiologiques concernés par la résistance à la sécheresse (tabl. 1). L'intégration de ces marqueurs dans une sélection indirecte pour l'amélioration de la résistance à la sécheresse serait avantageuse lorsque la corrélation entre le marqueur moléculaire et le caractère est supérieure à l'héritabilité de ce dernier. Comme l'héritabilité des marqueurs moléculaires est égale à 1, leur utilisation est particulièrement intéressante quand l'évaluation est faite pour des caractères hautement affectés par les variations environnementales comme le rendement et la tolérance à la sécheresse.

L'utilisation de ces marqueurs est très utile pour les caractères difficilement mesurables comme les paramètres racinaires et l'ajustement osmotique. À cause de la taille du génome du blé et de sa polyploïdie, peu d'études de marqueurs moléculaires liés à la résistance à la sécheresse ont été reportées chez cette plante (pour une revue bibliographique des analyses QTL des caractères associés à la résistance à la sécheresse chez le blé, voir Quarrie, 1996). Des informations préliminaires sur une carte génétique et des QTL liés à des caractères de résistance à la sécheresse chez le blé ont été rapportées par Quarrie *et al.* (1995) et Semikhodskii *et al.* (1997). En plus de ces QTL, des QTL pour la biomasse racinaire (chromosomes 4BL et 5AL) et pour la discrimination isotopique (chromosomes 1BS et 6BS) ont été caractérisés (Quarrie *et al.*, 1999). Morgan et Tan (1996) ont identifié des marqueurs moléculaires associés à l'ajustement osmotique sur le chromosome 7AS.

Caractère	Marqueurs
Rendement en grain	KSUG48, CDO1090, CD0395, BCD1661
Longueur de l'épi	BCD343
Longueur du pédoncule	BCD782, BCD292
Vigueur précoce	BCD758
Production de talles sous stress	BCD292
Fertilité sous stress	BCD348
Indice d'enroulement foliaire	BCD348, BCD1355f
Température du couvert	CDO669, BCD305
Extinction de la Fluorescence	BCD292, BCD758
Potentiel hydrique foliaire	BCD21, BCD758
Teneur en proline	BCD758
Discrimination isotopique du carbone	CDO1090, CDO1312, KSUG48

■ Tableau 1

Rendement en grain et caractères morphophysiologiques associés aux marqueurs RFLP (Nachit *et al.*, 2000).

Des QTL pour le rendement et des caractères de résistance deviennent ainsi disponibles chez le blé. Il serait, dès lors, possible de déterminer quels caractères spécifiques sont liés au rendement en conditions de sécheresse et identifier les marqueurs moléculaires associés à ces QTL. Ces derniers pourraient servir à assister l'introgession de caractères importants en matière de résistance à la sécheresse.

Afin d'obtenir une carte moléculaire aussi saturée que possible du génome du blé, différents pays collaborent au sein de l'ITMI (International Triticace Mapping Initiative) pour identifier les marqueurs RFLP tout au long des chromosomes.

■ L'élaboration de modèles intégratifs pour la croissance et le développement du blé

Par son caractère intégrateur, le modèle peut être un support utile au raisonnement des protocoles expérimentaux dans un milieu pédo-

climatique donné. Pour le cas de la sécheresse, les modèles actuels n'intègrent pas les paramètres génétiques intraspécifiques au niveau du fonctionnement hydrique de la plante. La prise en compte des mécanismes d'adaptation à la sécheresse et leur variabilité chez une espèce permettrait de faire le bon choix en terme de paramètres génétiques liés à des caractères morpho-physiologiques. Cette intégration nécessite une collaboration étroite entre sélectionneurs et modélisateurs.

En ce qui concerne la modélisation du bilan hydrique du sol, une gamme très diversifiée de modèles existe permettant d'utiliser au mieux les caractéristiques du sol disponible (Brisson et Delecolle, 1993). Ils sont basés soit sur la loi de Richards nécessitant une estimation des propriétés hydrodynamiques du sol et l'utilisation d'une fonction puits racinaires soit sur l'analogie réservoir utilisant la notion de réserve utile (Brisson *et al.*, 1992). Ces modèles donnent des simulations très satisfaisantes de la dynamique de la transpiration journalière de la plante (cas de Arcwheat). Toutefois leur liaison avec le compartiment de croissance du modèle de culture leur confère les spécificités suivantes : 1) séparation de l'évaporation et de la transpiration, 2) estimation des besoins en eau par l'indice foliaire, 3) prise en compte de la croissance racinaire en profondeur et en densité. Une évolution intéressante de ce type de modèles pourrait s'appuyer sur un couplage avec le bilan d'énergie pour rendre compte de la dynamique horaire du flux hydrique (Troufleau, 1991).

Parmi les modèles mécanistes du blé, Arcwheat (Addiscott *et al.*, 1986) présente une description précise du comportement de la plante en conditions non limitantes permettant de prendre en compte la variabilité génétique au niveau du développement phasique et du fonctionnement trophique. Il comporte en outre des modules hydrique et azoté.

Des modèles plus spécifiques ont été proposés pour intégrer des réponses de la plante à différents niveaux d'organisation, de la cellule au champ (Stockle, 1989). Dans d'autres modèles intégratifs, le rendement en grain du blé est exprimé comme un produit d'estimations de trois facteurs : surface foliaire, efficacité photosynthétique et indice de récolte. Ces modèles peuvent être appliqués à des mesures instantanées à un stade spécifique donné, ou alors, en inté-

grant des mesures durant le cycle de vie de la plante à partir des indices de réflectance au champs. En conditions de sécheresse, Royo *et al.* (2000) suggèrent que les modèles intégrant les indices NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et Sipi (Structural Independant Pigment Index) et l'indice de récolte sont performants à la fois pour des mesures instantanées ou des mesures intégrées durant différents stades de développement du blé.

Le programme Ammi (Additive Main effects and Multiplicative Interactions) est un exemple de modèles multivariés appliqué pour comparer le comportement de différentes variétés de blé dans le bassin méditerranéen (Nachit *et al.*, 1992). Le modèle Ammi intègre l'analyse de la variance pour les effets additifs avec celle des composantes principales pour les effets multiplicatifs (Gauch et Zobel, 1989). Ce modèle a été appliqué pour l'interprétation des données multilocales, pour le groupement de génotypes de blé et d'environnements selon des caractéristiques appropriées et pour l'identification des zones d'adaptation des blés (Crossa *et al.*, 1991).

■ L'existence de bases de données sur le blé

L'intégration de plusieurs disciplines dans le cadre d'un programme d'amélioration nécessite souvent la collaboration entre équipes au sein de réseaux nationaux ou internationaux. La collecte, la sélection et l'organisation de l'information ainsi que sa circulation entre ces différentes équipes deviennent alors nécessaires pour la réussite de tels projets. Des bases de données à accès public constituent un outil important pour que des chercheurs travaillant sur une même espèce puissent volontairement participer à ces différentes phases de gestion et de partage de l'information.

Sur le blé, la base de données de la FAO comprend des statistiques par pays, la description des instituts travaillant sur cette espèce, une description des zones agro-écologiques pour lesquelles le blé est important ainsi qu'une description des systèmes de culture et des

variétés cultivées dans chacune de ces zones. Une recherche à partir d'un ou plusieurs critères (pays, zone agro-écologique, système de culture, variété, longueur du cycle, utilisation et stress biotiques et abiotiques) sera possible. Cette base de données s'adresse aux personnes intéressées par la culture du blé, aux organisations et institutions gouvernementales, non-gouvernementales ou internationales (Gomez Macpherson et Marathée, 2000).

La base de données Iwis (International Wheat Information System) développée au Cimmyt offre un domaine public avec un système d'information lié aux programmes nationaux d'amélioration du blé. Les composantes majeures de cette base de données sont : le système de gestion des pédigrées, le système banque de ressources génétiques, le système de gestion des données (croisements, pédigrées, origines du cytoplasme, diversité cytoplasmique, synonymes des variétés...). Iwis sert également comme outil actif de recherche permettant d'avoir des informations sur les coefficients de parenté, les informations génétiques, les performances internationales, les liaisons avec les cartes génétiques... (Pfeiffer *et al.*, 2000).

D'autres bases de données relatives aux ressources génétiques du blé existent au sein d'organismes comme l'institut Vavilov (Russie) et l'Ipgri (Italie).

■ L'existence de réseaux et de programmes internationaux interdisciplinaires sur le blé

Augmenter la productivité et améliorer la qualité du blé sont des enjeux qui exigent l'étroite collaboration d'équipes pluridisciplinaires, capables d'incorporer les nouvelles technologies. Plusieurs réseaux ont été ainsi mis en place autour de programmes d'études intégrées du blé et particulièrement de sa tolérance à la sécheresse.

– Programmes blé Cimmyt-Icarda : l'objectif de ces programmes est l'amélioration du potentiel génétique et la stabilité du rende-

ment chez le blé. Les programmes Cimmyt-Icarda sont basés sur un réseau de partenariats avec les programmes nationaux d'amélioration du blé pour qui ils constituent la source majeure des germoplasmes améliorés du blé. Les variétés et lignées de blé sont développées pour une large gamme de conditions agro-écologiques et sont adoptées dans plusieurs pays. Depuis les années 80, les programmes blé Cimmyt-Icarda se sont élargis également aux environnements à contraintes hydriques avec la recherche de la tolérance à la sécheresse, l'exploitation de la variabilité génétique des espèces apparentées du genre *Triticum* et l'utilisation des marqueurs moléculaires.

– Réseau Sewana : ce réseau international est né des activités mises en place depuis 1984 dans le cadre de collaborations bilatérales ou multilatérales entre des partenaires du Nord et du Sud (CEE-AIR, réseau Gram-sécheresse, réseau Icarda/Cimmyt-programmes Inra nationaux, universités...) autour des programmes scientifiques :

- a) programme tolérance à la sécheresse chez le blé dur ;
- b) programmes biotechnologies *in vitro* et marqueurs moléculaires ;
- c) programme évaluation des ressources génétiques.

– ARC-blé de l'AUF : un programme d'Action de recherche concertée (ARC) pour l'amélioration de la tolérance à l'aridité chez le blé dur a été mis sur pied par un réseau international de laboratoires (Belgique, Canada, France, Maroc, Tunisie). La méthodologie de recherche adoptée consiste à mettre au point une approche globale d'amélioration génétique du blé dur pour la tolérance à la sécheresse, combinant à la fois l'exploitation de la biodiversité, le développement des techniques de culture *in vitro*, les outils morphophysiologiques ainsi que l'utilisation des marqueurs moléculaires.

– Réseau Itmi : plusieurs pays collaborent au sein de ce réseau pour la cartographie moléculaire du génome du blé.

– Réseau céréalière méditerranéen « RCM » : créé en mai 1989 à Paris (France) et dont l'objectif est la mise au point d'une méthodologie d'approche et d'identification des types variétaux et des conduites les plus adaptées aux différents sous-climats du bassin méditerranéen. La thématique du réseau est actuellement centrée sur l'écophysiologie des céréales et animée par le service « Plantes-Climat » de l'ITCF (Institut technique des céréales et des fourrages).

– Réseau Interdrought : d'études intégrées de la tolérance à la sécheresse chez les végétaux supérieurs. Interdrought était un réseau international rassemblant des chercheurs de différentes disciplines, particulièrement la génétique, l'écophysiologie et la biologie moléculaire. Deux espèces importantes ont fait l'objet de cette intégration au sein de ce réseau : le blé et le tournesol. Une banque de données sur les gènes et les génotypes a été mise en place. Elle regroupe les informations sur les sondes moléculaires, le matériel génétique issus des travaux sur la tolérance susceptibles d'être échangés entre les laboratoires membres du réseau.

Conclusion

La stratégie à mettre en œuvre pour l'amélioration de la tolérance à la sécheresse chez le blé devrait prendre en compte plusieurs niveaux d'intégration, en définissant, pour chacun d'eux, un objectif spécifique.

La caractérisation physiologique, l'analyse génétique des caractères et la recherche de marqueurs moléculaires pour ces caractères s'avèrent d'une utilité incontournable. La physiologie examine les effets du stress au niveau de la cellule ou de l'organe. La génétique se préoccupe de la variabilité et de la transmission des caractères de tolérance. La biologie moléculaire essaie d'identifier les gènes impliqués dans la tolérance à la sécheresse. Aussi, l'exploitation de la phase haploïde d'une plante de céréale ouvre de nouvelles perspectives d'amélioration génétique fort intéressantes pour le développement de la productivité du blé. L'apport des modèles de simulation du fonctionnement du blé peut avoir lieu à travers l'intégration des connaissances à des échelles allant des organes de la plante au peuplement végétal et dans la hiérarchisation des effets de la sécheresse sur les fonctions biologiques.

Ces niveaux constituent autant de maillons d'une chaîne faisant intervenir des connaissances et des compétences en matière de physiologie, de génétique, de biotechnologies, de biométrie et d'agronomie. La mise en place de programmes fondés sur de telles stratégies requiert la constitution d'équipes ou de réseaux pluridisciplinaires.

Chez le blé, il s'agit de capitaliser les efforts déployés dans ce sens par différentes équipes qui ont initié ce genre de collaborations au sein de réseaux (Sewana, Gram-sécheresse, ARC-blé dur, Itmi, RCM...) et d'articuler leurs actions avec les programmes blé Cimmyt-Icarda. Il s'agit aussi de promouvoir l'utilisation des bases de données et les échanges d'informations et de ressources génétiques entre ces différentes équipes via les bases de données et systèmes d'informations qui existent déjà sur le blé (FAO, Iwis, Ipgri...).

Même si les exemples d'intégration véritable de ces différents outils sont encore peu nombreux, le potentiel de leur utilisation pour l'amélioration du blé pour la résistance à la sécheresse reste attrayant.

Bibliographie

- Acevedo E 1991 — Improvement of winter cereals in Mediterranean environments. Use of yield, morphological and physiological traits. *In* Physiology-Breeding of Winter Cereals for Stressed Mediterranean Environments, E Acevedo, AP Conesa, P Monneveux, JP Srivastava eds., Montpellier, France, Inra, Paris, Les Colloques n° 55 : 273-306.
- Acevedo E, Ceccarelli S 1989 — Role of physiologist-breeder in a breeding program for drought tolerance conditions. *In* "Drought resistance in cereals", Baker FWG ed, Wallingford, CAB International : 117-139.
- Addiscott TM, Heys PJ, Whitmore AP 1986 — Application of simple leaching models in heterogeneous soils. *Geoderma* 38 : 185-194.
- Al Hakimi A, Monneveux P 1993 — Caractères d'enracinement et capacité de maintien de la turgescence chez les espèces primitives tétraploïdes de blé : utilisation de ces caractères pour l'amélioration génétique de la tolérance à la sécheresse chez le blé dur. *In* Tolérance à la sécheresse des céréales en zone méditerranéenne : Diversité génétique et amélioration variétale, Monneveux P, M Bensalem eds., Inra, Paris : 321-339.
- Al Hakimi A, Monneveux P, Galiba G 1995 — Soluble sugars, proline, and relative water content (RWC) as traits for improving drought tolerance and divergent selection for RWC from *Triticum polonicum* into *Triticum durum*. *J Genet Breed* 49 : 237-244.
- Al Hakimi A, Monneveux P, Deléens E 1996 — Selection response for carbone isotope discrimination in a *Triticum polonicum* x *Triticum durum* cross: potential interest donor improvement of water efficiency in durum wheat. *Plant Breed* 115 : 317-324.

- Araus JL, Tapia L, Alegre L 1989 — The effect of changing sowing date on leaf structure and gas exchange characteristics of wheat flag leaves grown under Mediterranean climate conditions. *J Exp Botany* 40 : 639-646.
- Austin RB, Morgan CL, Ord MA, Bahgwat SG 1982 — Flag leaf photosynthesis of *Triticum aestivum* and related diploid and tetraploid species. *Annals of Botany* 49 : 177-189.
- Bajaj YPS 1990 — In vitro production of haploids and their use in cell genetics and plant breeding. In : *Biotechnology in agriculture and forestry*. YPS Bajaj ed. Springer-Verlag : 3-44.
- Blum A 1988 — Plant Breeding for stress environments. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida.
- Brisson N, Delecolle R. 1993 — Utilisation des modèles mécanistes de culture comme outils de raisonnement de la composante génétique de la résistance à la sécheresse. In *Tolérance à la sécheresse des céréales en zone méditerranéenne : Diversité génétique et amélioration variétale*, Monneveux P. & M. Bensalem eds., Inra, Paris : 117-125.
- Brisson N, Seguin B ; Bertuzzi P 1992 — Agrometeorological soil water balance for crop simulation models. *Agricultural and Forest Meteorology* 59 : 267-287.
- Claesson L, Koitimaki M, Von Bothmer R 1990 — Crossability and chromosome pairing in some interspecific *Triticum* hybrids. *Hereditas* 112 : 49-55.
- Crossa J, Fox PN, Pfeiffer WH, Rajaram S, Gauch HG 1991 — AMMI adjustment for statistical analysis of an international wheat yield trial. *Theor. Appl Genet* 81 : 27-37.
- El Jaafari S 2000 — Durum wheat breeding for abiotic stresses resistance: defining physiological traits and criteria. *Options méditerranéennes* 40 : 251-256.
- El Jaafari S, Paul R, Lepoivre Ph, Semal J, Laitat E 1993 — Résistance à la sécheresse et réponses à l'acide abscissique : analyse d'une approche synthétique. *Cahiers Agricultures* 2 : 256-263.
- Gauch HG, Zobel RW 1989 — Accuracy and selection success in yield trial analyses. *Theor. Appl Genet* 77 : 473-481.
- Gomez Macpherson H, Marathe JP 2000 — FAO durum wheat database. *Options méditerranéennes* 40 : 51-56.
- Gorham J, Wyn Jones RG 1991 — Utilization of triticeae for improving salt tolerance in wheat. In *Wheat genetic resources: meeting diverse needs*, JP Srivastava, AB Damania eds., Aleppo, Syria : 269-278.
- Kasha KJ, Cho UH, Ziauddin A 1992 — Application of microspore cultures. In *Barley Genetics VI*. Munck, L. ed. Munksgaard International Publishers Ltd., Copenhagen, Denmark : 793-806.
- Kasha KJ, Ziauddin A, Reinbergs E, Falk DE 1991 — Use of haploids in induced mutation in barley and wheat. *Cereal Res Commun.* 19 : 101-108.
- Mejsca SJ, Morgant V, Bona DDE 1993 — Plant regeneration from isolated microspores of *Triticum aestivum*. *Plant Cell Report* 12 : 149-153.

- Monneveux P 1991 —
Quelles stratégies pour l'amélioration
génétique de la tolérance au déficit
hydrique des céréales ?
In L'amélioration des plantes
pour l'adaptation aux milieux arides.
Aupelf-Uref ed., John Libbey
Eurotext : 165-186.
- Monneveux P, Zaharieva M,
Rekika D 2000 —
The utilisation of *Triticum*
and *Aegilops* species
for the improvement of durum wheat.
Options méditerranéennes 40 : 71-82.
- Morgan JM, Tan MK 1996 —
Chromosomal location of a wheat
osmoregulation gene using RFLP
analysis. *Aust J of Plant Physiol*
23 : 803-806.
- Nachit M, Nachit G, Ketata H,
Gauch HG, Zobel RW 1992 —
Use of AMMI and linear regression
models to analyze
genotype-environment interaction
in durum wheat.
Theor Appl Genet 83 : 597-601.
- Nachit MM., Monneveux P,
Araus JL, Sorrels ME 2000 —
Relationship of dryland productivity
and drought tolerance with some
molecular markers for possible
MAS in durum (*Triticum turgidum*
L. var. durum). *Options*
méditerranéennes 40 : 203-206.
- Pfeiffer WH, Sayre KD,
Reynolds MP 2000 —
Enhancing genetic grain yield potential
and yield stability in durum wheat.
Options méditerranéennes 40 : 83-93.
- Quarrie SA 1996 —
New molecular tools to improve the
efficiency of breeding for increased
drought resistance. *Plant Growth*
Regulation 20 : 167-178.
- Quarrie SA, Stojanovic J,
Pekic S 1999 —
Improving drought resistance
in small-grained cereals: A case
study, progress and prospects.
Plant Growth Regulation 29 : 1-21.
- Quarrie SA, Steed A, Semikhodskii A,
Lebreton C, Calestani C, Clarkson
DT, Tuberosa R, Sanguineti MC,
Melchiorre R, Prioul J-L 1995 —
Identification of quantitative trait loci
regulating water- and nitrogen-use
efficiency in wheat. *In* Proceedings
of Stressnet meeting, Salsomaggiore,
Sept 1995. European Commission,
Luxembourg : 175-180.
- Reynolds MP, Pfeiffer WH 2000 —
Applying physiological strategies
to improve yield potential. *Options*
méditerranéennes 40 : 95-103.
- Reynolds MP, Sayre KD,
Rajaram S 1999 —
Physiological and genetic changes
of irrigated wheat in the post green
revolution period and approaches
for meeting projected global demand.
Crop Sci 39 : 1611-1621.
- Royo C, García del Moral LF,
Aparicio N, Villegas D,
Casadesus J, Araus JL 2000 —
Tools for improving the efficiency
of durum wheat selection under
Mediterranean conditions. *Options*
méditerranéennes 40 : 63-70.
- Semikhodskii AG, Quarrie SA,
Snape JW 1997 —
Mapping quantitative trait loci
for salinity responses in wheat.
In Drought and Plant Production.
Proceedings of International
symposium, Donji Milanovac, Serbia,
Sept 1996. Agricultural Research
Institute Serbia, Belgrade : 83-92.
- Sinha SK, Bansal KC 2000 —
Evaluation of drought tolerance of
Triticum aestivum and related species
under field conditions. *In* Physiology-
Breeding of Winter Cereals for
Stressed Mediterranean
Environments, E Acevedo, AP Conesa,
P Monneveux, JP Srivastava eds.,
Montpellier, France, Inra, Paris,
Les Colloques n° 55 : 255-269.

Stockle CO 1989 —
Simulation models in agriculture:
from cellular level to field scale.
In : Proceedings of the 1989 Summer
Computer Simulation Conference,
Austin, Texas.

Tahir M., Pashayani H 1988 —
Characteristics of cereal germplasm
situable for high altitude areas
of West Asia and North Africa.
In Winter Cereals and Food Legumes
in Montaineous Areas. JP Sribvastava,
MC Saxena, S Varma, M Tahir eds.
Ankara, Turkie, Icarda : 273-286.

Troufleau D 1991 —
Construction d'un modèle
de fonctionnement du blé adapté

à l'intégration de données
de télédétection.
Mémoire DAA INA-PG, 50 p.

Van Slageren MW,
Elings A, Holly L, Humeid B,
Jaradat AA, Obari KH 1991 —
Cereals, food legumes and their
wild relatives in Syria and Jordan.
FAO/IPBGR Plant Genetic Resources
Newsletter, 80 : 63-67.

Ye JM, Kao XN,
Harvey BL, Rossnagel BG 1987 —
Screening salt tolerant barley
genotypes via anther culture
in salt stress media.
Theor Appl Genet 74 : 426-429.