

# BESOINS DE RECHERCHE SUR LA NUTRITION POTASSIQUE DES PLANTES

Lionel JORDAN-MEILLE, ENITA de Bordeaux, UMR INRA/ENITAB TCEM,  
1 cours du Général de gaulle, CS 40201, [l-jordan@enitab.fr](mailto:l-jordan@enitab.fr)

## 1. Les enjeux autour de la nutrition K des cultures

### 1.1. Le potassium, un élément dans l'ombre de l'azote et du phosphore

Les activités de recherche concernant la problématique du potassium (K) en agriculture semblent avoir connu leur apogée dans les années 80. Les premiers travaux significatifs démarrent dès les années 50. L'Institut International de la Potasse en publia un très grand nombre dans sa « Revue de la potasse », éditée de 1956 à 1995. Plus tard, on peut souligner la parution de l'ouvrage « Potassium in Agriculture » de l'American Society of Agronomy (A.S.A. 1985). Depuis, la recherche sur le K est bien moins visible et structurée. Ceci est à imputer en partie à la teneur relativement importante de nos sols en potassium (Europe de l'Ouest), sa biogéochimie relativement simple, une caractérisation de sa biodisponibilité globalement consensuelle, l'absence de problématique environnementale et sanitaire liée à ses transferts, et l'abondance au niveau mondial de ses réserves. De fait, le potassium est relégué très loin derrière l'azote et le phosphore en tant que thème de recherche. Par exemple, en interrogeant la base de données CAB avec les mot-clé « Potassium » et « Agriculture » respectivement comme figurant dans le titre et les mots-clés des articles scientifiques, on arrive à une production sur la période 1991-2011 de 366 articles contre 1315 pour le mot phosphore et 4125 pour le mot azote. Au niveau national, seules trois UMR intègrent encore le K comme sujet d'étude (UMR TCEM Bordeaux, UMR B&PMP et Eco&Sols Montpellier En Europe, les laboratoires qui travaillent sur le potassium sont une dizaine ([Tableau 1](#)).

Tableau 1. Equipes de recherches européennes ayant inscrit le K comme sujet de recherche dans les 10 dernières années

Chercheurs	Nom de la structure de recherche	Ville, Pays	Sujet traité
Amtmann A	Plant Science, Inst. Of biomedical and life sciences, University Of Glasgow	Glasgow, Ecosse	Effet du K sur la résistance aux maladies et ravageurs
Andersson S, Simonsson M, Öborn I	Dpt of Soil Science, Swedish University of Agricultural Sciences,	Uppsala, Suède	Biodisponibilité du K, bilans culturels
Askegaard M, Eriksen J	Dpt of Crop Physiology and Soil Science, Danish Institute of Agricultural Sciences	Tjele, Danemark	Biodisponibilité du K, bilans culturels
Ogaard AF, Krogstad T	Norwegian University of Life Science	As, Norvège	Détermination du K Non Echangeable
Benlloch M, Fournier JM	Université de Cordoue	Cordoue, Espagne	Stress hydrique X Nutrition K
Cakmak I	Sabanci University, Faculty of Engineering and Natural Sciences	Istanbul, Turquie	Rôle du K sur la détoxification des radicaux libres produits en conditions de forts éclaircissement et de stress hydrique
Hammond J	Univ Warwick	Warwick, England	Biologie moléculaire, génétique
Jordan-Meille L, Schneider A	INRA-ENITAB, UMR TCEM, Equipe « Nutrition minérale »	Bordeaux, France	Modélisation du transfert Sol-Plante du potassium
Laclau JP, Bouillet JP, Hinsinger P	CIRAD-INRA, UMR Eco&Sols, Equipe « Nutriments et Intensification Ecologique »	Sao-Paulo, Brésil et Montpellier, France	Mécanismes d'acquisition du K, rôle des racines profondes et des processus d'altération des minéraux. Efficience d'utilisation
Véry A, Sentenac H	INRA, UMR BPMP (Biochimie et Physiologie Moléculaire des Plantes)	Montpellier, France	Mécanismes de transport du K dans la plante à l'échelle moléculaire

## **1.2. Des enjeux pourtant cruciaux ...**

Pourtant, dès que l'on se trouve en présence de "vieux" sols très altérés, plutôt répartis dans l'hémisphère Sud (continent Africain, Amérique du Sud, Asie ...), par opposition à nos sols récents issus de la pédogénèse post-glaciation, il apparaît que le statut potassique des sols demeure un soucis permanent. Le potassium apparaît ainsi dans certains agrosystèmes ou forêts comme le premier facteur limitant pour la croissance des plantes (Bond 2010) ou comme l'élément dont les bilans sont les plus négatifs (Smil 1999). De plus, les grandes régions agricoles à fort potentiel de développement (Inde, Brésil, Chine, Afrique) ne possèdent pas de mines de K, celles-ci étant présentes dans un nombre restreint de pays (Canada, Fédérations de Russie, Biélorussie, Allemagne, Israël, Jordanie) où les capacités d'extraction stagnent. Ceci explique en partie l'envolée récente des prix des engrais K qui restent à des niveaux très élevés de prix depuis la crise de 2008 (Manning 2010), compromettant ainsi l'approvisionnement des pays émergents en engrais K, et fragilisant potentiellement leur agriculture. Signe d'un regain récent d'intérêt sur le potassium, la revue « *Plant and Soil* » y a consacré en 2010 un numéro spécial (Cakmak 2010).

## **1.3. ... renforcés par le rôle du K dans l'atténuation des stress biotiques et abiotiques**

C'est dans ce contexte de raréfaction relative de la ressource que le K apparaît pourtant comme un des leviers permettant d'atténuer les effets négatifs de stress biotiques et abiotiques, dont le principal, le stress hydrique, est en voie de généralisation dans de nombreuses régions agricoles. Outre les causes structurelles qu'ils ne gèrent pas, les agronomes doivent donc se pencher sur les conséquences de cet état de faible fertilité potassique sur les cultures, comprendre les mécanismes affectés, et proposer des solutions pour atténuer les effets des carences en K sur la production végétale, en incluant les multiples interactions avec les autres facteurs potentiellement limitants. Cet article entend dresser le panorama des principales connaissances considérées comme acquises ou encore sujettes à débat, et apporte une contribution à la réflexion sur les pistes de recherche qu'il convient de mettre en œuvre dans les années à venir.

## **2. Ce que l'on sait sur le potassium (et que l'on croit simple)**

### **2.1. Minéralogie du K, indicateur de sa biodisponibilité, modélisation de l'offre du sol**

Le biogéochimie du K est relativement simple, et peut se résumer à l'existence de 4 compartiments distincts et en interactions (Figure 1) :

1) dans la solution du sol, le potassium n'existe que sous la forme ionique  $K^+$ , et c'est sous cette forme unique que les plantes le prélèvent ;

2) les ions  $K^+$  adsorbés sur les sites d'échange de la matière organique et des minéraux argileux constituent le réservoir en interaction rapide avec le K en solution (K échangeable, KE) ;

3) le potassium fixé interfoliaire peut apporter, par libération, une contribution significative à la nutrition des plantes, en fonction de la minéralogie des argiles (argiles de type 2:1 telles que les illites). La relation entre le type d'argile et la teneur en K fixé est bien connue, notamment grâce à la mesure par diffraction des rayons X, qui permet par exemple de suivre dans le temps la libération de K sous l'effet du prélèvement racinaire et de « visualiser » la vermiculisation des minéraux argileux impliqués dans ces processus (Hinsinger et Jaillard 1993).

Enfin, 4) le réservoir du K des minéraux primaires (K Structural) tel que celui issu de l'altération des Feldspaths et Micas constitue une très forte réserve mais est considéré non biodisponible en climat tempéré.

Analytiquement, l'indicateur de biodisponibilité du potassium est basé sur la mesure du stock de KE, en mettant simplement en œuvre des processus d'échanges d'ions. La mesure de l'indicateur se trouve donc basée sur des faits chimiquement à l'œuvre dans les relations sol-plante (contrairement à ce qui est fait habituellement pour le P par exemple avec les extractions chimiques ménagées) ; elle est rapide, économique, fiable. L'ammonium, souvent utilisé comme ion d'échange, possède l'avantage de n'interagir strictement qu'avec le K adsorbé sur la CEC, sans jamais ouvrir les feuillets d'argile. L'échange  $K^+-NH_4^+$  est assez peu dépendant des conditions expérimentales (temps d'extraction, rapport masse/volume, concentration en ammonium ...), ce qui rend la méthode (NFX 31 108) très fiable. Enfin, le fait que les compartiments de K fixé et échangeable soient en équilibre (bien

que non instantané) renforce l'intérêt pour la mesure simple du KE, et *a contrario* explique la non prise en compte du K fixé dans les mesures de routine.

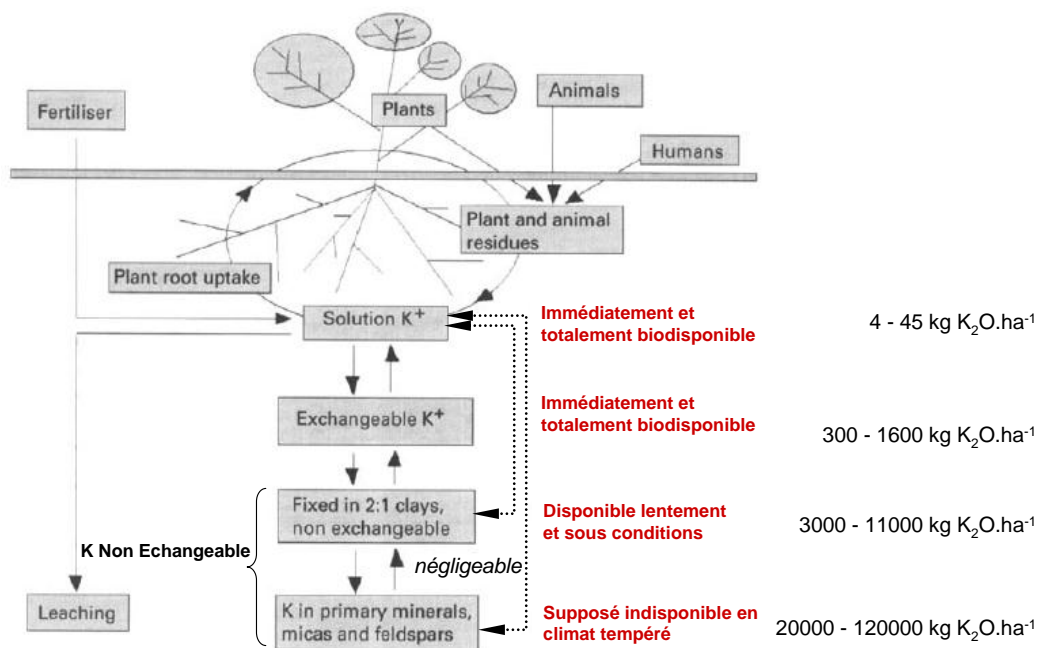


Figure 1 : Les différents compartiments du potassium dans le sol, en relation avec leur biodisponibilité

## 2.2. Rôles du potassium dans la plante

Les mécanismes physiologiques dans lesquels est impliqué le potassium sont bien connus (Marschner 1995). Le potassium agit sur trois processus distincts : l'activation d'enzymes, le potentiel électrochimique cellulaire (rôles « biochimiques », seuil minimum de 50 mM de K dans le milieu cytoplasmique) et le potentiel osmotique (rôles « biophysiques », seuil de 100 mM dans les vacuoles). L'activation d'enzyme contrôle notamment la synthèse des protéines dont certaines sont impliquées directement (synthèse d'ATP, de NADPH ...) ou indirectement (synthèse d'amidon) dans les processus photosynthétiques. Par sa charge et sa forte mobilité, il joue un rôle important sur le potentiel électrochimique membranaire (pH ...), constitue un cation accompagnateur de certains solutés (nutriments, métabolites, phytohormones) à travers le phloème et le xylème, influence les mouvements d'eau. Enfin, sa très forte mobilité lui confère également un rôle essentiel dans les processus basés sur le potentiel osmotique (pression de turgescence des cellules, notamment stomatiques).

Les conséquences d'une carence en K sont décrites dans de nombreux articles, à des échelles différentes et pour des niveaux de carence très variés (Figure 2). Les mécanismes physiologiques et les variables de croissance affectés par la carence en K sont connus pour interagir avec d'autres stress potentiels, biotiques et abiotiques, que subissent les plantes cultivées (Cakmak 2005, Amtmann et al. 2008).

	<u>Échelle concernée par la carence</u>	<u>Conséquences</u>	<u>Intercations avec facteurs biotiques et abiotiques</u>
	Cellulaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>↑ teneurs en sucres solubles,</li> <li>↓ teneur en eau, ↓ turgescence,</li> <li>↓ ajustement stomatique</li> <li>↓ élasticité pariétale,</li> <li>↓ vitesse d'expansion cellulaire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Infections</li> <li>Attaques parasitaires</li> <li>Maladies</li> </ul>
	Plante/organes	<ul style="list-style-type: none"> <li>↓ Surface, durée de vie foliaire,</li> <li>↓ assimilation, ↓ rythme dvpt,</li> <li>↓ assimilation <math>NO_3^-</math></li> </ul>	<p><b>X Stress</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Sécheresse,</li> <li>Chaleur excessive,</li> <li>Gel,</li> <li>Carences minérales</li> </ul>
	Culture	<ul style="list-style-type: none"> <li>↓ Indice foliaire,</li> <li>↓ Racines primaires,</li> <li>↑ Poils absorbants</li> <li>↓ Production et allocation C</li> </ul>	
	Récolte	<ul style="list-style-type: none"> <li>↓ Rdt, ↓ % fibre, huile, sucres</li> <li>↓ Indice récolte</li> </ul>	

Figure 2 : Conséquences d'une carence en K à différentes échelles et interactions connues avec des stress biotiques et abiotiques

### 3. Les théories qui font encore débat

#### 3.1. Contribution du potassium non échangeable à la nutrition des plantes : comment la caractériser ? Le processus est-il continu ?

De nombreux bilans de K réalisés sur des cultures montrent que les variations du compartiment échangeable (KE) entre le début et la fin des périodes étudiées ne permettent pas de rendre compte de la variation de stock du K du sol (Figure 3). A l'extrême, en conditions sub-optimales, les plantes ne s'approvisionnent plus dans le compartiment du K échangeable lorsque celui-ci atteint sa valeur minimale au champ. (Quéméner 1988). Dans un contexte où les sols agricoles et sylvicoles mondiaux sont encore largement déficients en K, et où la baisse des intrants dans les exploitations intensives tend à se généraliser, l'utilisation du KE comme indicateur de fertilité est fortement sujette à caution. Actuellement, la non prise en compte explicite de la libération du K non échangeable (KNE) dans le raisonnement de la fertilisation tient à une compréhension encore partielle des processus de libération-fixation et à des difficultés méthodologiques.

En effet, il existe plusieurs méthodes plus ou moins empiriques employées pour caractériser la fraction du KNE susceptible de passer en solution à court terme : ouverture des feuillets par l'utilisation d'acides plus ou moins concentrés, organiques ou minéraux, censés simuler l'action des exsudats racinaires (ex. :  $\text{HNO}_3$  M), précipitation des ions K de la solution et du compartiment échangeable, entraînant un fort gradient de concentration en K et forçant la libération de K interfoliaire (méthode au tétraphénylborate de sodium, résines cationiques). Ces méthodes donnent des résultats variables, plus ou moins bien corrélés avec les quantités vraiment prélevées par les plantes (Ogaard and Krogstad 2005). L'estimation de l'importance des échanges avec le K fixé (libération-fixation) peut aussi se déduire de bilans (entrées – sorties), déduction faite de la variation du K échangeable. Simonsson *et al.* (2007) ont utilisé des essais au champ de longue durée et obtenu, selon les modalités de fertilisation, des fixations maximum de  $85 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ , et des libérations atteignant  $65 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ , mettant en évidence le caractère réversible de ces phénomènes.

A une toute autre échelle, Schneider (1997) impose à des mélanges sol-solution des contraintes de concentrations (ajout de K ou dilution par ajout d'eau) et déduit la quantité de K libéré ou fixé une fois un nouvel équilibre obtenu. Cette méthode lui permet en outre de déterminer le pouvoir tampon du sol, paramètre-clé de la modélisation de l'offre en K du sol.

Si la diminution de la teneur en K en solution reste indéniablement le moteur de la libération, il subsiste encore des résultats contradictoires sur la caractère continu de cette libération. Pour la plupart des auteurs, elle n'interviendrait significativement qu'en deçà d'une teneur seuil (Hinsinger et Jaillard 1993), en restant cantonnée au voisinage de la racine (Figure 4). Pour d'autres (Schneider 1997), la libération (et son processus inverse, la fixation) interviennent dès que les conditions d'équilibre sont rompues.

La libération de K est en outre corrélée aux teneurs en cations dans la solution du sol, notamment en Calcium dont l'accumulation dans la rhizosphère peut provoquer de forts « échanges » au niveau des espaces interfoliaires.

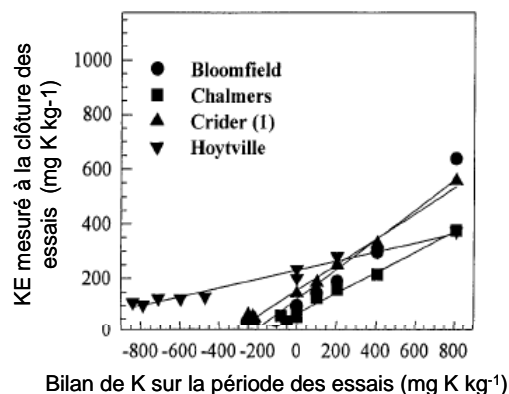


Figure 3 : Inadéquation du K échangeable (KE) à satisfaire le bouclage des bilans K sur quatre types de sol (d'après Cox *et al.* 1999)

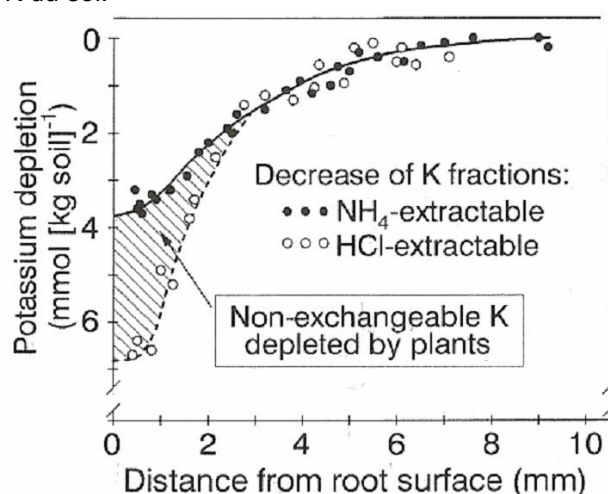


Figure 4 : Profil d'appauvrissement du K échangeable ( $\text{NH}_4$ -extractable) et du K fixé ( $\text{HCl}$ -extractable –  $\text{NH}_4$ -extractable) au voisinage d'une racine. Le K extrait à  $\text{HCl}$  correspond au K échangeable et non échangeable (Barber 1985).

### **3.2. L'altération de la roche-mère : une source de K pas si négligeable que cela ...**

Le contexte économique et agricole mondial a récemment relancé l'intérêt de substituer des roches broyées riches en minéraux potassiques (Micas, Feldspaths, Néphéline, ...) aux engrais classiques. L'estimation des quantités de K issu de l'altération des roches se fait en faisant pousser des plantes en présence de la roche-mère à tester, sur un substrat dépourvu de K. Dans une revue bibliographique sur le sujet, Manning (2010) a recensé des dizaines d'études aux conditions expérimentales tellement variées (échelles, durées, type de substrats, espèces de végétaux, minéralogie et mouture des roches employées) qu'il est difficile de tirer des conclusions.

L'utilisation du modèle biogéochimique PROFILE, classiquement utilisé sous forêt, donne des valeurs de K issu de l'altération nettement supérieures à ce qui est généralement considéré comme des flux négligeables (Holmqvist *et al.* 2003). Les valeurs du modèle seraient même sous-estimées car elles ne prennent pas en compte le compartiment biotique, notamment l'abaissement de concentration en K dans la rhizosphère qui est un des moteurs de l'altération des micas. En outre, l'intérêt du modèle est de pouvoir étudier la sensibilité de différents paramètres du sol (température, humidité, pH ...) sur le flux d'altération, et d'en déduire l'impact de certaines pratiques agricoles (travail du sol, irrigation, chaulage ...). La plupart des résultats remet en cause la non prise en compte du flux d'altération des minéraux primaires dans les bilans de K.

### **3.3. L'acidification de la rhizosphère par l'activité racinaire permet-elle aux plantes d'accéder à des stocks de K non biodisponibles ?**

La modélisation du transfert sol-plante du K (formalisme de Barber, 1985) a tendance à systématiquement sous-estimer les quantités de K réellement prélevées par des plantes placées en conditions d'offre en K *a priori* insuffisantes (Samal *et al.* 2010), ce qui est d'ailleurs un constat partagé avec le prélèvement de phosphore. Une hypothèse de cette sous-estimation consiste en la non prise en compte par les modèles de l'effet des exsudats racinaires (notamment l'excrétion de protons, Hinsinger *et al.* 2011) sur la libération du K dans la caractérisation du pouvoir tampon du sol (réapprovisionnement de la solution du sol en K). L'activité bactérienne serait aussi une cause d'accès des plantes aux compartiments non échangeables du K (Rengel et Damon 2008). D'autres auteurs affirment de leur côté que les modèles échouent du fait :

- de ne pas bien évaluer le pouvoir tampon du sol (en ne prenant pas correctement en compte le rôle de tous les cations sur la libération du K, ou en évaluant mal sa valeur pour des concentrations très faibles, de l'ordre de quelques micromoles.L<sup>-1</sup>),
- de la non prise en compte de l'effet des poils absorbants et des mycorhizes, dont la croissance est exacerbée en cas de carence (Leyval et Berthelin 1991),
- de la sous estimation de la capacité des plantes à adapter leurs capacités de prélèvement (Wang *et al.* 2011).

Ces auteurs remettent en cause l'action des protons sur l'altération du K structural mais admettent une action des protons sur la libération du K fixé comme le ferait, par échange, n'importe quel autre cation (à pH < 4). L'action de ces phénomènes étant souvent simultanée, leurs effets relatifs sont difficiles à discerner. Il semblerait toutefois que l'action des exsudats racinaires soit bien réelle sur la libération du K, des teneurs en K dans la solution du sol à proximité des racines ayant été mesurées à des taux plus élevés que dans le « bulk soil » (Wang *et al.* 2011, Turpault *et al.* 2005)

### **3.4. Réponse intégrée des plantes à la carence en K : quel est le « bon » modèle ?**

Si les conséquences d'une carence en K sont bien décrites à des échelles fines (zones apicale, cellules, surface foliaire), il manque encore une vue d'ensemble à l'échelle de la plante ou du peuplement, basée sur une approche mécaniste. Cette difficulté à intégrer du K dans les modèles génériques de croissance et de développement des plantes tient probablement aux multiples interactions qui existent entre le K et les cations d'une part (des compensations partielles peuvent avoir lieu), et aux différentes stratégies de gestion de l'eau entre les plantes. Actuellement, au moins deux modèles s'opposent :

- Selon Leigh et Jones (1994), les fonctions biochimiques du K seraient préservées au détriment de ses fonctions biophysiques, assurées partiellement par d'autres solutés (cations, sucres solubles ...). Ainsi, le K agirait d'abord sur le statut en eau de la plante (Carroll *et al.* 1994, Jordan-Meille et Pellerin 2008). La modélisation des effets du stress K pourrait donc se baser sur celle du stress hydrique, déjà bien développée (fermeture stomatique, diminution de la teneur en eau et de la pression de turgescence, diminution de la photosynthèse, sénescence accélérée des organes ...).

- la moindre teneur en K bloquerait le transport des sucres solubles dans les feuilles matures, au détriment des zones méristématiques aérienne et racinaire dont la croissance est ralentie. Ce dysfonctionnement trophique aurait des répercussions précoces au niveau même de l'initiation des nouveaux organes et de la division cellulaire, entraînerait une rétro-action négative sur la photosynthèse, et provoquerait une sénescence accélérée des feuilles matures (Cakmak 2005). Les indicateurs de statut hydriques ne sont pas modifiés (Itoh *et al.* 1997, Gérardeau *et al.* 2010).

#### 4. Quelles pistes de recherche explorer, et pour quoi faire ?

Au regard des zones d'ombre qui persistent sur la nutrition K des cultures, et du constat que la fertilité potassique des sols sera longue à restaurer au niveau mondial, compte tenu du prix durablement élevé des engrais K, des capacités limitées d'extraction dans les mines, et des surfaces considérables jugées à un niveau de fertilité très insuffisant, quelques pistes de recherche sont proposées.

##### 4.1. Proposer des critères de sélection des plantes basés sur l'efficacité de prélèvement et d'utilisation du K, confronter avec les classes d'exigence des cultures

Jusqu'à présent, la sélection des plantes a privilégié des génotypes productifs, cultivés dans des environnements où l'accès aux éléments minéraux était non limitant. Il y aurait cependant intérêt à déterminer les facteurs génétiques jouant sur l'efficacité de prélèvement et d'utilisation du K (Römheld et Kirby 2010, White *et al.* 2010) compte tenu de l'étendue des surfaces agricoles pauvres en K. L'efficacité de prélèvement est définie comme la capacité des plantes à prélever du K dans des conditions d'offre limitante, tandis que l'efficacité d'utilisation est définie comme la capacité à produire un bon rendement malgré une teneur faible dans les organes.

L'ensemble des mécanismes impliqués dans l'expression d'une plus ou moins bonne efficacité de prélèvement et d'utilisation du K est résumé sur la figure 5. Le rôle des transporteurs de K dans la plante, et les possibilités de substitution par d'autres cations sont prépondérants pour l'efficacité d'utilisation du K, tandis que l'accès aux formes non échangeables (affinité pour le prélèvement, réponses morphologiques et physiologiques racinaires, capacité à développer des poils absorbants ...) déterminent surtout l'efficacité de prélèvement.

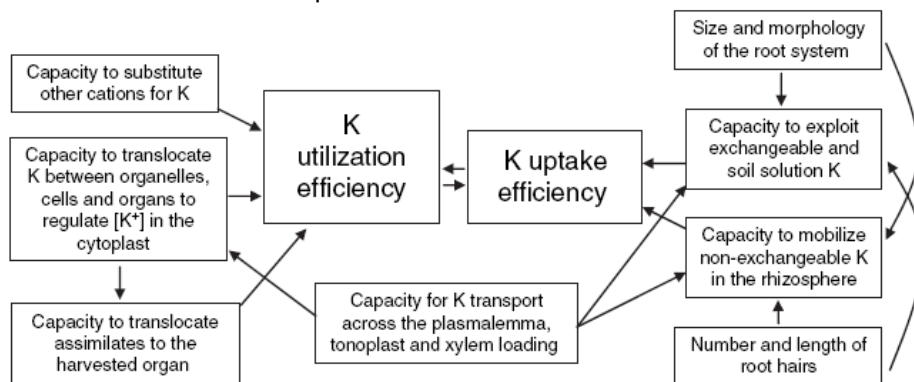


Figure 5 : Facteurs génétiques intervenant sur l'efficacité de prélèvement et d'utilisation du K (Rengel et Damon 2008)

Il faudrait sûrement analyser à travers ce prisme le classement effectué sur les plantes cultivées vis-à-vis de leur exigence en K, dans le cadre du raisonnement de la fertilisation (méthodes françaises Regifert, COMIFER). Ce classement, établi empiriquement, gagnerait à être confronté à des indicateurs basés sur la physiologie des plantes.

##### 4.2. Concevoir des systèmes de culture favorisant le recours des plantes au K fixé et structural

L'efficacité de prélèvement du K ne doit pas seulement être étudiée dans le cadre de l'amélioration variétale, à l'échelle d'une espèce, mais plus globalement, à l'échelle d'une rotation. Les efficacités très variées qui existent entre espèces (Steingrobe et Claassen, 1999) doivent être mises à profit pour optimiser la nutrition. Pour faciliter la conception de rotations, les agronomes devraient pouvoir s'appuyer sur un classement des espèces selon au moins deux critères : la capacité des plantes à



puiser dans le stock de K fixé et structural, et leur sensibilité à la carence (Öborn *et al.* 2005). Le choix des pratiques (travail du sol, gestion de l'eau, gestion du statut calcique, gestion des résidus de récolte, gestion de la fertilisation) jouant aussi sur l'efficacité globale des plantes vis-à-vis du K, celles-ci devraient pouvoir être évaluées sur leurs capacités à exacerber l'enracinement profond, une structure favorable au développement racinaire, la capacité d'échange cationique, les processus de libération-fixation, l'altération des micas et des feldspaths. Öborn *et al.* (2005) soulignent cependant que le recours aux formes non échangeables du K peut faire peser un risque sur la productivité des agrosystèmes à terme. Il faut également avoir à l'esprit le rôle secondaire joué par le K sur la résistance aux stress; même si les fonctions vitales de la plante ne sont pas perturbées, une légère déficience pourrait entraîner des chutes de rendement lorsque l'environnement devient moins favorable (Cakmak 2005). Dès lors, si la baisse des intrants K doit par exemple s'accompagner d'une lutte accrue contre les maladies, ou une meilleure maîtrise de l'irrigation, il n'est pas certain que le bilan agro-environnemental global soit positif. L'évaluation du système de culture doit être très globale.

#### 4.3. Affiner le raisonnement de la fertilisation K, rénovier les indicateurs de fertilité

Le système actuel de raisonnement de la fertilisation (COMIFER 1995, Denoroy *et al.* 2003) souffre de plusieurs handicaps : i) la base de données dont sont issus la calibration, les interprétations ainsi que le classement des cultures en classes d'exigence n'a jamais été publiée ; ii) il est basé sur un indicateur (KE) peu performant pour des teneurs en K sub-optimales ; iii) les données sont classées "par type de sol" (COMIFER), ne permettant guère l'extrapolation de références d'un site à l'autre, ij) il est impossible d'acquérir de nouvelles références (dont adaptation au cas des TCS ou non labour), et j) le calcul de fertilisation n'est pas mécaniste. Une stratégie d'amélioration du raisonnement en 3 étapes est proposée :

1) Expliciter et publier le système actuel en redéfinissant les seuils et le classement des cultures ; cette étape consisterait à revisiter les nombreux essais implantés depuis les années 1950 jusqu'à nos jours (112 dénombrés en France, Castillon Com Pers), et à publier la nouvelle base de données.

2) Faire évoluer l'indicateur de biodisponibilité de manière à mieux rendre compte de l'offre des différents réservoirs en K du sol (K non échangeable interfoliaire, K structural) en présence d'une plante donnée. Cox *et al.* (1999) ont ainsi démontré, sur blé, la supériorité du tétraphénylborate de sodium sur l'acétate d'ammonium à prédire les quantités de K biodisponibles grâce à ses propriétés d'échange et d'ouverture de feuillet. De même, l'utilisation d'une teneur en K dans la solution du sol, couplée à celle de son pouvoir tampon a montré, sur une culture de blé à un stade jeune, des résultats prometteurs pour constituer un outil de diagnostic basé sur des bases mécanistes permettant de gommer la variabilité intrinsèque à chaque situation pédologique (Figure 6, Schneider *et al.* 2003). Cette méthode, déjà en cours de développement sur P, doit confirmer sa validité sur tout un cycle cultural, et intégrer une gamme plus large de cultures.

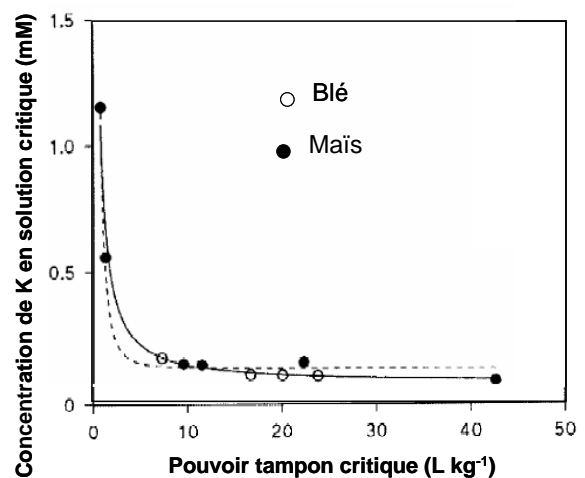


Figure 6 : Relation entre la concentration en solution critique et le pouvoir tampon (Schneider *et al.* 2003)

3) Modéliser le transfert sol-plante du K dans le but d'établir des références *in silico* qui permettraient d'affiner le raisonnement de la fertilisation. Actuellement, cette modélisation se heurte à deux obstacles : la non prise en compte explicite de l'activité racinaire (exsudats) sur les processus de libération et d'altération des minéraux (Hinsinger *et al.* 2011), et le non aboutissement d'un modèle générique « plante » par manque de réponse homogène des plantes testées (Jordan-Meille et Pellerin 2008, Gérardaux *et al.* 2010). Le modèle semi empirique de Greenwood et Karpinets (1997), a été utilisé pour le diagnostic, et devrait servir de base à la modélisation future. La modélisation mécaniste pourrait également permettre de relancer l'intérêt des diagnostics basés sur la composition des organes végétaux (Burns 1992); cette approche actuellement très empirique, se heurte à la variabilité des situations pédo-climatiques et aux multiples interactions entre le K et d'autres facteurs de croissance.

#### **4.4. Approfondir les possibilités de maîtrise du stress hydrique par une gestion de la fertilisation K**

L'interaction entre la nutrition potassique et hydrique d'une plante est un fait largement avéré (Hsiao et Laüchli 1986). Römheld et Kirkby (2010) avancent 4 hypothèses sur les effets bénéfiques de la nutrition potassique sur la gestion de l'eau par les plantes : a) une nutrition K optimale favorise le développement racinaire (rapport du poids des racines sur les parties aériennes diminué en cas de carence), et donc la réserve utile ; b) le K évite le dessèchement des tissus, maintient le potentiel de turgescence des cellules ; c) le K régule les échanges d'eau par son implication dans la régulation stomatique ; d) le K abaisse la concentration des radicaux libres formés en cas de fortes chaleurs et forte lumière (qui accompagnent le stress hydrique), et permet d'allonger la durée de vie des organes. Des questions restent cependant en suspens : une alimentation légèrement déficitaire en K mais compensée par un prélèvement d'autres cations permet-elle de maintenir ces avantages ? Comment gérer le fait qu'en cas de stress hydrique, le prélèvement de K par la plante est également interrompu ? En cas de stress hydrique, l'interaction entre K et eau permet-elle d'en atténuer les effets négatifs, d'économiser de l'eau, d'en améliorer l'efficacité globale ? Où se situe l'optimum technico-économique, entre économies d'eau, économies d'intrants minéraux, et rendements ? Actuellement, un essai grandeur nature mené par JP Laclau (CIRAD UMR Eco&Sols, Montpellier) croisant la disponibilité en eau, en K et en Na se déroule sur une station expérimentale de l'Université de Sao Paulo (Brésil), sur des Eucalyptus. Cette expérimentation, unique au monde de par sa taille (> 2 ha) et sa durée (5 ans) devrait apporter une large contribution sur les interactions jouées par le K.

#### **4.5. Comprendre et maîtriser les possibilités de substitution du K par du Na**

Un certain nombre d'études récentes (Wakeel *et al.* 2011, Almeida *et al.* 2010) redonne de l'intérêt à l'utilisation du sodium (Na) en agriculture. Le Na, comme le K, est un cation extrêmement mobile dans le sol et la plante ; cela lui permet, à faible dose, et en cas de carence en K, de se substituer à lui dans les fonctions qu'il exerce de manière non spécifique (osmorégulation). La substitution partielle de Na à la place de K peut se justifier d'un point de vue économique, le NaCl étant à 20% du prix du KCl (Almeida *et al.* 2010). De plus, contrairement au K, le Na ne se fixe pas entre les feuillets d'argile ; les quantités à apporter sont alors intégralement disponibles. C'est sur la betterave que l'on a acquis le plus de résultats montrant une substitution allant parfois jusqu'à 95% du prélèvement de K, sans effets négatifs sur les fonctions métaboliques (Wakeel *et al.* 2011). Sur cultures fourragères (prairies), l'apport de Na est bénéfique pour le régime alimentaire des ruminants. De nombreuses références rapportent des situations où les effets de la carence en K furent levés par un apport de Na (Wakeel *et al.* 2010). Almeida *et al.* (2010) soulignent les enjeux économiques importants qu'une telle substitution (moitié des moles de K remplacée par du Na, soit 35 kg Na ha<sup>-1</sup>) pourrait entraîner à l'échelle des forêts plantées d'Eucalyptus au Brésil, apparemment sans effets négatifs sur la production. Les mêmes auteurs soulignent que les quantités de KCl apportées à la plantation sur les forêts cultivées (220 kg KCl ha<sup>-1</sup>) pourraient être significativement réduites dans les régions côtières où les apports de Na par les embruns sont conséquents. La recherche devrait se pencher sur cette question afin d'apporter plus de références et d'éviter que se généralisent des pratiques de substitution sans fondements physiologiques bien reconnus, avec des risques environnementaux mal maîtrisés.

#### **4.6. Identifier les impacts de l'offre en K sur la qualité des productions agricoles**

Compte tenu des conséquences physiologiques entraînées par le manque de K (baisse de la teneur en eau relative dans les tissus, perturbation du transport des sucres, de la photosynthèse, de la synthèse des protéines, interaction avec d'autres stress), la qualité des productions agricoles est impactée (Pettigrew 2008). L'absence de modèle mécaniste décrivant le rôle du statut K de la plante dans sa croissance et son développement ne permet néanmoins pas de prévoir l'impact sur la qualité. Les études relatives à ce sujet sont donc essentiellement empiriques, ce qui laisse une voie importante pour une recherche sur les mécanismes impliqués. Elles décrivent des effets sur les teneurs en amidon et protéines dans les céréales, en huile dans les cultures d'oléagineux, en amidon pour les cultures à bulbe (essentiellement la pomme de terre), en vitamines pour les fruits et légumes (essentiellement la tomate), en qualités technologiques pour le cotonnier. On peut aussi citer les effets reconnus (teneur en sucre, acidité, composés phénoliques, tests gustatifs) mais peu investigués concernant la vigne et le vin (Markovic *et al.* 2010). Malgré de forts enjeux qualitatifs, de nombreuses interrogations persistent sur l'optimisation de la fertilisation potassique de cette culture (K. Van Leeuwen, Comm Pers), en lien avec d'autres cations, souvent antagonistes.



#### 4.7. Comprendre les interactions entre statut K des plantes et leur sensibilité aux ravageurs

Bien qu'à cheval sur deux disciplines, l'interaction entre nutrition potassique et la santé des plantes a donné lieu à un très grand nombre de résultats plus ou moins ciblés sur le sujet (2500 concernant plus de 400 maladies et ravageurs) compilées par Perrenoud (1990). Un effet bénéfique d'apports de K est surtout rapporté pour les attaques bactériennes et fongiques ; l'effet est moins marqué pour les attaques d'insectes, et inverse pour les attaques virales. Dans ces études, l'azote est souvent une co-variable, agissant d'ailleurs de manière opposée (facteur aggravant) au potassium. Il existe cependant une très forte variabilité dans les réponses, en raison de conditions expérimentales très variables (conditions pédoclimatiques, sensibilités variétales, techniques culturales), et souvent insuffisamment bien décrites.

Selon Amtmann *et al.* (2008), le niveau d'alimentation en K des plantes influence à la fois leur vulnérabilité aux agressions (attaque ou non par le pathogène), leur sensibilité (capacités à surmonter les effets négatifs des attaques), et leurs capacités à se défendre à travers l'activation de messages hormonaux (Figure 7). Malgré le très grand nombre d'études, seule une compréhension « statistique » de l'effet du K est démontrée. Le modèle conceptuel proposé par Amtmann *et al.* (2008) constitue désormais un réseau d'hypothèses que des expérimentations futures devront tester.

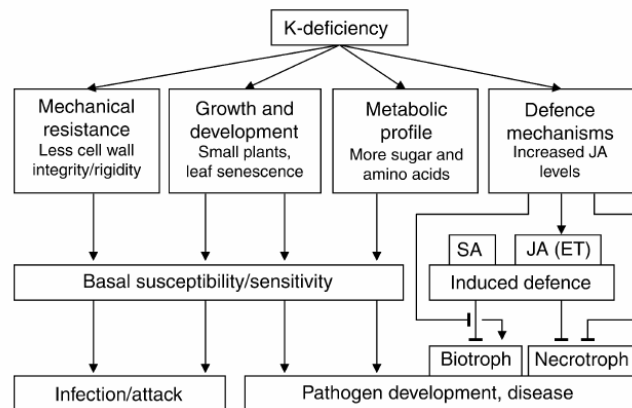


Figure 7 : Effets potentiels de la déficience en K sur la prédisposition des plantes aux maladies et aux attaques de pathogènes (Amtmann *et al.* 2010)

#### Références bibliographiques

- Almeida JCR *et al.* 2010 A positive growth response to NaCl applications in Eucalyptus plantations established on K-efficient soils. *Forest Ecology and Management*. 259, 9, 1786-1795
- American Society of Agronomy, 1985 Potassium in Agriculture. Munson Ed., 1223p.
- Amtmann A *et al.* 2008 the effect of potassium nutrition on pest and disease resistance in plants. *Physiologia Plantarum*, 133, 4, 682-691
- Barber SA 1985 Potassium availability at the soil-root interface and factors influencing potassium uptake. In *Potassium in Agriculture*, Munson (Ed), 309-324
- Bond WJ 2010 Do nutrient-poor soils inhibit development of forests ? *Plant & Soil*, 334, 47-60
- Burns IG 1992 Influence of plant nutrient concentration on growth rate. Use of a nutrient interruption technique to determine critical concentrations of N, P and K in young plants. *Plant & Soil* 142, 221-233
- Cakmak I 2005 The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. Mönchhagen, 168, 521-530,
- Cakmak I 2010 Special Issue: Potassium role and benefits in improving nutrient management for food production, quality and reduced environmental damages, 1, 2, 335.
- Carroll MJ *et al.* 1994 Turgor potential and osmotic constituents of Kentucky Bluegrass leaves supplied with four levels of potassium. *Agron. J.* 1079-1083
- COMIFER, 1995. Aide au diagnostic et à la prescription de la fertilisation P et K des grandes cultures. 28p.
- Cox AE *et al.* 1999. Plant-Available K Assessment with a Modified Sodium Tetraphenylboron Method. *Soil Science Society of American Journal*, 63, 4, 902-911
- Denoroy P *et al.* 2003 REGIFERT. Interpréter les analyses de terre. INRA, Ed Quae, pp. 23-38.
- Gérardeaux E *et al.* 2010 Changes in plant morphology and dry matter partitioning caused by K deficiency in *Gossypium hirsutum* (L.) *Environmental and experimental botany*, 67, 3, 451-459
- Greenwood DJ et Karpinets TV 1997. Dynamic model for the effects of K-fertilizer on crop growth, K-uptake and soil-K arable cropping. 1. Description of the model. *Soil Use Manag.*, 13, 178-183

- Hinsinger P *et al.* 2011 Acquisition of phosphorus and other poorly mobile nutrients by roots. Where do plant nutrition models fail? *Plant & Soil*, 348:29–61.
- Hinsinger P et Jaillard B 1993 Root-induced release of interlayer potassium and vermiculitization of phlogopite as related to potassium depletion in the rhizosphere of ryegrass. *Journal of Soil Science*, 44: 525-534.
- Holmqvist J *et al.* 2003 Application of the PROFILE model to estimate potassium release from mineral weathering in Northern European agricultural soils. *Europ. J. Agronomy* 20, 149-163
- Hsiao TC et Laüchli A 1986 Role of Kin Plant-water relations. *Advances in Plant nutrition*, 2, 8, 281-311
- Itoh R. *et al.* 1997 Effects of potassium deficiency on leaf growth, related water relations and accumulation of solutes in leaves of Soybean plants. *Jpn. J. Crop Sci.* 66(4), 691-697
- Jordan-Meille L et Pellerin S 2008 Shoot and root growth of an hydroponic grown maize (*Zea Mays L.*) as influenced by K deficiency. *Plant & Soil* 265, 75-92
- Leigh RA et Jones WRG 1984 A hypothesis relating critical potassium concentrations for growth to the distribution and functions of this ion in the plant cell. *New Phytol.* 97, 1-13
- Leyval C et Berthelin J 1991 Weathering of a mica by roots and rhizospheric microorganisms of Pine. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, 1009-1016
- Manning DAC 2010 Mineral sources of potassium for plant nutrition. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 30, 281-294
- Markovic N *et al.* 2010 Influence of potassium fertilization on yield, quality of grapes and wine of cv. Sauvignon blanc. *Annals of the University of Craiova*, 40, 1, 137-141
- Marschner H 1995 Mineral nutrition of higher plants. 2<sup>nd</sup> Edition,
- Öborn *et al.* 2005 Critical aspects of K management in agricultural systems. *Soil Use Manag.*, 21, 12-112
- Oogard AF et Krogstad T 2005 Ability of different soil extraction methods to predict potassium release from soil in ley over three consecutive years. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168, 186-192
- Perrenoud S 1990 Potassium and plant health, 3, International Potash Institute, Basel.
- Pettigrew WT 2008 Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton. *Physiologia Plantarum* 133, 4, 670-681
- Quémener J. 1988 L'offre alimentaire du sol en K. *Perspectives agricoles*, 127, 28-42
- Rengel Z et Damon PM 2008 Crops and genotypes differ in efficiency of potassium uptake and use. *Physiologia Plantarum*, 133, 624-636
- Römheld V et Kirkby EA 2010 Research on K in agriculture: needs and prospects. *Plant and Soil*, 335, 155–180
- Samal D *et al.* 2010 K uptake efficiency and dynamics in the rhizosphere of maize (*Zea mays L.*), Wheat (*Triticum aestivum L.*) and sugar beet (*Beta vulgaris L.*) evaluated with a mechanistic model. *Plant & Soil* 332, 105-121
- Schneider A 1997 Release and fixation of potassium by a loamy soil as affected by initial water content and potassium status of soil samples. *European Journal of Soil Science*, 48, 263-271
- Schneider A *et al.* 2003 Relationships between soil potassium supply characteristics based on soil solution concentration and buffer power and field responses of winter wheat and maize. *Plant & Soil* 254, 269-278.
- Simonsson M *et al.* 2007 Potassium release and fixation as a function of fertilizer application rate and soil parent material. *Geoderma* 140, 188-198.
- Smil V. 1999 Crop residues: Agriculture's largest harvest - Crop residues incorporate more than half of the world agricultural phytomass. *Bioscience* 49, 4,99-308
- Steingrobe B et Claassen N 1999 Potassium dynamics in the rhizosphere and K efficiency of crops. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 163, 101-106
- Turpault MP *et al.* 2005. Influence of mature Douglas fir roots on the solid soil phase of the rhizosphere and its solution chemistry. *Plant & Soil*, 275, 327-336
- Wakeel A *et al.* 2011. Potassium substitution by sodium in plants. *Plant Sciences*, 30, 401-413
- Wang HY *et al.* 2011. Plants use alternative strategies to utilize NEK in minerals. *Plant & Soil*, 343, 209-220
- White PJ *et al.* 2010 Genetic analysis of K use efficiency in Brassica oleracea, *An. Bot.*, 205, 7, 1199-1210

## Remerciements

Patricia Battie-Laclau, Pascal Denoroy, Philippe Hinsinger, André Schneider