

20 ans d'étude variétale du maïs ensilage en Suisse

Alice Baux, Station de recherche Agroscope Changins-Wädenswil ACW, 1260 Nyon, Suisse

Renseignements: Alice Baux, e-mail: alice.baux@agroscope.admin.ch, tél. +41 22 363 47 22



Apparition des soies: lors de la récolte du maïs ensilage, l'épi représentera 30 à 60% de la matière sèche totale. Cette proportion peut dans certains cas influencer la teneur en matière organique digestible.

Introduction

Grâce à la création d'hybrides dans les années 60 et à l'obtention de variétés précoces, la production de maïs est devenue possible dans le nord de l'Europe et fournit un fourrage de qualité pour le bétail. Depuis 1988, des variétés de maïs sont inscrites dans le Catalogue national suisse et dans la liste recommandée de swiss granum avec la mention «ensilage». Avec plus de 40'000 ha, le maïs destiné à être ensilé représente environ 2/3 du maïs semé en Suisse.

Les variétés de maïs sont évaluées grâce à un réseau piloté par Agroscope sur plusieurs sites choisis pour leur diversité de conditions pédoclimatiques et représentatifs de l'ensemble des régions productrices de maïs en Suisse. Outre une évaluation du potentiel génétique, ces données nous permettent d'évaluer la variabilité liée à l'environnement. En effet, tous les sites de production ne présentent pas le même potentiel. Meisser et Weiss (2003) ont notamment montré que les plantes récoltées à Changins étaient en moyenne plus petites que celles

récoltées à Reckenholz. Ceci a des conséquences non seulement sur le rendement du maïs ensilage, mais peut également influencer la proportion de grain. Un effet des conditions climatiques, en particulier la température et la disponibilité en eau, sur la qualité du maïs ensilage a été constaté par plusieurs auteurs (Struik *et al.* 1985; Meisser et Wyss 1999; Kruse *et al.* 2007). Cependant, Argillier *et al.* (1997) ont montré que différentes variétés soumises à des environnements différents se comportaient de manière similaire. Si cette hypothèse était confirmée par nos données, cela justifierait le classement des variétés sur la base des résultats moyens observés sur plusieurs lieux.

L'objectif de ce travail est d'une part d'identifier les progrès réalisés et mis à la disposition des producteurs grâce à l'établissement de listes variétales et, d'autre part, de décrire les effets de l'environnement sur le rendement et la qualité de différentes variétés de maïs ensilage.

Matériel et méthode

Essais variétaux

Pour être inscrites dans la liste recommandée de *swiss granum*, les nouvelles variétés doivent, après deux années de tests dans différentes régions de Suisse, présenter des avantages par rapport aux meilleures variétés déjà cultivées. Les nouvelles variétés de maïs ensilage sont évaluées sur la base de critères précis, décrits dans l'annexe de l'Ordonnance sur les semences et les plants de l'Office fédéral de l'agriculture. Les principaux critères sont la précocité, la productivité et la qualité (teneur en matière organique digestible). La sensibilité à la verse, à la casse à la récolte et au charbon sont également observées (tabl. 1). Les variétés sont testées dans leur groupe de précocité, à savoir «précoce» (FAO 190–220), «mi-précoce» (FAO 220–250) et «mi-tardif» (FAO 250–280), et comparées aux variétés standard du groupe correspondant. Le groupe précoce (FAO 190–220) correspond aux variétés destinées aux zones marginales, froides ou en altitude, ou semées tardivement et qui doivent atteindre un niveau de maturité suffisant avant les premières gelées. Le groupe mi-précoce est le mieux représenté en Suisse. Ces variétés peuvent être cultivées partout sauf dans les régions élevées. Le groupe mi-tardif correspond aux variétés destinées aux zones les plus favorables du nord des Alpes comme le bassin lémanique et le Chablais. Des variétés plus tardives et plus productives pourront être cultivées au Tessin et dans la vallée du Rhône où les températures douces et la bonne disponibilité en eau sont très favorables au maïs (FAO 270–550). La précocité des variétés est estimée en comparant la teneur en matière sèche à la

Résumé

En 20 ans, le rendement des variétés de maïs ensilage mi-précoces (les plus cultivées en Suisse) a progressé en moyenne de 2 dt MS/ha/an, tout en conservant un bon niveau de précocité. Les variétés présentant des défauts agronomiques majeurs, comme une trop grande sensibilité à la verse, ont été éliminées. L'évolution de la teneur en matière organique digestible (MOD) est plus délicate à estimer, du fait du fort impact des conditions environnementales sur ce critère.

On observe des différences de rendement et de qualité entre les sites et les années. Au-delà de 30% de MS, le niveau de maturité à la récolte n'influence plus la teneur en MOD. Par contre, une récolte trop anticipée peut pénaliser la qualité du fourrage, du fait d'une trop faible proportion de grain, non compensée par la meilleure digestibilité des parties vertes.

Les données de plusieurs sites ont été comparées. Les sites de Changins (Nyon, VD) et de Reckenholz (Zurich, ZH) présentent des caractéristiques très différentes: à Changins, où les étés sont plus chauds et plus secs, on atteint des teneurs en MS satisfaisantes pour la récolte (environ 33%) 2 à 4 semaines plus tôt qu'à Reckenholz et les rendements y sont généralement plus faibles. On n'observe pas de différence aussi nette pour la qualité nutritionnelle. La MOD est moins bien corrélée à la proportion de grain à Reckenholz ($R^2=0,01$, ns) qu'à Changins ($R^2=0,21^{***}$) où les plantes sont plus petites et où le développement des épis semble pouvoir compenser la diminution de la digestibilité des parties végétatives liée aux températures plus élevées.

La mise en valeur des résultats de l'étude variétale du maïs ensilage sur 20 ans (1991–2010) montre que des progrès génétiques significatifs ont été enregistrés et mis à disposition des producteurs, notamment pour ce qui concerne le rendement en MS et la qualité du maïs ensilage.

Tableau 1 | Critères d'évaluation pondérés pour les variétés de maïs ensilage et de maïs grain

Ensilage	Teneur en MOD	Rendement	Précocité (Teneur MS)	Vigueur au départ	Verse végétation	Verse récolte	Plantes cassées	Charbon
Pondération	0,4	0,5	1,25	0,5	0,25	0,75	0,75	0,25
Grain	Rendement	Précocité (Teneur MS)	Vigueur au départ	Verse végétation	Verse récolte	Plantes cassées	Charbon	Fusariose
Pondération	1,0	2,5	0,5	0,25	0,75	0,75	0,25	0,25

récolte (MS) aux teneurs en MS de variétés standard. Dans cette étude, la variété *Attribut*, présente dans les essais de 1996 à 2007, est la variété de référence pour comparer les variétés entre elles sur ces 12 années.

Chaque année, les différentes variétés sont semées sur 7 à 9 lieux sur des parcelles de 8 à 12 m², avec 3 répétitions. La récolte se fait à l'ensileuse lorsque le niveau de maturité est suffisant pour que, dans la mesure du possible, la majorité des variétés ait atteint au moins 30 % de matière sèche. Chaque variété peut être abandonnée après une année d'essai si elle est jugée insuffisante, testée plus longtemps pour une éventuelle inscription ou, une fois acceptée, être reprise comme variété de référence. Par conséquent, on ne dispose pas d'un nombre équivalent de données par variété. Par contre, les variétés qui ont été largement commercialisées en Suisse sont également les mieux décrites. Les variétés *Attribut*, *Banguy* et *LG 22.65* sont présentes dans les essais pendant 12 ans.

Une analyse de variance est effectuée chaque année afin d'évaluer la variabilité liée au site, à la variété et à l'interaction site x variété. L'interaction site x année x variété n'a pas été étudiée car la liste des variétés testées change chaque année. Sur cette base et pour chaque année de culture, les carrés moyens du terme d'interaction site x variété ont été comparés à ceux de l'effet variétal pour le rendement, la teneur en MOD et la teneur en amidon (trois années présentées). On considère que si le rapport est faible, l'effet de l'interaction est négligeable en comparaison de l'effet génotypique.

Analyse des données qualité

La teneur en matière organique digestible (MOD) est un critère important pour la production laitière et l'engraissement des bovins. Il détermine en partie la valeur énergétique du fourrage. D'autres critères, comme les teneurs en amidon, en fibres totales, en protéines et en cellulose, sont également estimés indirectement par spectrométrie dans le proche infrarouge (NIRS). Ces mesures, rapides et non destructives, permettent d'analyser un grand nombre d'échantillons, ce qui est indis-

pensable dans le cadre de l'étude variétale. Ces mesures nécessitent un calibrage régulier de l'appareil sur la base d'analyses chimiques.

Les teneurs en MOD sont calculées en fonction de la variété *Attribut* afin de différencier l'effet variétal de l'effet environnemental et de mettre en évidence les différences variétales.

Données météorologiques

En combinant les sites et les nombreuses années, on obtient une grande diversité de conditions environnementales. Les données météorologiques (précipitations, températures moyennes de l'air à 2 m du sol) sont enregistrées à proximité des sites de *Changins*, *Reckenholz* et *Eglisau*. La date d'apparition des soies est notée chaque année à *Reckenholz* et *Eglisau*. Ce moment marque la fin de la période végétative et le début de la période reproductive.

Résultats et discussion

Progrès génétique

On enregistre dans les essais variétaux une augmentation annuelle du rendement en MS de près de 2 dt/ha (fig. 1). Cette augmentation est une moyenne établie sur plusieurs sites et sur toutes les variétés inscrites dans la liste recommandée. Le niveau de précocité, mesuré par la teneur en MS, est assez variable entre variétés mais reste centré autour de la variété *Attribut* (fig. 2a). Au cours des 20 dernières années, les teneurs en MOD sont restées assez stables (pente positive mais non significative de +0,3 g/kg MS/an, fig. 2b). L'amélioration de la productivité n'est donc pas due à une dérive vers des variétés plus tardives ou à une diminution de la qualité, mais bien à un réel progrès génétique.

Effets de l'environnement

Les résultats des essais variétaux ont mis en évidence de larges différences entre sites et années. La figure 3 illustre la variabilité du rendement et des teneurs en amidon et en MOD entre les sites. Les deux sites de Suisse

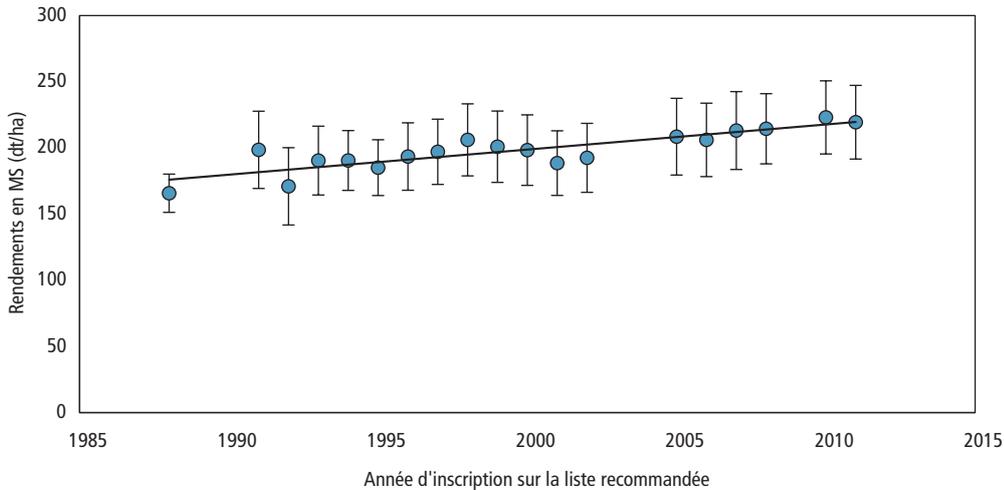


Figure 1 | Rendement moyen obtenu par les variétés inscrites sur la liste recommandée (LR) selon leur année d'inscription (1 à 4 variétés selon l'année). $Y=1,90x-3593,4$, $R^2=0,74$, $p<0,0001$

alémanique (Eglisau/Hüntwangen et Reckenholz) sont caractérisés par des potentiels de rendement légèrement plus élevés que ceux de Suisse romande (Changins et Delley), mais la teneur en MOD est en règle générale plus élevée à Changins qu'à Reckenholz. La différence de rendement est plus marquée pour le maïs ensilage que pour le maïs grain, ce qui concorde avec les observations de Weiss et Meisser (2003). Certains sites de production, comme Changins, donnent en général de plus petites plantes et donc un moindre rendement pour la plante entière. La meilleure qualité du maïs ensilage observée à Changins peut ainsi s'expliquer par une plus forte proportion de grains dans la plante entière.

Outre l'effet variétal, les différences climatiques enregistrées entre sites et années sont en partie responsables des écarts de rendement observés. La température enregistrée pendant la période de formation et de

maturation du grain explique un tiers de la variabilité du rendement sur les sites de Reckenholz et Eglisau. Des températures plus faibles sur cette période sont favorables pour le rendement en MS (fig. 4). Le cumul des précipitations sur la même période a un effet plus faible et difficile à dissocier de l'effet des températures. On peut supposer que l'alimentation en eau n'a pas posé de problème pour les sites et les années considérés (Reckenholz et Eglisau de 1996 à 2009).

L'évaluation du progrès génétique pour les critères de qualité (teneurs en amidon, MOD) est difficile car ceux-ci sont aussi influencés par les conditions pédoclimatiques ainsi que par le niveau de maturité à la récolte.

Le stade de maturité peut être discriminant pour certains critères de qualité comme la teneur en amidon ou la proportion de grains. La comparaison avec des variétés standard de précocité équivalente permet d'estimer

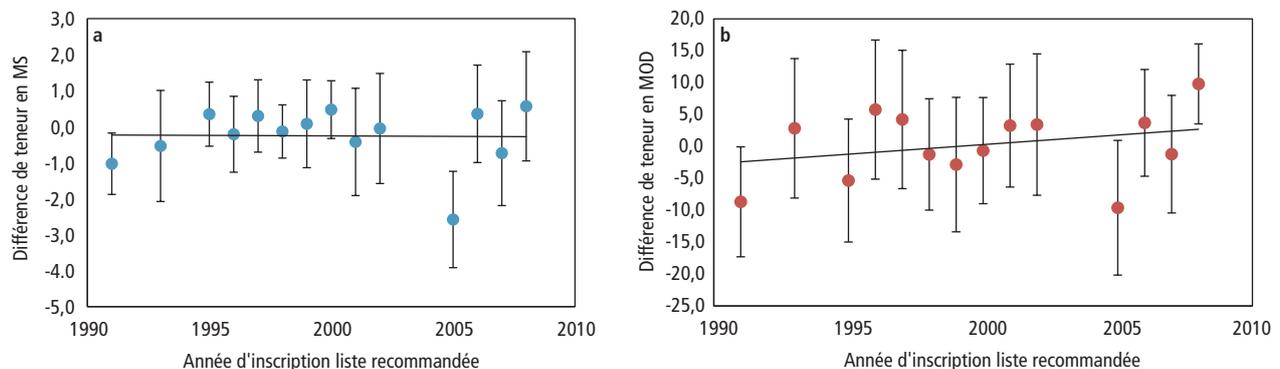


Figure 2 | Teneurs en matière sèche (MS) (a) et en matière organique digestible (MOD) (b) relatives par rapport à la variété Attribut (présente dans les essais de 1996 à 2007) selon l'année d'inscription des nouvelles variétés. a) $y=-0,003x+5,19$, $R^2=0,0003$, $p=0,95$, b) $y=0,30x-600,32$, $R^2=0,08$, $p=0,32$. Les barres d'erreur représentent l'écart type.

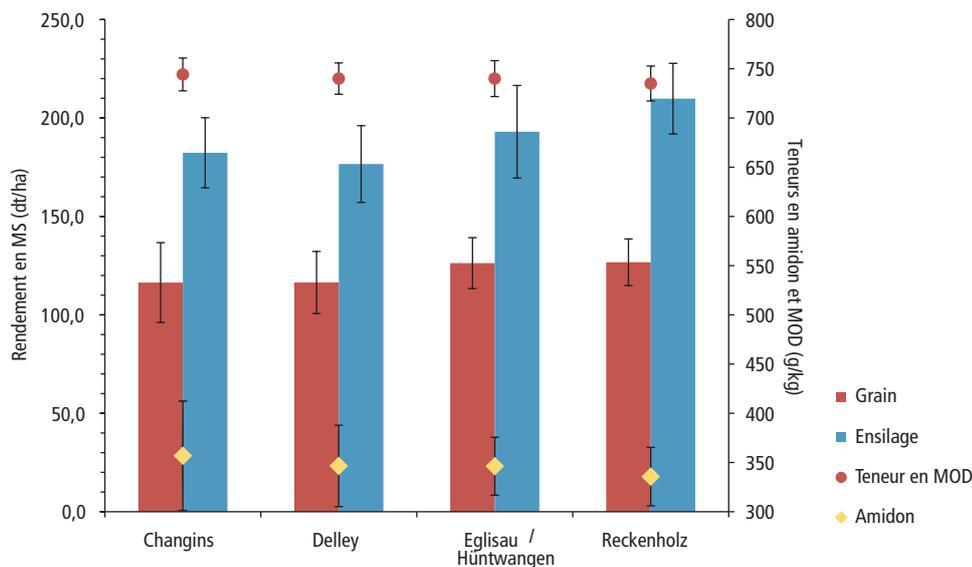


Figure 3 | Rendement moyen (dt/ha) de 1991 à 2010 des variétés de maïs ensilage et de maïs grain mi-précoces pour différents sites. Teneurs moyennes en amidon (g/kg MS) et en matière organique digestible (MOD, g/kg MS) pour les variétés de maïs ensilage. Les barres d'erreur correspondent à l'écart type.

plus correctement la qualité. D'après nos résultats, la teneur en MOD est effectivement réduite si la teneur en matière sèche est trop faible, mais elle n'est plus influencée par le stade de maturité dès que la récolte a lieu au-delà de 30 % de MS (fig. 5). Les essais sont donc récoltés lorsque le seuil de 30 % de MS est dépassé pour la plupart des variétés, mais les variétés les plus tardives peuvent parfois être pénalisées si la différence de précocité avec le reste du groupe est importante.

La teneur en amidon est très bien corrélée à la proportion de grain ($r=0,88^{***}$), mais pas la teneur en MOD qui dépend aussi d'autres facteurs. En effet, si la frac-

tion «grain» du maïs ensilage est beaucoup plus digeste que le reste de la plante, de grandes différences de digestibilité sont observées au niveau des parties végétatives (Meisser et Wyss 1999). L'environnement influence donc la teneur en MOD du maïs ensilage par i) la proportion de grain, ii) la digestibilité du reste de la plante. En comparant les sites de Changins et de Reckenholz, on constate que la teneur en MOD est mieux corrélée à la proportion de grain à Changins qu'à Reckenholz (fig. 6). Cela suggère que la part du grain dans la détermination de la digestibilité est plus importante dans le premier cas que dans le second. Ceci est cohérent avec

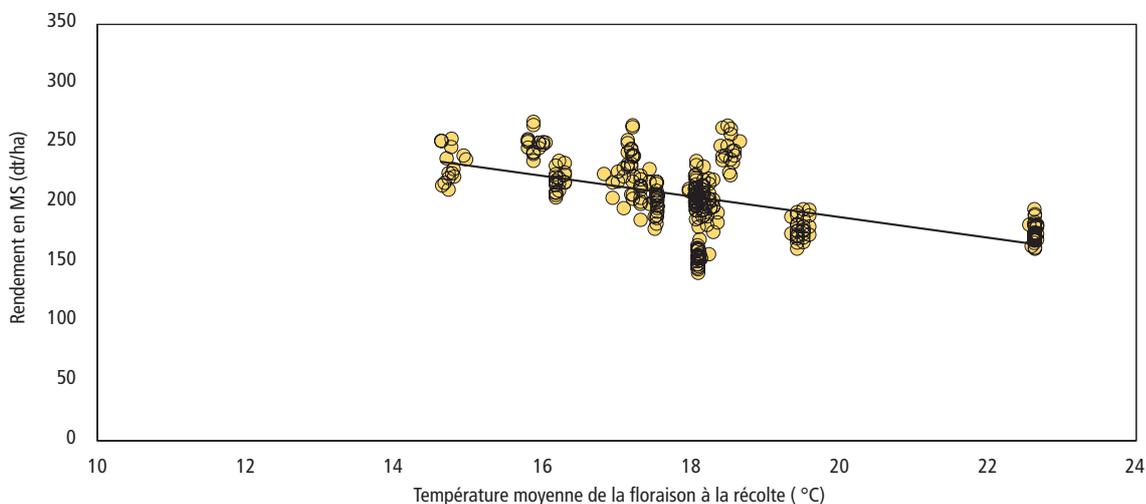


Figure 4 | Rendements en MS (dt/ha) en fonction de la température moyenne enregistrée de la floraison femelle à la récolte pour les sites de Reckenholz et Eglisau. $Y=-8,65x+361$, $R^2=0,31$, $p<0,0001$.

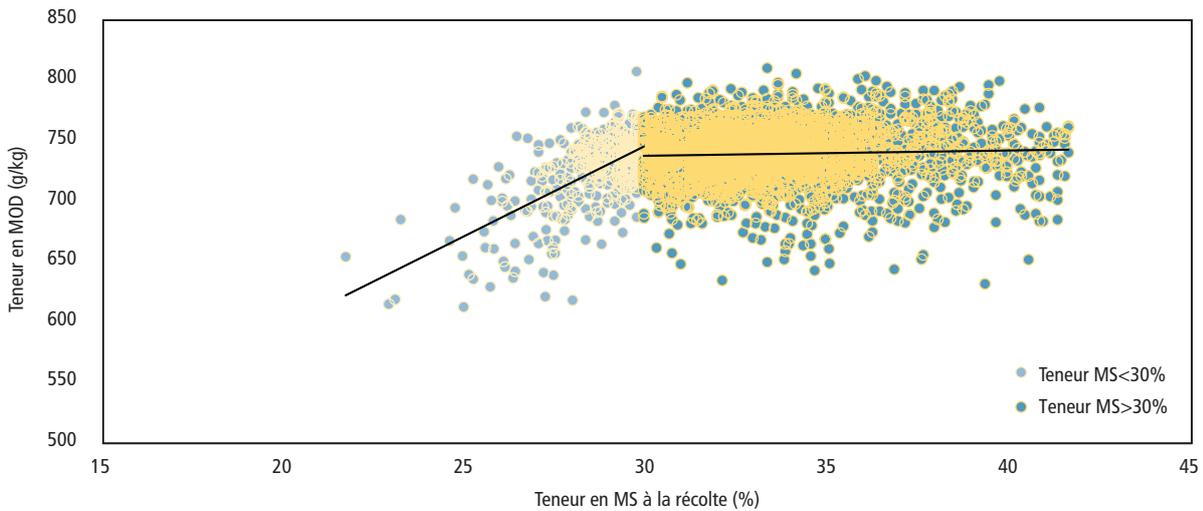


Figure 5 | Variation de la digestibilité de la matière organique (MOD, g/kg MS) du maïs ensilage selon la teneur en MS à la récolte (%); régression pour des teneurs en MS i) inférieures à 30 %: $y=14,72x+304,67$ ($n=397$, $R^2=0,38$, $p<0,0001$) et ii) supérieures à 30 %: $y=0,25x+730,92$ ($n=2602$, $R^2=0,001$, $p=0,14$).

les résultats de Struik *et al.* (1985) qui ont suivi l'évolution de la teneur en MOD pendant la croissance du grain. Ils ont mis en évidence, dans un premier temps, une forte diminution de la teneur en MOD liée aux hautes températures; cette diminution a ensuite été compensée par une meilleure croissance du grain. A maturité, la qualité des plantes cultivées à hautes températures a ainsi rattrapé celle des plantes cultivées à des températures plus basses. Lorsque la qualité des parties «vertes» est moins bonne, la qualité de la plante entière peut être satisfaisante grâce à une forte proportion de grain, à condition de ne pas récolter trop tôt. Une récolte légè-

rement anticipée aura moins d'impact sur la teneur en MOD dans un site relativement frais comme Reckenholz que dans un site plus chaud comme Changins où la teneur en MOD dépend davantage de la proportion de grain.

Effets de l'interaction variété x environnement

L'analyse de variance réalisée en 2008, 2009 et 2010 sur le rendement, la teneur en MOD et la teneur en amidon, montre que l'effet du site est de loin le plus important (tabl. 2). L'effet de la variété est toujours significatif, mais beaucoup moins important. L'effet de l'interaction

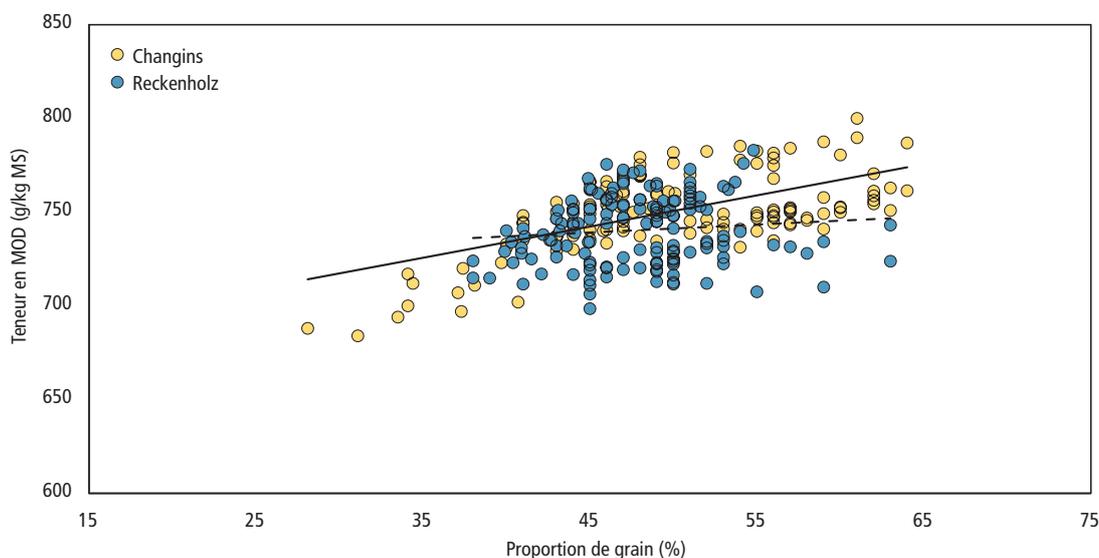


Figure 6 | Teneur en matière organique digestible (MOD, g/kg MS) en fonction de la proportion de grain pour les années 1991–2010 et les sites de Changins ($n=136$; $y=1,66x+667,4$; $R^2=0,36$; $p<0,0001$) et Reckenholz ($n=150$; $y=0,42x+720,25$; $R^2=0,01$; $p=0,1992$).

Tableau 2 | Carrés moyens des effets de l'environnement (site), de la variété et de l'interaction environnement x variété (site x var) pour le rendement (Rdt), la teneur en matière organique digestible (MOD) et la teneur en amidon dans les essais variétaux de 2008 à 2010

	2008				2009				2010			
	dl	Rdt (dt/ha)	MOD (g/kg)	Amidon (g/kg)	dl	Rdt (dt/ha)	MOD (g/kg)	Amidon (g/kg)	dl	Rdt (dt/ha)	MOD (g/kg)	Amidon (g/kg)
Site	7	62027***	24906***	107982***	6	62164***	70934***	48703***	7	73941***	28655***	80497***
Répétition	16	546ns	204ns	584ns	14	1455ns	835ns	862ns	16	756ns	608ns	1417ns
Variété	24	1914***	17773***	4847***	24	1050***	1510**	825*	24	1069***	2589***	11264***
Site x var.	168	328***	666***	1128***	144	398***	936*	762**	168	296***	421ns	1338***
Erreur	384	150	354	633	336	202	715	440	384	151	351	751

dl: degrés de liberté.

*, ** et ***: carré moyen significatif à p=0,05, 0,01 et 0,001.

ns: carré moyen non significatif.

est encore un peu plus faible, mais reste très souvent significatif. Les résultats des années précédentes montrent des résultats similaires (données non présentées).

Contrairement aux résultats de Argillier *et al.* (1997), on ne peut pas conclure que l'effet de l'interaction génotype x environnement sur la qualité est négligeable par rapport à l'effet variétal. Cet effet est faible sur la MOD, comparé à l'effet de la variété, mais l'effet sur la teneur en amidon est le plus souvent du même ordre de grandeur. L'effet de l'interaction génotype x environnement sur le rendement est en général significatif et assez important.

Ces résultats confirment qu'il serait possible d'optimiser la qualité et le rendement du maïs en sélectionnant les variétés les mieux adaptées pour chaque région. Le choix actuel des variétés sur la base de moyennes nationales permet de sélectionner les variétés présentant la qualité et les performances agronomiques les meilleures et les plus stables, quelles que soient les conditions de l'année. Une caractérisation préalable des sites de production et de la variabilité des conditions météorologiques pour chaque site serait nécessaire pour conseiller les variétés en fonction de leurs performances régionales.

Conclusions

Au cours des 20 dernières années, les rendements du maïs ensilage des variétés inscrites sur la liste recommandée ont augmenté significativement, tout en conservant un bon niveau de précocité. La qualité suit également une tendance à la hausse, mais avec des différences marquées entre les sites et les années.

La teneur en MOD varie entre les sites et les années ainsi qu'entre les variétés. L'interaction génotype x environnement est faible, suggérant qu'une variété à forte teneur en MOD sera performante quel que soit le lieu de production en Suisse. Néanmoins, cette interaction est significative pour le rendement et les paramètres de qualité, indiquant qu'une sélection de variétés par région pourrait être intéressante. Une telle approche nécessiterait une caractérisation préalable des sites. Pour atteindre le potentiel qualitatif d'une variété, il est essentiel de la récolter à une teneur en matière sèche d'au moins 30%. Ceci est d'autant plus important que la zone de production a des étés chauds, le grain ayant dans ces zones un rôle déterminant dans le déterminisme de la qualité. ■

Riassunto**20 anni di studio varietale del mais da silo in Svizzera**

In 20 anni la resa delle varietà di mais da silo semi-precoci (le più coltivate in Svizzera) è aumentata in media di 2 q SS/ha/anno, mantenendo un buon livello di precocità. Le varietà che presentano i maggiori difetti agronomici come un'eccessiva sensibilità all'allettamento, sono state eliminate. L'evoluzione del tenore in materia organica digeribile (MOD) è più difficile da stimare, a causa del forte impatto delle condizioni ambientali su questo criterio. Osserviamo delle differenze di resa e qualità tra i siti e gli anni. Oltre al 30 % di SS, il livello di maturità alla raccolta non ha più nessun influsso sul tenore MOD. Per contro, un raccolto troppo anticipato può penalizzare la qualità del foraggio, a causa di una proporzione dei granelli troppo debole, non compensata dalla migliore digeribilità delle parti verdi.

Sono stati confrontati i dati provenienti da diversi luoghi. I siti di Changins (Nyon, VD) e di Reckenholz (Zurigo, ZH) presentano delle caratteristiche molto diverse: a Changins, dove le estati sono più calde e più secche, raggiungiamo dei tenori in MS soddisfacenti per il raccolto (ca. 33 %) 2–4 settimane prima di Reckenholz dove le rese sono, generalmente, inferiori. Non si osserva una differenza altrettanto netta per la qualità nutrizionale. La MOD è meno correlata alla proporzione di granelli a Reckenholz ($R^2=0,01$, ns) rispetto a Changins ($R^2=0,21^{***}$) dove le piante sono più piccole e pertanto lo sviluppo delle pannocchie sembra essere in grado di compensare la diminuzione della digeribilità delle parti vegetative, legata alle temperature più elevate.

La valorizzazione dei risultati dello studio varietale del mais da silo sull'arco di 20 anni mostra come siano avvenuti progressi genetici significativi, in particolare per quanto riguarda la resa in SS e la qualità, a beneficio dei produttori.

Bibliographie

- Argillier O., Barriere Y., Traineau R., Emile J. C. & Hébert Y., 1997. Genotype x environment interactions for digestibility traits in silage maize estimated from in vivo measurements with standard sheep. *Plant Breeding* 116 (5), 423–427.
- Kruse S., Herrmann A., Kornher A., & Taube F., 2008. Evaluation of genotype and environmental variation in fibre content of silage maize using a model assisted approach. *European Journal of Agronomy* 28, 210–233.

Summary**20 years of variety testing in forage maize in Switzerland**

In the last 20 years, the yield of mid-early forage maize increased by 2 dt dry matter/ha/year. Varieties with major agronomical problems such as lodging were eliminated. The improvement of quality, and more specifically the content of digestible organic matter (DOM), is more difficult to evaluate, as it is highly influenced by environmental condition. Both yield and quality vary among locations and years. Dry matter content at harvest only influences the DOM up to 30 %, when seed filling is not complete and therefore grain content too low. This is one more reason not to harvest variety trial too soon, so that the late varieties can reach the minimum DM content (30 %).

Data from several locations were compared. For example, differences appeared between Changins (Nyon, VD) and Reckenholz (Zurich, ZH): in Changins, summers are warmer and dryer. Satisfying dry matter content for harvest was usually reached 2 to 4 weeks earlier than in Reckenholz. Yields were lower but with similar content of DOM. DOM was less correlated to grain content in Reckenholz ($R^2=0.01$, ns) than in Changins ($R^2=0.21^{***}$), where plants are smaller and ear development seems to be able to compensate the lower digestibility of the rest of the plant. New varieties showed significant improvement compared to older ones, especially for yield and quality parameters such as DOM. Variety trials over 20 years allowed these improvement to be available for the farmers.

Key words: forage maize, variety, digestible organic matter, genotype x environment interaction.

- Meisser M. & Wyss U., 1999. Influence du climat sur la croissance et le développement du maïs d'ensilage. *Revue suisse d'Agriculture* 31 (2), 71–76.
- Meisser M. & Weiss G., 2003. Valeur nutritive du maïs d'ensilage: quelle est l'importance des facteurs de variation. *Revue suisse d'Agriculture* 35 (1), 5-10.
- Struik P. C., Deinum B. & Hoefsloot J. M. P., 1985. Effects of temperature during different stages of development on growth and digestibility of forage maize (*Zea mays* L.). *Netherlands Journal of Agricultural Sciences* 33, 405-420.