

L'avenir de la sélection du blé

Peter Stamp¹, Dario Fossati², Fabio Mascher² et Andreas Hund¹

¹ETH Zurich, Institut des sciences agronomique, 8092 Zurich, Suisse

²Agroscope, Institut des sciences en production végétale IPV, 1260 Nyon, Suisse

Renseignements: Peter Stamp, e-mail: peter.stamp@usys.ethz.ch



Figure 1 | Les sélectionneurs d'Agroscope sont attentifs aux résistances contre les maladies.

Introduction

Il y a cent ans, A. Nowacki, professeur d'agronomie de l'EPF Zurich, écrivait qu'après trente ans de travail, le rendement des céréales avait augmenté de 1,1 à 1,6 t/ha dans l'empire d'Allemagne. Déjà autrefois, les bateaux à vapeur permettant l'importation bon marché de blé panifiable de l'Amérique du Nord, stimulaient le besoin d'améliorer la productivité du blé. À l'exception de la Suisse, les Européens avaient déjà commencé à croiser leurs variétés avec les blés américains et anglais, très productifs mais de faible qualité boulangère (Porsche et Taylor 2001). Après la Première Guerre mondiale, en plus du rendement pour garder un niveau minimal d'autosuffisance, la qualité boulangère a repris de l'importance. Il

y a actuellement en Europe des variétés qui, dans de bonnes conditions, réalisent régulièrement des rendements de 10 t/ha. «Dans de bonnes conditions» signifie en particulier: suffisamment d'azote est disponible avant et après floraison afin de délivrer une qualité boulangère acceptable pour le marché européen, sans toutefois atteindre le niveau qualitatif attendu en Suisse. Ces dernières décennies, lorsque la prise en charge de la production de blé était garantie par le gouvernement, un niveau exceptionnel de qualité boulangère et une bonne résistance aux maladies étaient considérés comme un choix évident pour la sélection publique des variétés suisses (fig. 1). Avec la libéralisation du marché, ces qualités doivent être combinées avec un meilleur rendement pour rester attractives en Suisse et dans le monde (Fossati et Brabant 2003).

Renouvellement des semences et sélection privée

Le pain reste une part essentielle de notre alimentation. La culture du blé ainsi que sa sélection doivent donc garder une place importante pour notre agriculture. Le blé doit continuellement être amélioré car, cultivé maintenant sur tous les continents, il rencontre toujours de nouveaux ravageurs et de nouvelles races de pathogènes. Ceci exige une sélection constante pour la résistance. Les variétés qui seront nécessaires en 2030 doivent déjà être planifiées cette année et les premiers croisements effectués l'année prochaine (Stamp 2011). Ces futures variétés doivent apporter de bons rendements, une très bonne qualité et offrir aux agriculteurs une grande stabilité du rendement par une grande robustesse face au gel, à la chaleur, à la sécheresse et aux humidités excessives. Ce progrès est-il suffisamment rétribué ? Non ! Sans un renouvellement suffisant de la semence, les sélectionneurs manquent de moyens. Même si, dans certains pays de l'UE, il existe depuis quelques années un système de redevance également pour les semences de ferme, le niveau des redevances est très bas. La semence hybride, à l'exemple du maïs, implique un taux de renouvellement de semence très élevé. C'est pourquoi, il y a un nombre aussi considé-

nable de sélectionneurs de maïs à travers le monde, car les firmes de sélection peuvent planifier des investissements à long terme. Dans le blé, le taux de renouvellement de semence, par exemple en Allemagne, en France ou en Italie, n'atteint qu'environ 50 % (Curtis et Nilson 2012). Un taux qui n'est certainement pas suffisant pour maintenir une sélection forte pour les espèces auto-games telles que le blé ou l'orge. En Suisse, il est cependant réjouissant d'observer que ce taux de renouvellement est supérieur à 90 % (Willy Wicki, DSP, pers. com.).

Sélection satisfaisante, avenir à assurer

Durant le dernier siècle, les rendements en grains atteints par les agriculteurs ont progressé rapidement (Hategekimana *et al.* 2012). Mais si on compare la masse biologique aérienne d'anciennes et de nouvelles variétés dans des conditions optimales de fumure et sans dégâts de verse, le progrès est maigre. Par contre, l'index de récolte, la part du grain par rapport à la masse aérienne totale, a été augmentée, passant de 35 % à plus de 50 % (Peltonen-Saino *et al.* 2008). Grâce à des tiges plus courtes, la résistance à la verse a été améliorée. Ainsi, des doses physiologiquement optimales de fumure azotée peuvent être apportées lors des phases décisives de la croissance. Les articles de revues de littérature constatent cependant que le rendement du blé stagne en Europe depuis environ vingt ans. Ceci est causé par plusieurs facteurs. D'une part, l'augmentation de l'indice de récolte, qui dépasse 50 % depuis plusieurs décennies, ne peut plus être un facteur principal de l'augmentation du rendement. D'autre part, les réglementations de la production agricole, reflétant l'écologisation souhaitée par la société, diminuent les possibilités de contrôler la croissance et l'état sanitaire des cultures par les intrants. Enfin, le changement climatique exerce dans nos régions un effet négatif sur le rendement du blé (Brisson *et al.* 2010). L'ensemble de ces facteurs masque le progrès génétique qui, lui, n'a pas ralenti. La sélection en Suisse donne une place importante au taux de protéine, ce qui limite la progression du rendement. Le rendement maximal, atteint lorsque la variété est cultivée de manière intensive, doit cependant être comparé avec le rendement économiquement optimal réalisé pratiquement par les meilleurs agriculteurs. Dans les pays avancés, ce rendement se situe à environ 80 % du rendement maximal. Pour ce rendement pratique, le progrès génétique est d'environ 1 % par an pour des blés de qualité moyenne. Néanmoins, pour assurer une sécurité alimentaire à l'horizon des années 2050, il faudrait que ce progrès soit de 2,5 % par an (Fischer et Edmeades 2010). Il faut développer de nouveaux moyens d'améliorer la qualité boulangère et le rendement, qui restent les buts

Résumé

En Suisse, la sélection publique possède une longue tradition de création de variétés de haute qualité boulangère. Il reste à améliorer le potentiel de rendement. Dans le reste de l'Europe, où la sélection est presque exclusivement privée, le rendement a été l'objectif prioritaire pendant plus de 100 ans. La qualité boulangère n'a été longtemps qu'un objectif secondaire. Le progrès de rendement des blés fourragers est d'environ 1 % par an, mais pour garantir une sécurité alimentaire globale, il devrait être de 2,5 %. Pour y parvenir, des investissements bien plus importants seraient nécessaires, alors que les royalties pour cette espèce sont encore faibles. Dans certains pays, le taux de renouvellement de semence n'est plus que de 50 %. Dans cette situation, on ne peut espérer d'importants progrès de sélection, d'autant plus que l'indice de récolte – la part du grain par rapport à la matière sèche aérienne de la plante – a probablement atteint son optimum, avec plus de 50 %, et a perdu son rôle comme moteur du progrès. Une autre voie propose le doublement de l'efficacité photosynthétique. Néanmoins, cela exige la reconstruction d'un appareil photosynthétique issu de trois milliards d'années, ce qui ne sera probablement pas réalisé ces prochaines décennies. La sélection devient plus rapide et plus précise grâce aux outils de la biologie moléculaire. Pour le blé, l'utilisation de ces outils n'en est qu'à ses débuts. L'utilisation et l'intégration judicieuse de tous les moyens sont nécessaires pour que les nouvelles variétés soient adaptées, malgré un rapide changement climatique, aux excès d'humidité, de sécheresse, de froid et de chaleur, ainsi que résistantes aux ravageurs et aux maladies.

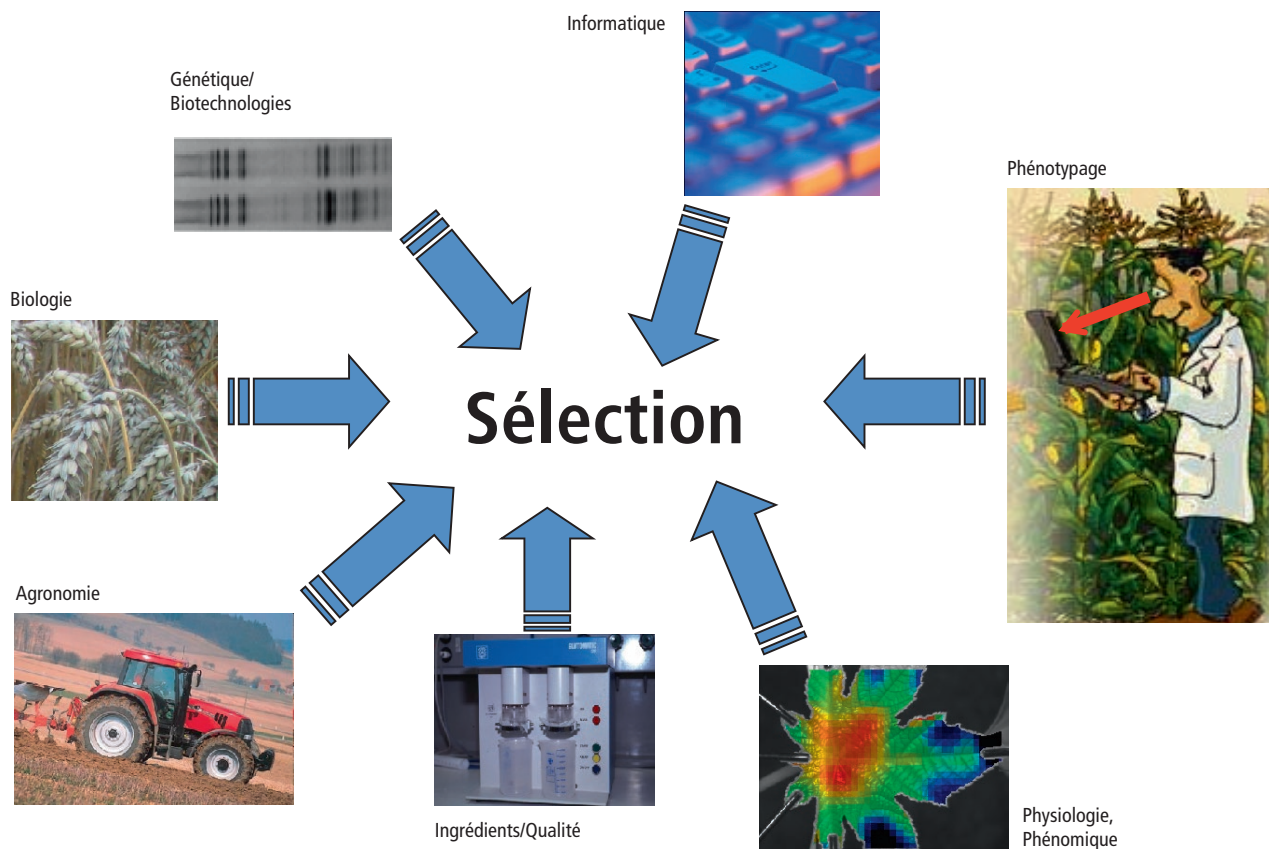


Figure 2 | La sélection moderne est la mise en commun de connaissances complexes.

prioritaires de la sélection du blé. Les bases biochimiques de la qualité boulangère sont relativement bien connues. Le gluten y joue un rôle essentiel. Il est composé de différents types de protéines de réserve du grain, des gliadines ainsi que de plus grosses molécules, les glutenines. Ces protéines riches en acides aminés soufrés sont essentielles pour la cohésion entre les protéines du gluten. Elles assurent la bonne tenue des pâtes lors des fermentations et de la cuisson même si, sur le plan nutritionnel, elles sont largement inutiles. Il est nécessaire que le sol soit suffisamment fourni en soufre pour produire de bons rendements avec des blés panifiables à plus de 12% de protéines. Le rapport entre ces types de molécules, leurs compositions et les interactions très complexes avec les autres composantes de la pâte sont les principaux déterminants de la qualité boulangère. Bien que la base génétique des molécules les plus importantes soit bien connue, elle n'est pas encore suffisamment utilisée pour faire en routine un pronostic de la qualité boulangère des lignées de sélection au laboratoire (Gobaa *et al.* 2007).

Pendant une centaine d'année, les principales cibles d'amélioration du rendement ont été une meilleure répartition entre le grain et la paille, accompagnée d'une augmentation du nombre de grains produits à

l'hectare. Nous ne connaissons pas encore des caractéristiques aussi importantes sur le plan physiologique ou moléculaire qui permettraient de continuer à augmenter le rendement aussi rapidement. Prolonger la durée de vie de la feuille après floraison est certainement, avec l'index de récolte, très important pour la croissance du grain et du rendement. La durée de vie de la feuille est constamment menacée par les maladies, les ravageurs, la chaleur et la sécheresse. Ceci explique l'importance des résistances et des tolérances biotiques et abiotiques. Si les espèces sauvages apparentées au blé ont bien des taux de photosynthèse très élevés, leurs feuilles meurent rapidement après la floraison. Les blés actuels peuvent déjà avoir une longue durée de vie foliaire lorsque la disponibilité en azote est bonne. L'exemple du maïs du type «stay-green» où, dans les cas extrêmes, les grains sont récoltés alors que leurs feuilles sont encore vertes, montre l'intérêt limité d'améliorer la durée de vie des feuilles. D'où la conclusion que, pour la sélection du blé et pour ces prochaines décennies, il n'y a pas de sauts importants en vue. Toutefois, il existe une lueur d'espoir. L'amélioration du rendement dans des variétés de blé et de maïs a pu être attribuée à un rendement photosynthétique amélioré (Stamp 2011).

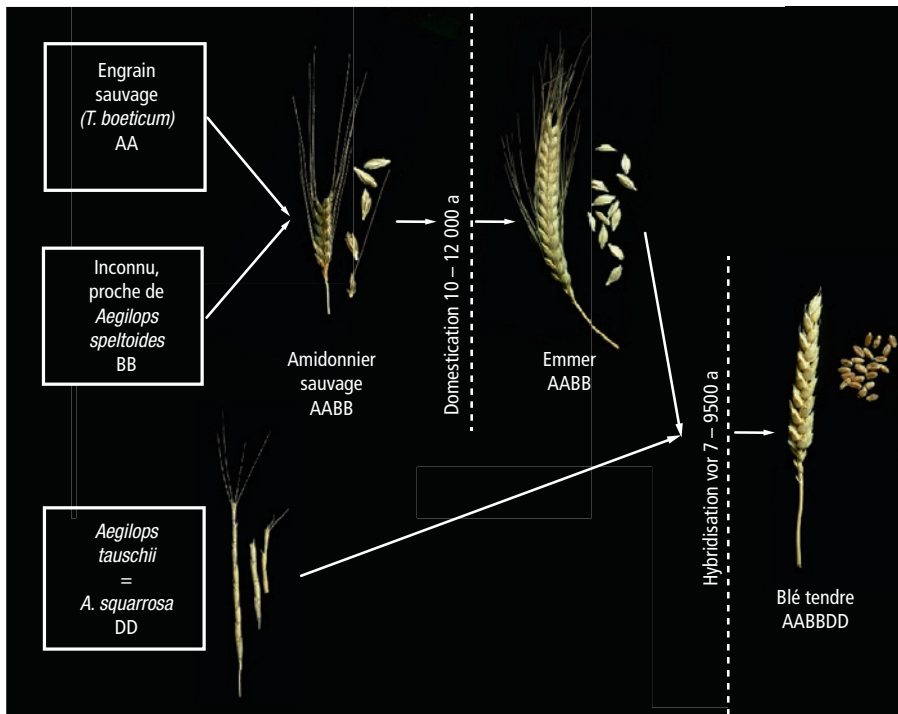


Figure 3 | L'ascendance du blé panifiable. (source: www.sortengarten.ethz.ch)

Dans la même veine, selon des calculs encore très théoriques et hypothétiques de biochimistes, on pourrait doubler la performance des plantes en modifiant fondamentalement les activités enzymatiques et d'autres processus pour adapter le blé à l'augmentation de la teneur en CO₂ de l'atmosphère (Zhu *et al.* 2010). C'est de la musique d'avenir et une tâche pour les décennies à venir. Actuellement, il faut davantage étudier comment améliorer le rendement photosynthétique pendant la floraison afin d'augmenter encore le nombre de grains au mètre carré. Traduire les progrès de la biologie moléculaire moderne en des critères de sélection directement utilisables par les sélectionneurs reste un défi majeur.

L'amélioration génétique aujourd'hui

L'objectif pour les années à venir est d'améliorer la vitalité globale de la plante, y compris une amélioration de la tolérance aux maladies et aux changements climatiques. Ces objectifs de sélection ont aussi leurs limites, car les tolérances de la plante entraînent souvent «des coûts» supplémentaires, à travers des activités ou des interactions avec des processus métaboliques. Ceci a été montré par exemple avec l'introduction de gènes de résistance supplémentaires dans la variété Arina (Ortelli *et al.* 1996). D'autre part, les nouveaux outils de sélection apportés par la génétique moléculaire sont de plus en plus aisément disponibles pour les sélectionneurs. Ils ont longtemps été au centre de l'intérêt public, mais la sélection moderne est une entreprise complexe; elle ne

peut conduire à de nouvelles variétés que si le sélectionneur domine tous les processus (fig. 2). Depuis plus de deux décennies, des discussions sur les potentiels d'utilisation des nouvelles connaissances au niveau moléculaire ont lieu. Ces discussions intenses sont renforcées par les progrès rapides et continus concernant la connaissance des structures, des fonctions des gènes et de leurs interactions très complexes dans la formation des propriétés de la plante (Stamp et Visser 2012). Souvent, l'intérêt se concentre malheureusement uniquement sur le génie génétique et son potentiel, par l'insertion de gènes individuels, pour remédier à une faiblesse d'une variété très bonne par ailleurs. Alors, qu'au-delà du génie génétique, la génétique moléculaire cherche plus largement à décoder le génome d'une plante, soit tous les gènes d'une plante et leurs interactions. En identifiant les gènes d'importance, elle a permis de développer des marqueurs moléculaires, outils indispensables de la sélection assistée par marqueurs (SAM). Une autre approche est considérer plus globalement l'ensemble du génome, pour évaluer la valeur d'une plante et la sélectionner. Toutefois, dans le blé, cette «sélection génomique» en est seulement à ses débuts. La dite «sélection intelligente» («smart breeding») devrait finalement intégrer au mieux toutes les techniques conventionnelles et de la biologie moléculaire, pour sélectionner plus rapidement et plus précisément (Lusser *et al.* 2012). Ainsi, théoriquement, le sélectionneur pourrait, dès le choix des parents et lors du développement des lignées, >

vérifier que tous les gènes souhaités de résistance aux maladies, de qualité boulangère ou propices au rendement soient bien présents. C'est prometteur, mais cependant, pour le blé, pas si facile à mettre en œuvre rapidement. En comparaison, le riz a un très petit génome, alors que le blé tendre réunit trois génomes complets de trois espèces sauvages différentes bien qu'apparentées et possède ainsi un génome immense, cinq fois plus grand que celui de l'être humain (fig. 3). Il n'est donc pas surprenant qu'un premier décodage du génome du blé n'ait été réalisé qu'en 2009 sur la variété modèle «Chinese Spring». L'utilisation et la traduction de ces connaissances scientifiques dans une nouvelle variété ne sont pas attendues avant 2030 (Brenchley *et al.* 2011). Cependant, ces dernières années, la détection de gènes d'intérêts est devenue vingt fois moins chère et beaucoup plus rapide. Ainsi, des propriétés peuvent être diagnostiquées et sélectionnées en utilisant la technologie des puces à ADN.

Les ressources génétiques dans les banques de gènes constituent toujours un énorme potentiel de gènes encore sous-exploités. Il existe des centaines de milliers d'accessions d'ancêtres du blé, de variétés locales ou d'anciens blés à travers le monde. De nombreux gènes de résistance aux maladies peuvent y être trouvés, comme l'a démontré une étude de l'Université de Zurich (Bhullar *et al.* 2010). Toutefois, le sélectionneur ne sera intéressé au gène identifié dans les ressources génétiques que s'il peut l'introduire rapidement et avec précision dans une variété moderne à l'aide de marqueurs, par rétrocroisement ou, si approprié, par génie génétique.

Bibliographie

- Bhullar N. K., Mackay M. & Keller B., 2010. Genetic Diversity of the Pm3 Powdery Mildew Resistance Alleles in Wheat Gene Bank Accessions as Assessed by Molecular Markers, *Diversity* 2, 768–786.
- Brenchley R., Spannagl M., Pfeifer M., Barker G. L. A., D'Amore R., Allen A. M., McKenzie N., Kramer M., Kerhornou A., Bolser D., Kay S., Waite D., Trick M., Bancroft I., Gu Y., Huo N., Luo M.-C., Sehgal S., Gill B., Kianian S., Anderson O., Kersey P., Dvorak J., McCombie W.R., Hall A., Mayer K. F. X., Edwards K. J., Bevan M. W. & Hall N., 2012. Analysis of the bread-wheat genome using whole-genome shotgun sequencing. *Nature* 491, 705–710. DOI: 10.1038/nature11650.
- Brisson N., Gate P., Gouache D., Charmet G., Oury F.-X. & Huard F., 2010. Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. *Field Crops Research* 119, 201-212. DOI: 10.1016/j.fcr.2010.07.012.
- Curtis F. & Nilson M., 2012. Collection systems for royalties in wheat, an International study. *Bio-Science Law Review* 12.
- Fischer R.A. & Edmeades G.O., 2010. Breeding and Cereal Yield Progress. *Crop Science* 50, 85-98. DOI: 10.2135/cropsci2009.10.0564.
- Fossati D. & Brabant C., 2003. Die Weizenzüchtung in der Schweiz. *Agrarforschung* 11, 447–458.
- Gobaa S., Bancel E., Kleijer G., Stamp P. & Branlard G., 2007. Effect of the 1BL.1RS translocation on the wheat endosperm, as revealed by proteomic analysis. *Proteomics* 7, 4349–4357. DOI: 10.1002/pmic.200700488.
- Hategkimana A., Schneider D., Fossati D. & Mascher F., 2012. Performance et efficacité de l'azote des variétés de blé suisse du 20^{ème} siècle. *Recherche Agronomique Suisse* 1 (3), 44–51.
- Lusser M., Parisi C., Plan D. & Rodriguez-Cerezo E., 2012. Deployment of new biotechnologies in plant breeding. *Nat. Biotechnol.* 30, 231–239.
- Peltonen-Sainio P., Muurinen S., Rajala A. & Jauhiainen L., 2008. Variation in harvest index of modern spring barley, oat and wheat cultivars adapted to northern growing conditions. *Journal of Agricultural Science* 146, 35–47. DOI: 10.1017/s0021859607007368.
- Porsche W. & Taylor M., 2001. German Wheat Pool, In: *The World Wheat Book: A History of Wheat Breeding* (Eds W. J. Bonjean & W. J. Angus), Lavoisier Publishing, Paris, Chapter 5, 167-191.
- Stamp P., 2011. How to increase yield and quality of wheat? , 61. Tagung der Vereinigung der Pflanzzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs 2010, 5–7.
- Stamp P. & Visser R., 2012. The twenty-first century, the century of plant breeding. *Euphytica* 186, 585–591. DOI: 10.1007/s10681-012-0743-8.
- Zhu X.G., Long S. P. & Ort D. R., 2010. Improving Photosynthetic Efficiency for Greater Yield. *Annual Review of Plant Biology* 61, 235–261. DOI: 10.1146/annurev-arplant-042809-112206.

Conclusions

En Suisse, depuis plus de cent ans, le blé a été sélectionné avec les mêmes objectifs pour combiner à un haut niveau la qualité boulangère, la productivité et les résistances. En Europe, il y a maintenant des variétés productives et de bonne qualité boulangère. Avec l'intérêt renouvelé pour la sélection du blé par de grandes entreprises, on peut s'attendre à un progrès génétique plus rapide, comme c'est déjà le cas dans le maïs. Grâce au choix judicieux de ses objectifs à long terme, le programme d'Agroscope, bien que de dimension modeste, a le potentiel de relever ces défis. Les moyens engagés, combinés avec l'expertise scientifique et professionnelle des sélectionneurs, ont prouvé par le passé que même la sélection publique peut profiter des opportunités de marché grâce à une coopération efficace avec DSP. De plus, le «microcosme» helvétique offre des possibilités de connecter aisément les recherches des EPF et des universités cantonales concernant la sélection dans une situation gagnant-gagnant. En d'autres termes, par des ajustements mineurs de leurs objectifs, les projets de recherches et de la sélection peuvent mutuellement s'enrichir. Ces collaborations nationales pourront ainsi s'intégrer plus efficacement au niveau international, par exemple à travers la «Wheat Initiative». Seuls ceux qui peuvent donner reçoivent quelque chose en retour. ■

Riassunto**L'avvenire del miglioramento genetico del frumento**

In Svizzera il contributo di istituzioni pubbliche alla selezione di frumento può vantare una lunga tradizione nella produzione di varietà sane e di elevata qualità panificabile ed esiste tuttora un buon margine per migliorare il potenziale di rendimento. Diversa è la situazione nel resto d'Europa, dove la selezione è prevalentemente organizzata da enti privati. Un secolo fa la loro preoccupazione primaria era la resa, ed è solo qualche decennio più tardi che si assiste a un riorientamento verso la qualità. Oggi l'aumento di rendimento delle varietà più comuni languisce intorno all' 1 %, mentre sarebbe necessario un aumento del 2,5 % per nutrire la popolazione mondiale. Un tale progresso necessiterebbe di maggiori investimenti, che però mancano a causa delle basse riscossioni legate alle licenze. In certi Paesi il tasso di rinnovamento della semente è inferiore al 50 % e non ci si può dunque aspettare salti impressionanti nei rendimenti. Inoltre l'indice di resa, cioè la percentuale di grano nella massa aerea della pianta, si attesta intorno al 50 % e ha probabilmente raggiunto l'optimum biologico, perdendo il suo ruolo come stimolo di progresso. D'altra parte, la selezione diventa più precisa e celere grazie all'impiego di metodi molecolari, noti anche come «smart breeding». Per il grano tenero si è ancora agli inizi. Si mira, è vero, a un raddoppiamento dell'efficienza fotosintetica, ciò comporta tuttavia una ricostruzione dell'intero sistema fotosintetico vecchio di 3 miliardi d'anni che giungerà a completamento solo nel prossimo secolo. Di conseguenza, l'impiego intelligente di tutti i mezzi a disposizione è indispensabile per rispondere al cambiamento climatico con nuove varietà più adatte ai giochi d'alternanza tra periodi umidi e di siccità, e ondate di freddo e di calore. Lo stesso dicasi per l'adattamento alla diffusione di nuovi parassiti e malattie in un mondo sempre più globalizzato.

Summary**The future of wheat breeding**

Unlike the situation in the European Union, where wheat breeding is almost exclusively in the hands of the private sector, public breeding of disease-resistant wheat with high baking quality has a long-standing tradition in Switzerland. Important increases in yield potential are still possible here. After World War I, wheat yield in other European countries increased rapidly due to a focus on mass production and a demand for high baking quality. The current annual breeding progress in mass-produced wheat remains at 1 %, and large investments would be necessary to raise this rate to the 2.5 % required for global food security. However, investment does not pay back when seed rotation is reduced to 50 % as it is the case in some countries. Therefore, significant yield leaps cannot be expected in the near future. As the harvest index—the driving trait of the Green Revolution—is close to its theoretical maximum above 50 % and thus no longer drives progress, smart-breeding may allow fast and precise breeding. Smart-breeding combines cheap and efficient molecular tools with new phenotyping techniques to produce novel varieties, such as hexaploid bread wheat. The theoretical possibility of doubling the photosynthetic efficiency is a silver line at the horizon, but it demands fundamental changes to an age-old breeding system. In the face of climate change and ongoing globalization, the reasonable use of new breeding tools will help us develop new productive wheat varieties that are tolerant to rapid changes from hot to cold or flooding to drought and are resistant to pests and diseases.

Key words: wheat breeding; breeding investments; smart-breeding; baking quality.