



HAL
open science

Le potassium, remède contre la sécheresse ?

Elsa Martineau, Lionel Jordan-Meille, Christophe Nguyen

► **To cite this version:**

Elsa Martineau, Lionel Jordan-Meille, Christophe Nguyen. Le potassium, remède contre la sécheresse ?. 12. Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse du COMIFER et du GEMAS, Comité Français d'Etude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée (COMIFER). FRA., Nov 2015, Lyon, France. hal-01594441

HAL Id: hal-01594441

<https://hal.science/hal-01594441>

Submitted on 26 Sep 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

« LE POTASSIUM, REMEDE CONTRE LA SECHERESSE ? »

Martineau E. Jordan-Meille L. Domec JC.

Introduction

Les changements climatiques actuels ne vont pas s'atténuer avec les années à venir, bien au contraire. Dans un rapport de l'IPCC de 2014 il faut s'attendre à une augmentation de températures de plusieurs degrés à la surface du globe. L'augmentation des évènements climatiques extrêmes tels que, les sécheresses extrêmes et la raréfaction de l'eau, vont entraîner des perturbations au niveau de la production agricole des régions tempérées. Les espèces telles que le blé, le riz et le maïs devraient subir des répercussions négatives sur leur production (IPCC 2014).

C'est dans ce contexte que nous nous intéressons au rôle que pourrait jouer le potassium (K). En effet, le potassium est connu comme étant un élément majeur dans l'étude des interactions avec l'alimentation hydrique. Ceci est dû à sa très forte concentration dans l'eau des tissus et à sa mobilité dans les plantes. Il participe ainsi à la turgescence des cellules en croissance, maintien de leur teneur en eau, et tient une place de premier ordre dans la régulation stomatique (Arquero et al. 2006, Benloch et al. 2008). Des résultats sur ce sujet s'accordent sur un effet positif du potassium sur l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE) (Grzebisz et al. 2013), celle-ci définie comme la quantité d'eau nécessaire à la production d'une unité de biomasse. Cette meilleure efficacité résulterait d'une meilleure capacité des plantes bien nourries en potassium à réguler les échanges d'eau. Dès lors, les auteurs préconisent l'apport de potassium pour minimiser les effets négatifs d'un stress hydrique, voire limiter les pertes en eau des peuplements végétaux.

L'expérimentation relatée dans cet article a comme objectif de tester l'effet de l'alimentation potassique des cultures sur leur capacité à résister au stress hydrique. Elle se déroule en conditions réelles de plein champ, sur un essai de fertilisation de longue durée situé à l'INRA de Cestas-Pierroton (33). A ce jour, il existe peu d'études similaires menées en conditions réelles sur le maïs. Lors de cette expérimentation, la mesure et l'analyse de plusieurs variables clés du développement, de la croissance et de l'état physiologique de la plante de maïs (*Zea mays*) ont été réalisées. D'un point de vue opérationnel, les retombées de cette recherche concernent l'amélioration des pratiques de fertilisation (point de vue technico-économique) en fonction des régimes hydriques.

Etat de l'art : Les effets attendus du potassium en condition de stress hydrique

L'eau est indispensable aux plantes à tous ces niveaux d'organisation (Deswarte 2014), A l'échelle moléculaire, l'eau joue un rôle majeur dans toutes les réactions enzymatiques, au niveau de la phase photochimique de la photosynthèse, et apporte de l'hydrogène et de l'oxygène à la plante. A l'échelle de la cellule, l'eau impacte la morphologie des organes et leur élongation. Enfin, à l'échelle de la plante, l'eau permet la bonne assimilation des solutés présents dans le sol et leur migration vers les parties aériennes de la plante, en assurant également la régulation thermique des tissus exposés au soleil par la transpiration. Un déficit en eau prolongé impacte donc négativement les composantes du rendement (Walker and Hsiao 1992). Un état de sécheresse implique une fermeture des stomates de la plante entraînant une restriction des échanges gazeux (Jaleel et al., 2009). En plus d'une restriction de l'approvisionnement en eau, il y a une diminution du potentiel hydrique foliaire, ainsi que de turgescence (Aslam et al., 2014).

A ce jour, il existe peu de travaux décrivant les effets de la nutrition potassique sur une plante en état de stress hydrique. Néanmoins, diverses études ont montré que l'application d'engrais potassique permettait d'atténuer les effets néfastes de la sécheresse sur la croissance de l'orge, du tournesol (Lindhauer, 1985), de la canne à sucre ou encore du riz. En effet, il existe plusieurs mécanismes communs influencés par l'eau et par le potassium, comme la photosynthèse, la croissance cellulaire, la conductance stomatique (Hsiao et al. 1976), reliées au potentiel de turgescence des cellules. Une expérimentation similaire à celle mise en place, menée sur du maïs irrigué ou non, à différents niveaux de nutrition potassique, a montré que l'application de potassium permettait d'atténuer progressivement les effets néfastes du stress hydrique (Aslam et al., 2014). L'application de

potassium, en condition de sécheresse, au-delà de son strict optimum agronomique, permettrait d'améliorer la production de matière sèche et le développement de la surface foliaire, par une meilleure rétention d'eau (Lindhauer, 1985). De plus, elle permettrait de retarder la sénescence des feuilles, d'accélérer l'apparition de celles-ci et contribuerait ainsi à augmenter la surface foliaire verte finale (Battie-Laclau et al., 2013). Parmi ses effets physiologiques, on peut trouver aussi que le potassium semblerait améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE) (Grzebisz et al., 2013) en agissant d'une part sur l'amélioration des prélèvements d'eau par la plante et sur les échanges hydriques (osmorégulation : Fournier et al., 2005), et d'autre part en contrôlant l'ouverture et la fermeture des stomates (Arquero et al., 2006), limitant ainsi les pertes d'eau entre la plante et l'atmosphère. Des améliorations notables ont pu être observées sur le maïs concernant la teneur en eau des feuilles, le potentiel hydrique de la feuille, la photosynthèse, la transpiration ou encore le rendement en grain (Aslam et al., 2014).

Matériels et Méthodes

Dispositif expérimental

L'expérimentation de 2015 s'est déroulée sur un essai longue durée du domaine de l'INRA de Cestas-Pierroton. Cet essai d'environ 0.5 ha, mis en place en 1996, possède des placettes de 12.8 m * 18m et donne accès à un gradient de concentrations en potassium dans le sol de K0.5 à K4 (Tab.1), avec comme référence K1 (recommandation de fertilisation maïs grain) soit 40kg K/ha sur sol correctement pourvu (Comifer 2009). La modalité K0.5 vise à carencer modérément le maïs en potassium, en permettant le déroulement d'un cycle de végétation entier, mais avec des symptômes visibles de carence potassique. La modalité K4 vise à apporter au maïs une quantité de potassium située au-delà de celle suffisante. Un apport de dolomie évite les carences induites en magnésium. Le sol est un podzol landais avec 2,1% de limon, 4,7% d'argile, et de 93,3% de sable; le taux de matière organique du sol est de 3,9% et le pH oscille entre 5.3 et 6.5 selon la saison et l'ancienneté du chaulage (Jordan-Meille et Pellerin 2004). Le maïs de la variété DKC5784 (variété hybride tardive et résistance à la verse) a été semé début mai 2015.

Tableau 1. Concentrations moyennes en $K_{\text{échangeable}}$ (mg.g^{-1}) sur l'horizon 0-50cm (02/06/15) selon les modalités potassiques en fonction des lignes de répétitions et moyenné sur l'ensemble de la parcelle de Pierroton avec \pm l'erreur standard (ES).

	Ligne 1	Ligne 2	Ligne 3	Ligne 4	Moyenne
K0.5	18	20	21	17	22 \pm 3
K1	22	35	24	27	31 \pm 5
K4	61	43	50	63	69 \pm 16

Deux traitements hydriques ont été imposés, l'un avec un optimum d'irrigation (290mm du semis à fin Septembre) et l'autre avec comme objectif d'atteindre le fond de la réserve utile du sol, ce qui correspond à 5% humidité volumique du sol pendant plusieurs jours afin d'induire un stress hydrique prolongé (102mm du semis à fin Septembre). Pour suivre et contrôler le statut hydrique du sol durant la saison, plusieurs méthodes ont été utilisées de manière complémentaire : apparence visuelle des plantes (enroulement des feuilles), méthode du bilan hydrique, détermination de l'humidité par pesées, sondes volumétriques mises en place après le semis, en surface (sonde de type ML2X) et à plusieurs profondeurs (20, 40 et 60cm, sonde de type CS616).

Après un labour de 25cm de profondeur et un passage au vibroculteur, le semis ainsi que le premier apport d'azote (50 kg N ha^{-1}) ont été effectués le 06/05. En suivant, le premier traitement phytosanitaire a eu lieu. La densité de maïs à la levée était de $81800 \text{ plante.ha}^{-1}$. Un deuxième apport d'azote (50 kg N ha^{-1}) a été fait le 27/05 au stade cinq feuilles visibles. Puis un second traitement phytosanitaire avec un insecticide a eu lieu le 03/06 au stade sept feuilles visibles. Enfin, un dernier apport d'azote (150 kg N ha^{-1}) a été effectué le 12/06. Pour finir, la récolte a été avancée au 28/09 suite à un fort coup de vent qui a détruit en partie (verse) les traitements déficitaires en K.

Tous les paramètres météorologiques ont été enregistrés par une station météo France (station météo Pierroton du réseau CLIMATIK: <https://intranet.inra.fr/climatik/do/welcome>) situé juste à côté de la parcelle. La saison 2015 a été marquée par une longue période de sécheresse où la température moyenne était supérieure à 20°C et des précipitations quasiment nulles. Ces périodes étaient localisées à la fois en pré et post-floraison. La période du 13/06 au 27/07 a été particulièrement sèche, avec une température maximale instantanée de 39.3°C le 30/06 (Tab.2). La période de sensibilité maximale du maïs à la sécheresse, située entre le début de la floraison femelle et la formation des grains, estimée entre le 13 juillet et le 6 août, coïncide avec la période la plus sèche mesurée au cours de l'année culturale (Fig.1).

La gestion différenciée de la fertilisation potassique permet d'obtenir lors de la campagne destructive des concentrations en potassium dans les feuilles de maïs qui suivent bien le gradient potassique voulu (Tab.3).

Tableau 2. Conditions météorologiques mensuelles durant la saison de culture 2015 sur la parcelle de Pierroton.

Mois	Tmoy (°C)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Pluviométrie (mm)	Humidité (%)	ETPP(mm)
Mai	15.4	28.3	3.6	14.5	78.6	3.6
Juin	15.5	39.3	7.3	43.0	74.8	4.7
Juillet	16.0	37.8	8.2	27.0	73.2	4.8
Aout	16.0	35.6	6.0	106.5	76.9	3.9
Septembre	15.5	28.9	4.7	45.5	75.8	4.3

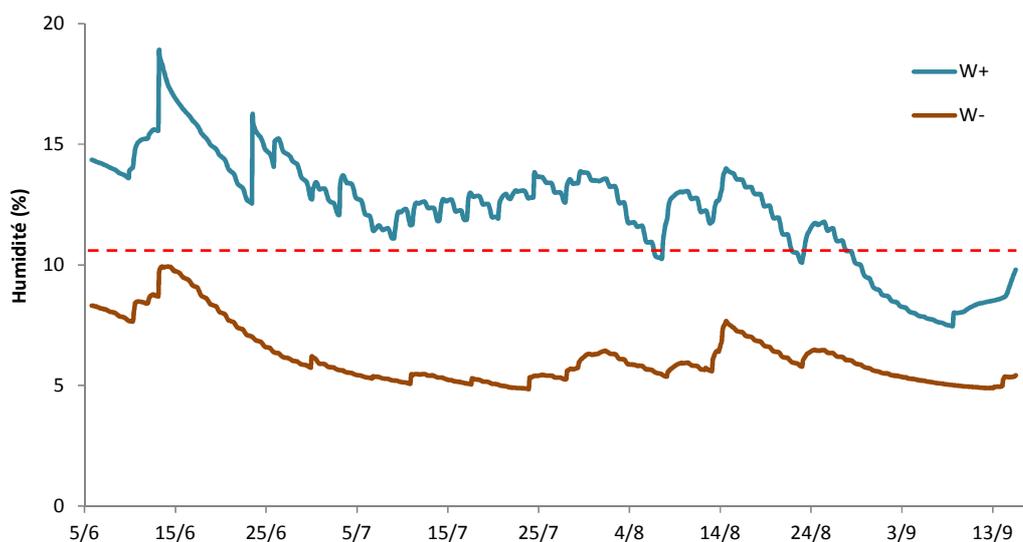


Figure 1 : Teneur en eau du sol en % moyenné sur l'horizon 10-70cm pour le pour le traitement irrigué (W+) et stressé en eau (W-).

Tableau 3. Moyenne des teneurs en potassium (mg.g^{-1}) dans les feuilles de maïs au moment de la floraison pour le traitement irrigué (W+) et stressé en eau (W-) en fonction des modalités K, avec $n=7 \pm$ l'erreur standard (ES).

	Moyenne W-	Moyenne W+
K0.5	4.9 \pm 0.4	7.0 \pm 0.2
K1	16.2 \pm 0.5	14.0 \pm 0.5
K4	26.3 \pm 0.4	25.0 \pm 1.0

Mesures

Pour caractériser les différents effets du potassium sur des plants de maïs subissant un stress hydrique, différentes variables ont été suivies telles que celles relatives à la croissance et au développement ainsi qu'à l'état physiologique de la plante.

Le développement de la culture, défini, pour le stade végétatif, par le nombre de feuilles visibles, et pour le stade floraison, par la date d'émission des soies, a été suivi une fois par semaine durant tout son cycle jusqu'à la **floraison**. Pour cela, le suivi a été fait sur sept plantes contiguës par modalités. Une feuille a été considérée comme visible dès que la pointe de la feuille était visible. Le **phyllotherme**, (intervalle de temps entre l'apparition de deux feuilles successives, exprimé en degré jour) en a été déduit. L'évolution du nombre de feuilles sèches (nombre de feuilles mortes à plus de 50% de leur surface) a été caractérisée.

Les variables de la croissance concernent la surface foliaire, la production de biomasse et la hauteur de la culture. Pour chacune des modalités testées, la longueur de la feuille 14 a été mesurée tous les deux jours, jusqu'à ce que la feuille soit ligulée, témoignant de la fin de son développement. Ces mesures ont permis d'en déduire la **vitesse d'allongement foliaire** (cm.degré jour⁻¹). La **surface foliaire** (m²) a été déterminée (avec un planimètre (LI-3000)) sur sept autres plantes contiguës. Elles ont été coupées au moment de la floraison (apparition des soies sur plus de 50% de l'échantillon testé n=30) ainsi que la production de biomasse. Elle a été estimée à partir de la mesure de biomasse des plantes entières, (sept plantes) ainsi qu'à la récolte sur les grains (2 rangs de 8 m soit environ 100 plants). La **hauteur** (cm) de chaque plante a aussi été mesurée.

Enfin, les variables témoignant du fonctionnement de la plante, telles que la transpiration, la conductance stomatique (**gs**) (mol.m⁻².s⁻¹), la photosynthèse (**A**) (μmol.m⁻².s⁻¹), ont été étudiées et mesurées (sur quelques plantes au hasard par micro-parcelle ou en continu durant une dynamique journalière sur des feuilles en croissances) à l'aide d'un analyseur d'échange gazeux (LI-6400). Le rang des feuilles mesurées correspondant à la dernière feuille en croissance, donc dans la partie haute des plantes. L'efficacité d'utilisation de l'eau (**WUE**) (kg.L⁻¹) est déduite du rapport de la biomasse produite (rendement grains) rapportée à la consommation d'eau mesurée par les sondes volumétriques (sur une période restreinte à Juin – Septembre).

Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R (version 3.1.3). Les moyennes sont calculées pour n=7 avec ± l'erreur standard (ES), sauf pour la dynamique journalière où n=3. Les paramètres et leurs interactions ont été testés avec des régressions linéaires et des analyses de variance à deux facteurs. Les deux tests ont été considérés comme significativement différents à p < 0,05.

Résultats

Effet du stress hydrique

Avec les conditions climatiques estivales exceptionnelles de cette année 2015, l'effet du stress hydrique s'est fortement fait ressentir sur tous les paramètres suivis. Le développement a été impacté négativement avec un ralentissement du rythme d'apparition des feuilles passant d'environ 37.1 à 39.8 °Cjour pour les traitements non limités en potassium soit 8% et 6% pour les traitements en déficit potassium (Tab.4).

La floraison femelle à 100% a été retardée de 10 jours (soit de 14%) pour les K4 et de 15 jours (20%) pour les K0.5. De plus, le nombre final de feuille formées a diminué significativement de 6% ($p < 0.001$) pour les plants de la modalité K4 subissant le stress hydrique passant de 20.5 feuilles visibles à 19.3 feuilles visibles et de 3% sur les K0.5 (données non montrées).

La croissance a elle aussi été impactée par ce stress avec comme conséquence une diminution de 16% de la surface foliaire totale passant de 0.70 à 0.59 m².plante⁻¹ pour les K4 et de 27% pour les K0.5 (Fig.2a). Cette moindre surface foliaire s'explique essentiellement par un très fort ralentissement de la vitesse d'allongement foliaire (VAF) des feuilles émises au plus fort du stress hydrique (24/06 au 10/07). La VAF est ainsi diminuée de 65% pour les K4 (chute de 0.71 à 0.25 cm.C°jour⁻¹) (Fig.2b) et de 52% pour les K0.5. Les conséquences sur la hauteur des plants est très distincte avec une chute de 38% en moyenne entre les deux parcelles sous régimes hydriques différents (Fig.2c).

L'impact de la sécheresse a aussi diminué la photosynthèse maximale et la conductance stomatique maximale (prise à 13h) lors de la dynamique journalière de l'ordre de 80% pour les K4 et 50% pour les K0.5 (Fig.3a,b), en lien avec l'état de siccité du sol et de l'atmosphère. En revanche, lors de mesures instantanées prises en conditions standard (pas d'effet desséchant de l'air) tout au long de la culture (Fig.4), il n'y a pratiquement pas d'influence de la teneur en eau du sol sur les résultats.

Tableau 4 : Phyllotherme (°Cjour) moyen ± ES (n=7) exprimé en fonction des traitements K et du traitement irrigué (W+) et stressé en eau (W-)

Modalité	Phyllotherme
K0.5 W-	41.9 ± 1.0
K1 W-	39.7 ± 0.7
K4 W-	39.8 ± 0.5
K0.5 W+	39.5 ± 1.0
K1 W+	37.3 ± 0.6
K4 W+	37.1 ± 0.8

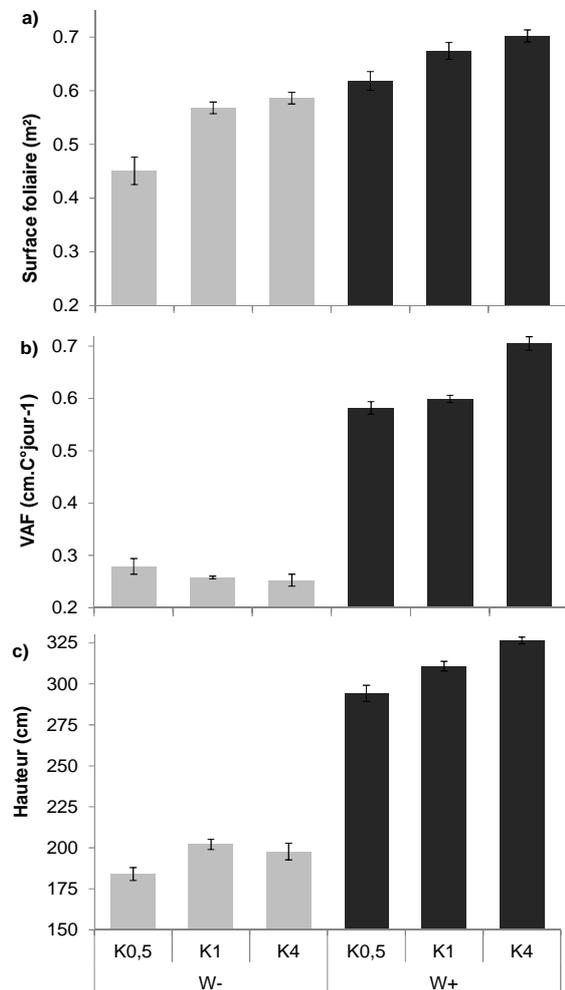


Figure 2 : Moyenne ± ES (n=7) de la surface foliaire (a), de la vitesse d'allongement foliaire de la feuille 14 (VAF) (b) et de la hauteur (c) exprimé en fonction des traitements K et du traitement irrigué (W+) et stressé en eau (W-).

On observe une diminution nettement significative ($p < 0.001$) de la biomasse végétale de 25% en moyenne (données non montrées) et du rendement de 25% pour les K4 et 50% pour les K0.5 (Fig.5). La consommation d'eau a été, elle, divisée par deux en conditions hydriques limitantes (112L vs 217L entre Juin et Septembre). La combinaison des effets du stress hydrique sur le rendement et la consommation d'eau montre une efficacité d'utilisation de l'eau meilleure pour les plantes stressées hydriquement (Fig.6) avec une augmentation de 38% (de 5.7 à 7.4kg.L⁻¹) pour les K4 et de 54% (de 3.8 à 5.8 kg.L⁻¹) pour les K0.5.

Sur un critère physique tel que l'enroulement des feuilles, on observe une très grande différence de réponse pour les plantes subissant un stress hydrique prononcé et celles n'en subissant pas (Fig.7). En effet, il y a un enroulement 96% plus important pour les plantes en condition hydrique limitante.

Conclusion : Il existe un fort impact du stress hydrique sur toutes les composantes physiologique du maïs

Effet du potassium

En conditions non limitantes en eau on peut observer que le déficit en potassium a des conséquences sur les critères liés à la croissance. En effet, la plante répond par une augmentation de 6% en moyenne du temps entre l'apparition de deux feuilles successives allant de 37.05 à 39.45 °Cjour pour K4 et K0.5 respectivement. De plus, les plantes diminuent ($p < 0.01$) leur nombre final de feuilles de 20.5 (K4) à 19.64 (K0.5) en moyenne. En revanche, on n'observe pas plus de mortalité de feuilles sur les modalités pauvres en potassium (données non montrées). Si l'on ajoute à cela le ralentissement de 18% de la vitesse d'élongation foliaire de 0.71 à 0.58 cm.C°jour⁻¹ (Fig.2b), le résultat de ces effets combinés se traduit par une diminution de 11% de la surface foliaire finale passant de 0.70 à 0.62 m².plante⁻¹, entre K4 et K0.5 sur les W+ et de 24% sur les W- (Fig.2a). Les hauteurs de plantes sont diminuées de 10% entre les traitements K4 et K0.5 passant de 326 à 294cm (Fig.2c).

Le niveau de nutrition potassique ne semble pas intervenir sur le fonctionnement des échanges gazeux du maïs. En effet, la dynamique de photosynthèse et de la conductance stomatique ne fluctuent pas entre les traitements K (indépendamment de l'effet eau) au cours d'une journée (Fig3.a,b) Ces résultats sont confirmés par des mesures, plus ponctuelles, réalisées à d'autres dates (Fig.4). Cependant, sur la durée Juin-Septembre, la consommation en eau des plantes n'est proportionnelle à l'alimentation en potassium que sur les traitements limités en eau (99, 115 et 123mm pour les traitements K0.5, 1 et 4 respectivement).

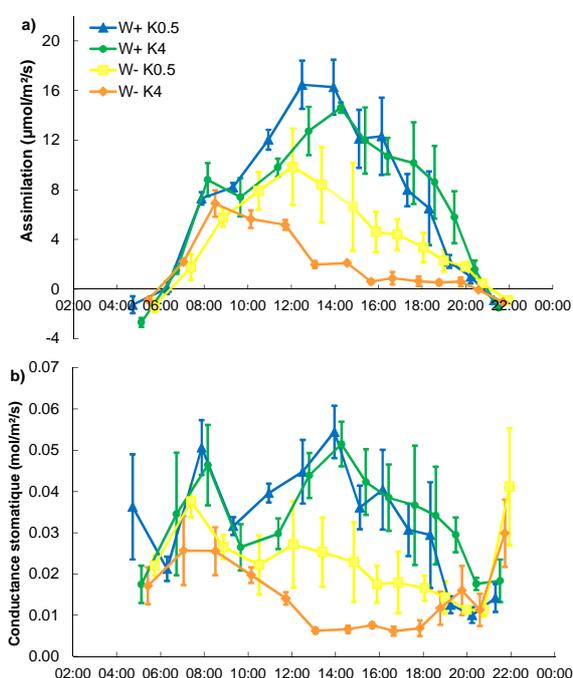


Figure 3 : Dynamique journalière (heure locale) de la photosynthèse (a) et de la conductance stomatique (b) ± ES (n=3) selon les traitements K0.5 et K4 et du traitement irrigué (W+) et stressé en eau (W-).

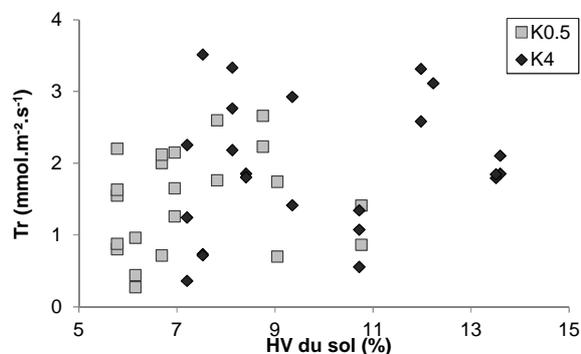


Figure 4 : Transpiration instantanée (Tr) des traitements K0.5 et K4 en fonction de la teneur en eau du sol (HV). Paramètres fixés : PAR=1400μmol.m⁻².s⁻¹, [CO₂]=400ppm, VPD<1.5 (HR ≥ 70%), Température entre 20°C et 25°C.

Le rendement est différent entre les traitements potassiques ($p < 0.01$) avec une diminution entre les K4W+ et K0.5W+ de 28% et 37% pour les K4W- et K0.5W- (Fig.5). Plus précisément, le seuil de non-réponse au potassium est abaissé pour le traitement stressé en eau à 30ppm de $K_{\text{éch}}$, alors que le rendement des plantes irriguées n'a pas connu de plateau cette année.

Le WUE est augmenté avec l'apport de potassium dans les deux conditions passant de 5.8 à 7.4 kg.L⁻¹ (22%) et de 3.8 à 5.7 kg.L⁻¹ (33%) pour les W- et W+ respectivement (Fig.6)

La réduction de la largeur foliaire est plus importante pour les plantes bien alimentées en potassium avec une différence de 8% sur les plantes subissant le stress hydrique (Fig.7).

Un effet verse a été constaté sur les traitements K0.5. Une hypothèse serait qu'il y aurait un effet du potassium sur la composition des parois. Les composés du carbone tel que la lignine, la cellulose... vont donc être dosés pour essayer de comprendre la cause de cet effet verse. Le rendement devient très dépendant de cet effet lors de forts coups de vent, et peut vite se retrouver proche de 0 en cas de déficit potassique.

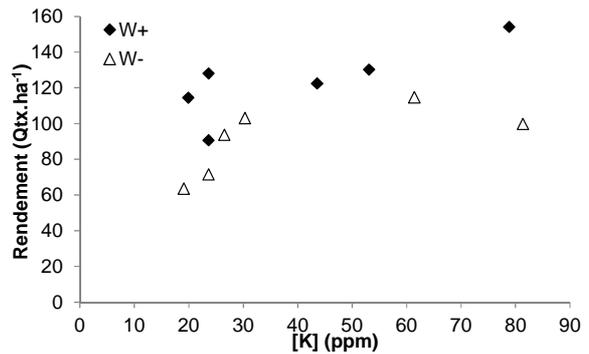


Figure 5 : Rendement en grain du traitement irrigué (W+) et stressé en eau (W-) en fonction de la teneur en K du sol sur 0-50cm.

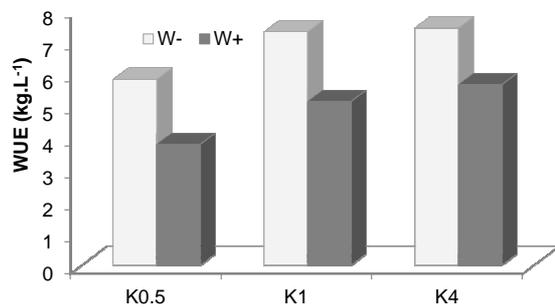


Figure 6 : Efficacité d'utilisation de l'eau (WUE) exprimé en fonction des traitements K et du traitement irrigué (W+) et stressé en eau (W-).

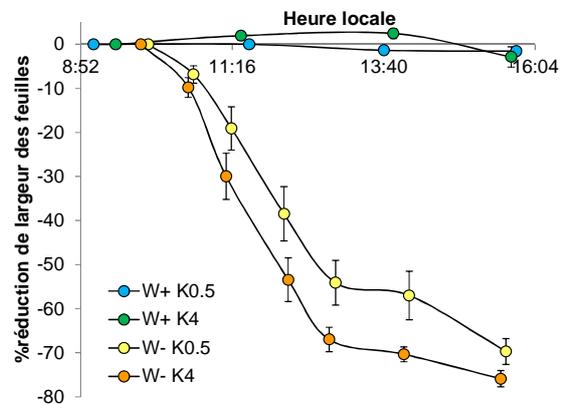


Figure 7 : Dynamique d'enroulement des feuilles (% de réduction de la largeur) ± ES (n=7) selon les traitements K0.5 et K4 et du traitement irrigué (W+) et stressé en eau (W-).

Conclusion : L'effet du potassium est net sur les variables de croissance, mais plafonne plus rapidement en conditions hydriques limitantes. Son influence sur les échanges gazeux n'a pas été démontrée.

Interaction Eau * Potassium

Des interactions significatives entre K et Eau sont observées seulement sur les critères de développement et de croissance (nombre de feuilles visibles finale, VAF et hauteur) (Tab.5). Dans tous ces cas, la carence en potassium amplifie les effets du stress hydrique, au-delà du cumul des effets combinés. A l'inverse, on n'observe jamais de situations où les plantes du traitement K4 auraient subi une atténuation des effets du stress hydrique (l'effet d'interaction moindre que l'effet combiné Eau+K).

Tableau 5 : Résultats des interactions entre l'alimentation hydrique et potassique, sur les différents paramètres mesurés. Les effets des stress relatifs sont calculés avec comme référence le traitement K4 W+. Les signes indiquent l'impact de la carence en potassium et en eau (+ / - : augmentation / diminution respectivement)

Paramètres	Effet K	Effet stress K Relatif (%)	Effet Eau	Effet stress Eau Relatif (%)	Interaction Eau * K
Phyllotherme	p<0.01	+6.5	p<0.001	+7.5	n.s.
Nombre de FVfinale	p<0.01	-4.2	p<0.001	-5.9	p<0.05
Floraison	n.s.	+3.5	p<0.05	+14.3	n.s.
Surface foliaire	p<0.01	-11.4	p<0.001	-15.7	n.s.
VAF	p<0.001	-18.3	p<0.001	-67.8	p<0.001
Hauteur	p<0.01	-9.8	p<0.001	-39.3	p<0.05
Photosynthèse max	?a priori non	+29.3	oui	-84.6	?
Conductance stomatique max	?a priori non	+5.9	oui	-88.0	?
Enroulement des feuilles	oui	+45.4	oui	-96.3	?
Biomasse	n.s.	0	p<0.001	-21.5	n.s.
Rendement	p<0.01	-27.9	p<0.001	-24.6	n.s.
WUE	oui	-33.1	oui	+37.9	?

Conclusion : en cas de stress hydrique, c'est le manque de K qui constitue un vrai facteur aggravant. Le fait d'en avoir plus que l'optimum (K1) ne change pas le résultat. Il y a une colimitation des effets K et Eau seulement pour K0.5.

Discussion : du bon usage de l'eau transpirée ...

Le rôle de chaque facteur de croissance (K et Eau) a été testé sur la culture de maïs, ainsi que leurs interactions. Les effets du potassium sur le rythme de développement de la plante, la croissance foliaire, le rendement et l'efficacité d'utilisation de l'eau sont conformes à la littérature (Lindhauer 1985, Jordan-Meille et Pellerin 2004, Arquero et al. 2006, Battie-Laclau et al., 2013). Nous avons même assisté à des résultats originaux touchant l'enroulement des feuilles aux heures les plus sèches de la journée, facilité par le potassium, ou sur la sensibilité à la verse des plantes. Les effets du stress hydrique, souvent supérieurs dans leur significativité à ceux du potassium, ont aussi été bien identifiés, y compris sur une partie des résultats touchant aux échanges gazeux. Les réponses croisées aboutissent rarement à une simple addition des effets, comme c'est le cas avec le développement et la surface foliaire. Dans la plupart des cas, on assiste plutôt à des seuils de réponses au potassium qui diffèrent entre les deux modalités hydriques. Le cas le plus emblématique est celui du rendement où l'on voit qu'une culture irriguée valorise les doses très fortes de potassium, alors qu'en condition de stress hydrique, seul le traitement K0.5 est pénalisé, au-delà d'ailleurs de l'addition des deux effets séparément (interaction négative).

L'effet majeur du potassium est d'agir sur la surface foliaire. Dès lors, on peut se demander dans quelle mesure ce phénomène, qui s'accompagne forcément d'une surface transpirante supérieure, peut être compensé par le rôle connu (et pas vraiment démontré ici à l'échelle de feuilles en croissance) d'une meilleure maîtrise des pertes en eau, voire d'une prospection racinaire accrue (non mesuré ici). Nous avons voulu calculer, à l'échelle de la culture, la contribution du potassium à l'augmentation de la transpiration (pertes supposées proportionnelles à l'augmentation de surface foliaire) et évaluer un éventuel effet de limitation des pertes (Fig.8).

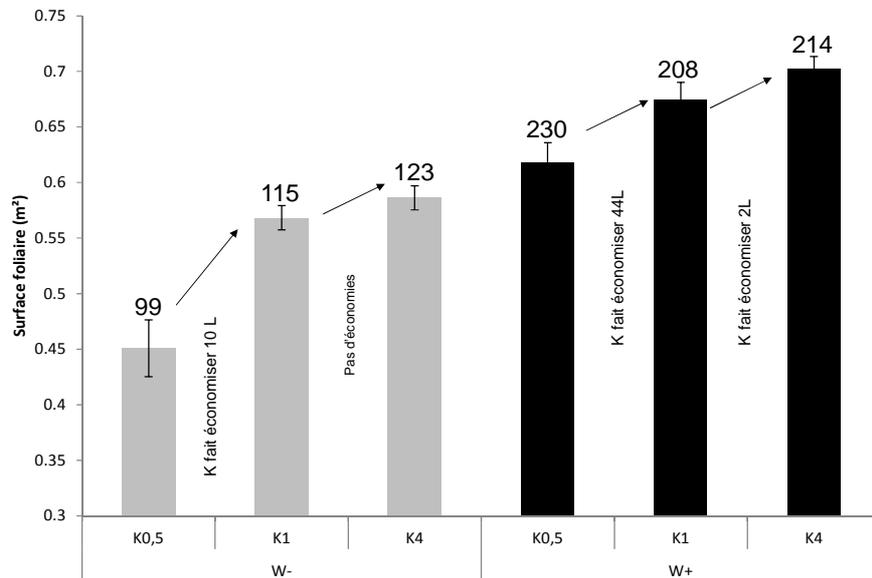


Figure 8 : Schéma illustrant l'estimation de l'eau économisée selon les modalités K et le traitement irrigué (W+) et stressé en eau (W-). Les chiffres représentent l'eau consommée (calculée via les sondes).

Les résultats montrent, en accord avec ceux de la figure 6, que les économies d'eau les plus conséquentes portent sur la modalité irriguée : le potassium augmente la surface foliaire, mais les pertes diminuent. L'économie ainsi engendrée est évaluée à 42mm entre un traitement K0.5 et K4. Pour les parcelles stressées hydriquement, l'effet "régulateur" du potassium est beaucoup moins net (10mm) et restreint à une gamme de teneur en potassium réduite (entre K0.5 et K1 seulement). Cet effet souvent cité en bibliographie (Assmann and Shimazaki 1999, Arquero et al. 2006, Benlloch et al. 2008) n'était pas visible sur les mesures d'échanges gazeux, probablement en raison d'une mauvaise représentativité des feuilles échantillonnées, toujours vertes et plutôt jeunes... L'effet "régulation osmotique" du potassium ne permet en aucun cas de compenser les pertes en eau liées à son rôle sur la surface foliaire. De ce point de vue, le potassium n'est pas un remède contre la sécheresse, comme on pouvait s'en douter. Mais la présence d'une concentration minimum en potassium dans le sol, évaluée ici aux alentours de 30ppm de $K_{éch}$, permet à la plante de transpirer beaucoup moins que ce que l'on aurait supposé / permet à la plante de réduire sa transpiration contrairement à ce qu'il était supposé en ne tenant compte que de sa surface foliaire.

La gestion de la fertilisation potassique dépend bien du potentiel de production permis par la disponibilité en eau. On a montré qu'en conditions hydriques non limitantes, le potassium est bien valorisé sur le plan du rendement, et que même à forte dose, il permet une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau. A l'opposé, lorsqu'un risque de sécheresse se pose, il est nettement préférable de ne pas exposer la plante à un risque de forte croissance végétative par des apports importants de potassium, qui l'exposerait plus tard à des pertes en eau que même une meilleure régulation stomatique ne saurait contraindre.

Références bibliographiques

- Arquero O, Barranco D, Benlloch M (2006) Potassium Starvation Increases Stomatal Conductance in Olive Trees. *HortScience* 41:433-436.
- Aslam M, Zamir MSI, Afzal I, et al (2014) Role of potassium in physiological functions of spring maize (*Zea mays* L.) grown under drought stress. *JAPS, Journal of Animal and Plant Sciences* 24:1452–1465.
- Assmann SM, Shimazaki K (1999) The multisensory guard cell. Stomatal responses to blue light and abscisic acid. *Plant Physiology* 119:809–816.
- Battie-Laclau P, Laclau J-P, Piccolo M de C, et al (2013) Influence of potassium and sodium nutrition on leaf area components in *Eucalyptus grandis* trees. *Plant and Soil* 371:19–35. doi: 10.1007/s11104-013-1663-7
- Benlloch-González M, Arquero O, Fournier JM, et al (2008) K⁺ starvation inhibits water-stress-induced stomatal closure. *Journal of Plant Physiology* 165:623–630. doi: 10.1016/j.jplph.2007.05.010
- Deswarte JC (2014) ARVALIS - Institut du végétal. Available online: <http://www.arvalis-infos.fr/comprendre-les-mecanismes-physiologiques-mis-en-jeu-chez-une-plante-souffrant-de-la-secheresse-@/view-12517-arvarticle.html>
- Fournier JM, Roldán ÁM, Sánchez C, et al (2005) K⁺ starvation increases water uptake in whole sunflower plants. *Plant Science* 168:823–829. doi: 10.1016/j.plantsci.2004.10.015
- Grzebisz W, Gransee A, Szczepaniak W, Diatta J (2013) The effects of potassium fertilization on water-use efficiency in crop plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 176:355–374. doi: 10.1002/jpln.201200287
- Hsiao T, Acevedo E, Fereres E, Henderson DW (1976) Stress Metabolism. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.* 273:479-500
- Jaleel CA, Manivannan P, Wahid A, et al (2009) Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigments composition. *Int J Agric Biol* 11:100–105.
- Jordan-Meille L, Pellerin S (2004) Leaf area establishment of a maize (*Zea mays* L.) field crop under potassium deficiency. *Plant and soil* 265:75–92.
- Linhauer MG (1985) Influence of K nutrition and drought on water relations and growth of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 148:654–669. Doi: 10.1002/jpln.19851480608.
- Walker S, Hsiao T (1992) Osmoticum, water and dry matter deposition rates in the growth zone of *Sorghum* leaves under water deficit conditions. *Environmental and Experimental Botany* 33:447-456.