Guide Pratique pour la Fertilisation Raisonnée des Principales Cultures au Maroc

Pour l'utilisation d'un Kit simplifié d'analyse de sol

(Spectrophotomètre portable *Hach* modèle DR/2400)

Si Bennasseur Alaoui et Ajiro Yasuehi

0. Préambule.

Le présent guide a pour objectif d'aider les agriculteurs et les techniciens à mieux réaliser, comprendre, interpréter, et utiliser les résultats des analyses de sol produit par le Kit ***Hach*** d'analyse de sol. Ce guide est provisoire, et ne prétend pas être exhaustif, ni parfait. Tout apport des spécialistes, des praticiens, et autres lecteurs, pour son amélioration, sera apprécié.

1. Introduction

Le recours aux analyses de sol est une condition siné-qua-non pour faire un vrai diagnostic de la fertilité de sol. Un sol sain et équilibré produira des récoltes saines et équilibrées qui sont libres d'insectes, de maladies et des mauvaises herbes.

En parallèle aux analyses de sol, on procède généralement au creusement de profils culturaux pour estimer la profondeur de sol, on estime sa richesse en matière organique, et on note les indicateurs de l'activité biologique.

Il existe plusieurs méthodes d'analyse permettant une détermination fiable des quantités disponibles des principaux éléments nutritifs. Le contrôle de l'acidité ou l'alcalinité du sol est nécessaire afin de savoir si les conditions de réussite des cultures envisagées sont réunies. Les analyses de sol doivent être faits périodiquement, pour cerner les changements éventuels et prévoir un plan d'action.

Ce guide traite de la fertilisation raisonnée pour les principales grandes cultures, cultures horticoles, et arboricoles. Il s'adresse tout spécialement aux agriculteurs ainsi qu'aux techniciens vulgarisateurs chargés de les aider à mieux raisonner la fertilisation des cultures.

2. Quelques notions générales sur la fertilisation des cultures

L'objectif de la fertilisation est d'équilibrer les besoins des cultures en éléments nutritifs avec les éléments déjà présents dans le sol et les fertilisants ajoutés pour une récolte satisfaisante en qualité et rendement (Collectif 1, non daté). Les fertilisants sont constitués d'éléments chimiques identiques aux éléments prélevés naturellement par les plantes dans le sol (Yara International, non daté). Les engrais minéraux constituent le

complément indispensable pour obtenir une production végétale optimale tout en maintenant la fertilité des sols (Yara International, non daté).

La fertilisation minérale, bien qu'elle soit relativement peu utilisée au Maroc, connaît un progrès assez notable au cours des deux dernières décennies. Or, son emploi ne s'avère profitable que s'il est justifié par des données sur la fertilité du sol et sur l'apport en éléments fertilisants du fumier, des résidus de culture et d'autres sources de matière organique. D'une part, sur les sols très pauvres, on a parfois avantage à remettre dans le sol autant et même plus d'azote, de phosphore et de potasse que ce qui est enlevé par la culture. D'autre part, toute fertilisation de sols déjà très fertiles ou ayant bénéficié peu auparavant d'un apport important de fumier pourrait n'entraîner aucun profit additionnel et même nuire aux cultures et à l'environnement.

Une fertilisation optimale favorise l'obtention de rendements optimaux tout en maximisant la rentabilité des cultures. Elle contribue aussi à maintenir l'équilibre de la fertilité du sol et à éviter l'apparition de différents problèmes culturaux, comme les carences ou la croissance excessive des mauvaises herbes. Fertiliser sans excès permet aussi de réduire les risques de contamination des eaux par les éléments nutritifs, notamment l'azote et le phosphore (Collectif 2, non daté).

Les analyses de sol constituent le meilleur moyen pour déterminer les quantités précises de phosphore, de potassium, de magnésium, d'oligoéléments, et de chaux nécessaires aux cultures (Collectif, 2002).

Or, il ne suffit pas de connaître la richesse du sol en éléments fertilisants, mais il faudrait les interpréter pour les traduire en conseils en matière de gestion de la fertilisation des cultures.

Signalons, cependant, qu'au Maroc, on est encore loin d'avoir des normes en matière d'interprétation des analyses de sol pour les principales cultures et les différentes conditions pédoclimatiques. Nous allons donc utiliser toutes les références nationales disponibles, auxquelles on a pu avoir accès, et utiliser celles élaborées ailleurs en cas de manque de non disponibilité de données locales.

3. Engrais et amendements minéraux

Les engrais minéraux sont pour la plupart des engrais dont les éléments nutritifs, principalement l'azote, le phosphore et le potassium, sont :

- très solubles,
- rapidement disponibles pour la plante.

Ces engrais sont :

- plus concentrés que les engrais de ferme (ou engrais organiques)
- constitués d'un seul élément fertilisant (engrais simples) ou de plusieurs (engrais composés).

Le présent document concerne le raisonnement de la fertilisation des cultures, et le fait qu'il met l'accent sur la fertilisation minérale, n'exclut pas l'importance de chercher les moyens alternatifs de raisonnement de la fertilisation des cultures. Ces moyens alternatifs sont le fumier, les cultures de couverture ou engrais verts, les résidus de cultures, etc. Le tableau 1 fait une comparaison des deux approches.

Selon les caractéristiques recherchées, les engrais et amendements minéraux peuvent être complémentaires des engrais de ferme et des amendements organiques (Collectif 2, non daté).

Tableau 1. Comparaison des engrais de ferme aux engrais minéraux et des amendements organiques aux amendements minéraux (Adapté de Collectif 2, non daté).

Engrais de ferme	**Engrais minéraux**
• Apportent aux plantes des éléments nutritifs majeurs et mineurs en proportion variables selon la disponibilité dans le temps. • Apportent une quantité non négligeable de matière organique. • Contribuent à maintenir une bonne structure de sol et par conséquent la fertilité du sol.	• Apportent aux plantes des éléments nutritifs immédiatement assimilables, permettant un démarrage rapide de la culture. • N'apportent aucune matière organique au sol. • Peuvent modifier l'équilibre naturel des micro-organismes du sol. • Utilisation de ressources non renouvelables pour la fabrication des produits synthétiques,
Amendements organiques	**Amendements minéraux**
• Augmentent progressivement la quantité et la qualité de matière organique. • Améliorent la capacité du sol à retenir l'eau, ce qui est très utile en période de sécheresse. • Libèrent progressivement des éléments nutritifs (azote, potassium, phosphore, manganèse, etc.). • Favorisent la croissance des plantes en améliorant l'aération et la cohésion du sol. • Améliorent l'infiltration de l'eau dans le sol et par conséquent diminuent le risque de ruissellement.	• Permettent aux plantes de mieux absorber les éléments nutritifs en corrigeant certaines propriétés physicochimiques du sol (ex. : chaux agricole).

4. Justification et importance de l'utilisation d'un Kit simplifié d'analyse de sol.

Le nombre de producteurs qui sont convaincus de l'utilité des analyses de sol en conditions d'agriculture pluviale, est en progression au Maroc. Cependant, rares sont les agriculteurs qui ont accès à ce service, et rares ceux qui ont les moyens pour se le payer.

Vu que les recommandations portant sur les besoins en phosphore et en potassium sont valables, quel que soit le laboratoire ou sont effectuées les analyses, pour autant que les méthodes utilisées et les unités servant à exprimer les résultats sont conformes à ceux adoptés par les laboratoires accrédités, le recours à des kits simplifiés, mais fiables est justifié si on considère les contraintes citées ci-dessus.

5. Brève comparaison de quelques méthodes d'analyse de sol

A titre d'exemple, aussi bien l'indice de disponibilité que l'interprétation de la quantité de phosphore à appliquer sont spécifiques à la méthode d'analyse utilisée: Il est don impératif de connaître la méthode d'analyse de sol utilisée afin d'émettre des recommandations adéquates, vu que chaque méthode a ses propres indices d'interprétation. Le niveau d'interprétation peut être juge optimal pour un test, faible ou fort pour d'autres. En effet, la méthode Olsen permet d'extraire moins de phosphore que la méthode Bray-1 (Mallarino et Sawyer, 1999).

L'interprétation des analyses de phosphore est aussi complexe, surtout lorsqu'on assiste à une variation des propriétés chimiques du sol, surtout la teneur en carbonate de calcium ou magnésium, dans les sols calcaires. C'est d'ailleurs dans les sols calcaires, abondants au Maroc, que certains tests donnent des résultats erronés. Ceci n'est pas le cas pour le test Olsen, ce qui explique sa large adoption sous nos conditions (Mallarino et Sawyer, 1999).

Un aspect aussi important que le test d'analyse, est relatif à l'efficacité des opérations de laboratoire. L'utilisation d'une solution unique d'extraction pour l'analyse multiple de plusieurs éléments nutritifs permet des économies importantes en temps et en coût de produits (Mallarino et Sawyer, 1999). Ce constat nous ramène à souligner encore une fois l'intérêt du Kit d'analyse "Hach" basé sur le test Mehlich 2.

Sur les sols calcaires, le test Mehlich 3 améliore la prédiction de la réponse du rendement aux apports de phosphore spécialement sur des sols ayant un pH supérieur ou égale à th pH 7,4. La capacité du test de Mehlich 3 à mesurer le phosphore disponible sur des sols varies est largement supérieure à celle de la méthode Bray (Mallarino et Sawyer, 1999).

Olsen et Dean (1965) ont montré que l'utilisation de la méthode Olsen d'extraction du phosphore, basée sur l'extractif $NaHCO_3$, doit être limitée aux sols ayant un pH compris entre 5,5 et 8,5, et contenant une teneur en matière organique inférieure à 3%. Ceci a été confirmé au Maroc par les travaux de recherche conduits par l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II et l'Institut National de la Recherche

Agronomique. Parce que les cultures ont des besoins en phosphore différents, les résultats des analyses sont interprétés en fonction de la culture prévue (Moughli, 1991).

6. Prélèvement des échantillons

Avant de procéder au prélèvement de sol, il est recommandé de définir sur le terrain les zones pédologiquement homogènes en se basant sur les déclarations de l'agriculteur, l'observation visuelle, la carte pédologique si celle-ci couvre la zone en question, et si l'échelle permet de faire la distinction entre différents types de sol (Reisenauer et *al.*, non daté).

Les sols peuvent être échantillonnés avec une tarière ou une pelle. Chaque champ ou partie de champ distinct doit faire l'objet d'un échantillonnage séparé (Collectif, 2002). Pour bien délimiter les zones homogènes, il est recommandé de prendre en compte la couleur du sol, l'abondance de la matière organique, du calcaire, des éléments grossiers, la profondeur du sol, la pente, la salinité, la texture, le drainage (Loudyi, 2004). Ce sont surtout ces paramètres qui permettent de subdiviser la parcelle en sous parcelles (Loudyi, 2004).

Il faut prendre au moins 20 échantillons à 15-20 cm de profondeur par champ ou par superficie de 5 hectares au moins. Pour les superficies supérieures à 5 hectares, on doit augmenter proportionnellement le nombre d'échantillons. Plus on prélève d'échantillons, plus l'analyse sera précise et représentative de la fertilité du champ. Aucun échantillon global ne devrait représenter plus de 10 ha (Collectif, 2002).

Le producteur ou le technicien doit recueillir les échantillons dans un seau propre en plastique, briser les mottes, bien mélanger la terre puis y prélever l'échantillon à expédier au laboratoire aux fins d'analyse. Il doit prélever les échantillons à intervalles réguliers le long d'un tracé en zigzag qui traverse tout le champ. Les parties de champ qui diffèrent par l'aspect du sol ou le type de culture envisagée ou qui n'ont pas reçu les mêmes doses d'engrais, de fumier ou de chaux doivent être échantillonnées séparément même si leur superficie est trop petite pour qu'on puisse les traiter à part (Collectif, 2002). Il faut éviter de prélever des échantillons dans les bandes fertilisées depuis peu, les abords de chemins en gravier et les endroits où l'on a entassé du fumier, du compost, de la chaux ou des résidus de récolte (Collectif, 2002).

Enfin, chaque échantillon prélevé doit être clairement identifié. Il doit porter une étiquette comprenant les informations suivantes (Loudyi, 2004) : la date de prélèvement, nom de l'agriculteur, téléphone, nom de la parcelle et surface approximative, la profondeur de prélèvement, le type de sol (texture ou nom vernaculaire), présence de gravier ou cailloux, état de la structure du sol, pratique ou non de l'irrigation, signe de salinité, le précèdent cultural, la nature de l'assolement pratiqué, la culture à mettre en place, la rendement moyen et rendement objectif, nature de l'outil de travail de sol utilisé ainsi que la profondeur de labour. On doit également spécifier si la parcelle sera irriguée ou non, ainsi que les niveaux de rendements moyens, maximums ou objectifs.

7. Quand échantillonner et à quelle fréquence?

Pour tirer le maximum de profit des analyses de sol, il est conseillé de les reconduire dans le temps. Ceci permet de bien évaluer les actions menées par l'agriculteur sur plusieurs années, et de pouvoir redresser la situation en étudiant l'évolution des caractéristiques du sol (Moughli, non daté). Chaque champ devrait être échantillonné au moins une fois tous les 2 ou 3 ans (Collectif, 2002).

Pour la détermination des besoins des engrais, il est recommandé de faire les analyses chaque deux ans pour les cultures irriguées (Moughli, non daté). Ces analyses vont concerner l'azote, le phosphore, le potassium, le magnésium (pour les cultures exigeantes), la salinité. Pour les cultures pluviales, il est recommandé de reconduire les analyses d'azote, de phosphore, de potassium chaque 3 à 4 ans (Moughli, non daté).

La teneur en potasse peut varier rapidement dans les sols sableux utilisés pour des cultures telles que la luzerne, le maïs à ensilage, la pomme de terre et la tomate, qui exportent une grande quantité d'éléments fertilisants (Collectif, 2002). Si tel est le cas, un prélèvement doit être fait chaque année.

Pour que les résultats d'analyse lui parviennent à temps, c'est au cours de l'automne précédent que le producteur doit prélever les échantillons dans les champs qui seront ensemencés au printemps (Collectif, 2002). Alors que pour les champs qui seront ensemencés en automne, les agriculteurs feraient mieux de prélever les échantillonner au printemps précèdent ou au plus tard en été. Cependant, avec le Kit d'analyse rapide il est possible de faire les prélèvements juste après le labour et avant l'application des engrais minéraux ou de fumier, vu la rapidité d'obtention des résultats des analyses par comparaison aux laboratoires centralisés.

Les résultats des analyses de sol pour les teneurs en phosphore, en potassium et en magnésium sont donnés en milligrammes par litre de sol (mg/L), ce qui est approximativement l'équivalent des parties par million (ppm). Le phosphore bio-disponible est mesuré au moyen d'un extrait de bicarbonate de soude (aussi appelé extrait Olsen). Le potassium et le magnésium bio-disponibles sont mesurés au moyen d'un extrait d'acétate d'ammonium. Le manganèse et le zinc sont rapportés à titre d'indices qui tiennent comptes à la fois de la quantité d'éléments nutritifs extraits du sol et du pH du sol (Collectif, 2002).

1[1]
1

Figure 1. Démarche générale de l'analyse de sol.

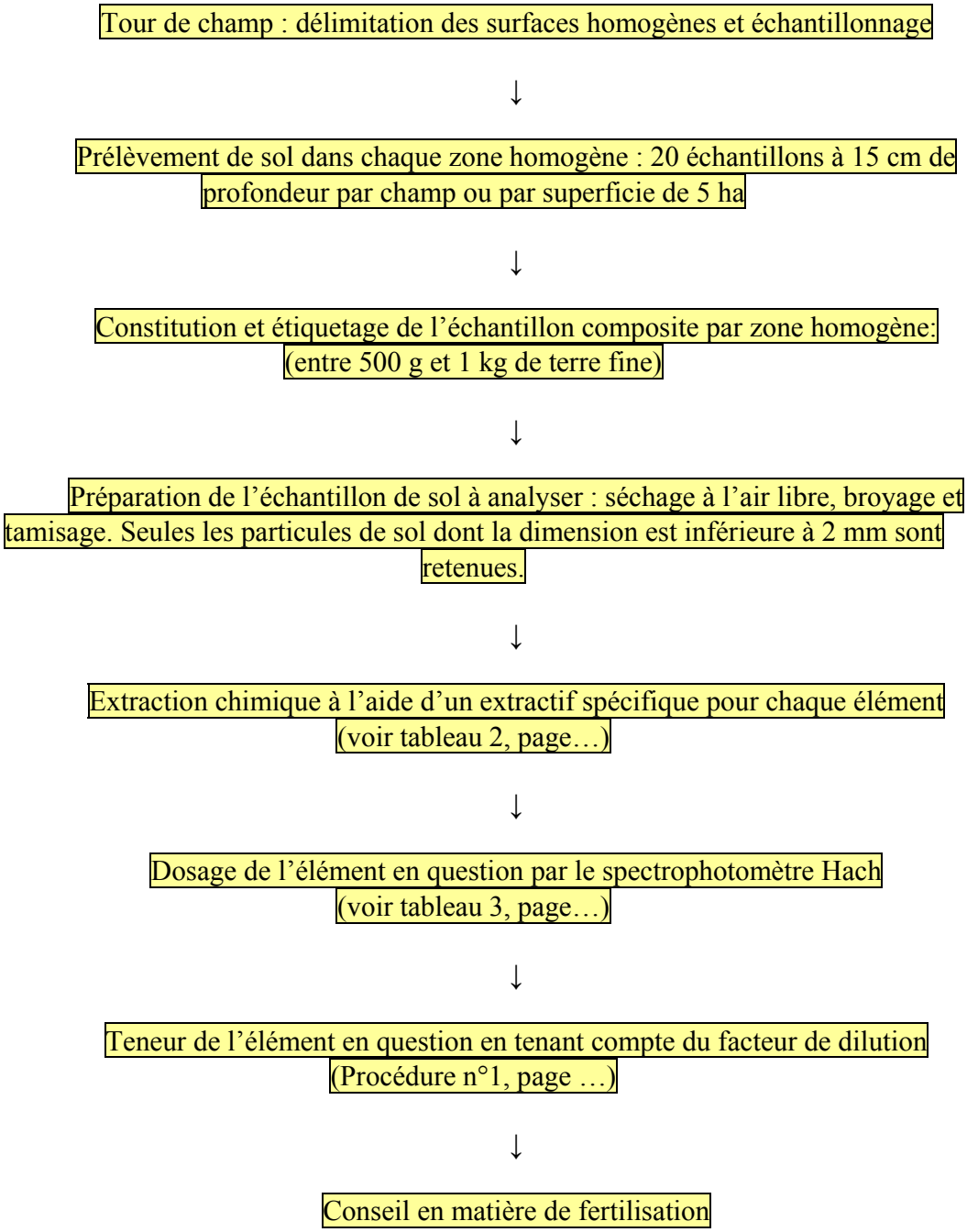


Tableau 2. Les méthodes d'extraction et les procédures de mesure de N, P et K selon la méthode Hach-2400 (Mehlich 2) (Anonyme, 2002).

Elément	Méthode d'extraction et procédure	Procédure de mesure
Azote		
Azote (NO_3^-)	**Procédure d'extraction :** • Mettre 30 g de sol dans un récipient de 120 ml ; • Ajouter 60 ml d'eau désionisée ; • Ajouter 0,4 g de sulfate de calcium ; • Agiter vigoureusement pendant 1 minute ; • Filtrer dans un récipient de 120 ml.	**Démarrer le programme :n° 355 :** • Mettre 25 ml d'extrait dans une cellule de mesure ; • Remettre la machine à zéro ; • Ajouter 1 gélule de NitraVer 5 et agiter vigoureusement pendant 1 minute ; • Attendre 5 minutes ; • Procéder à la lecture et multiplier par 2 pour obtenir la mesure en ppm d'azote nitrique (NO_3-N), ou par 2, et puis par 4,4 pour obtenir des ppm de nitrate;
Azote (NH_4^+)	**Procédure d'extraction :** [1] • Transférer 5 grammes de terre sèche tamisée dans un flacon d'agitation ; • Ajouter 20 ml d'eau désionisée (extraction aqueuse) ou 20 ml de solution KCl 1,0 N ; • Ajouter 0,2 g (bout de spatule) de sulfate de calcium pour faciliter la filtration ; • Fermer le flacon et agiter le récipient vigoureusement pendant 1 minute ; • Filtrer l'extrait afin d'obtenir quelques millilitres de filtrat.	**Démarrer le programme :n° 380 :** • Transférer 5,0 ml de filtrat à l'aide d'une pipette dans une éprouvette de 25 ml ; • Compléter à 25 ml avec de l'eau désionisée ; • La lecture correspondra à la quantité d'azote ammoniacal contenue dans l'éprouvette graduée. Il faudra donc corriger le résultat afin de l'interpréter en ppm dans le sol analysé ; • 5 g de terre dans 20 ml d'extractant correspond à 25 g, soit un rapport d'extraction du sol de 5 fois. L'extrait est ensuite dilué 5 X, **la lecture finale doit être multipliée par 25 (5 x 5)** pour obtenir la valeur en ppm de NH_3-N. • La valeur trouvée est exprimée en azote N. Pour obtenir la valeur en NH_3 ou NH_4+, il faudra multiplier

		la valeur de lecture par 1,216 pour obtenir en NH_3 et par 1,288 pour obtenir la valeur en NH_4+.
Phosphore		
Phosphore assimilable (P_2O_5)	**<u>Méthode utilisée</u> : Mehlich 2.** **<u>Procédure d'extraction</u> :** • Mettre 20 ml de la préparation Mehlich 2 concentrée portée à 200 ml avec H_2O distillée dans une bouteille de 200 ml. • Mettre 2 g de sol dans un récipient 120 ml ; • Ajouter 17 ml Mehlich 2 ; • Agiter vigoureusement pendant 5 min ; • Filtrer dans un récipient 120 ml.	**<u>Démarrer le programme :n° 490</u> :** • Transférer un ml de l'extrait dans un verre à pied de 25 ml et diluer avec de l'eau désionisée jusqu'au trait des 25 ml ; • Remettre à zéro ; • Ajouter une gélule de PhosVer 3, agiter ; • Attendre 2 minutes ; • Transférer le contenu (25 ml) dans une cellule de mesure et effectuer la mesure en mg/L ; • Multiplier la lecture par 212,5 pour obtenir la valeur en ppm P ; • Convertir ensuite en P_2O_5 en multipliant par 2,3.
Potassium		
Potassium échangeable (K_2O)	**<u>Méthode utilisée</u> : Mehlich 2.** **<u>Procédure d'extraction</u> :** • Mettre 20 ml de la préparation Mehlich 2 concentrée portée à 200 ml avec H2O distillée dans une bouteille de 200 ml. • Mettre 2 g de sol dans un récipient 120 ml ; • Ajouter 17 ml Mehlich 2 ; • Agiter vigoureusement pendant 5 min ; • Filtrer dans un récipient 120 ml.	**<u>Démarrer le programme n° 905</u>.** • Transférer 3,0 ml de l'extrait dans un verre à pied ; • Ajouter 3 ml de la solution 22687-53 (solution Alkaline EDTA) et agiter pour mélanger ; • Ajouter une gélule de 14322-98 (solution potassium 2 RGT) ; • Agiter 30 secondes ; • Diluer jusqu'au trait de 21 ml avec de l'eau désionisée ; • Remettre à zéro ; • Ajouter une gélule 14323-99 (solution potassium 3

		RGT PWD PLWS) ; • Agiter 30 secondes ; • Laisser réagir pendant 3 minutes ; • Transférer la solution dans une cellule de mesure de 25 ml et effectuer la mesure ; • Multiplier la mesure en mg/L K par 70,8 pour obtenir la valeur en ppm K ; • Convertir ensuite en K_2O en multipliant les ppm K par 1,2.

[1] ***On doit s'attendre à obtenir des résultats plus élevés en utilisant l'extraction au KCl étant donné que le potassium prendra la place de l'ion ammonium NH_4^+. Les interprétations seront également différentes.***

8. Les types d'analyses pouvant être effectuées par le Kit rapide d'analyse Hach.

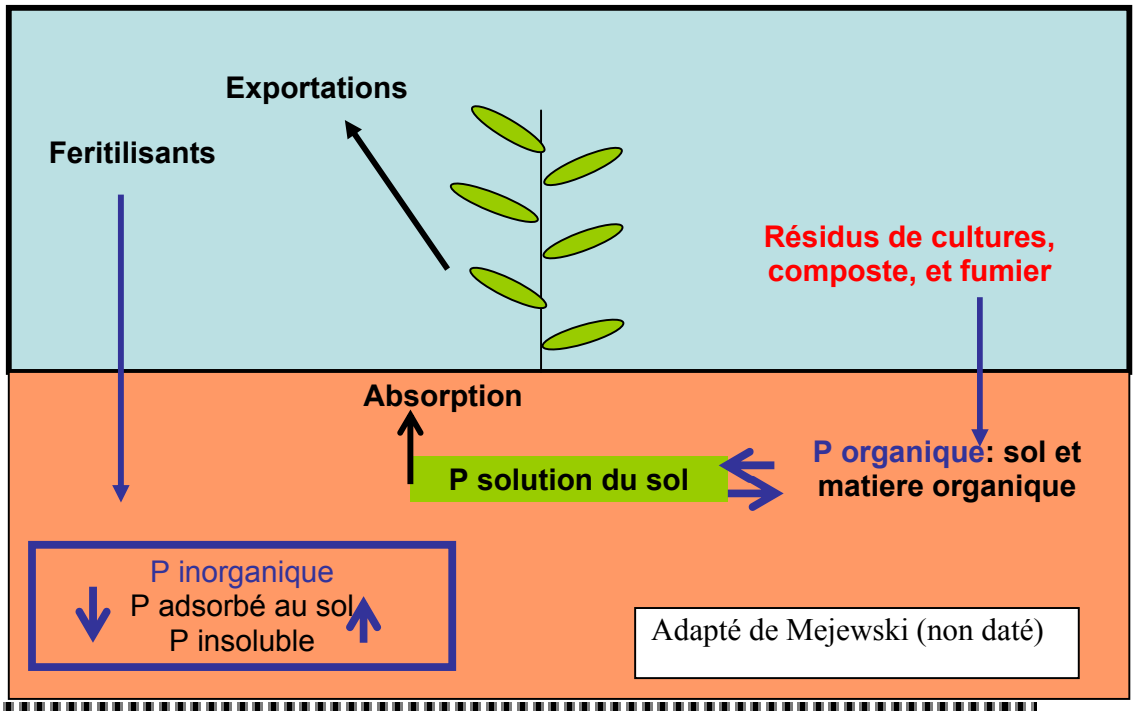
Parmi les analyses pouvant être faites à l'aide du Kit Hach DR-2400 nous citons :

- ✓ le pH à travers l'extraction aqueuse et l'estimation de la demande en chaux,
- ✓ l'azote NO_3^- et Nh_4+ à travers l'extraction au sulfate de calcium,
- ✓ les cations échangeables (K^+, Ca^{++}, et Mn^{++}), à l'aide de l'extraction neutre à l'ammonium acétate,
- ✓ le phosphore assimilable pour les sols ayant un pH>6,5 par la methode d'extraction Olsen,
- ✓ le potassium échangeable à l'aide de l'acétate d'ammonium,

8.1. Les bases échangeables.

Les bases échangeables comprennent le phosphore assimilable, le potassium échangeable, le magnésium, le calcium, et l'azote minéral.

Il existe plusieurs méthodes d'analyse de sol qui permettent de déterminer le phosphore disponible pour la plante dans le sol. La méthode Olsen ("Bicarbonate") : est recommandée pour les sols à pH > 6.0. Généralement, les valeurs varient entre 5 et 25 ppm P (Moughli, non daté). L'analyse du sol inclut quelques formes du phosphore du "pool" labile (par exemple P des engrais précipités et qui se dissout, P minéralisé à partir des résidus de culture, et une partie du P adsorbé, voir figure ci-dessous) (Collectif 1, non daté).



8.2. Les oligoéléments.

On effectue également les analyses pour connaître la teneur du sol en bore, cuivre, fer, manganèse, molybdène, et zinc. Ils sont exprimées en ppm, et extraits par un chélateur (DTPA). L'analyse des oligoéléments est réalisée surtout pour les cultures irriguées et exigeantes en ces éléments (Moughli, non daté).

8.3. Le calcaire total (CaCO3).

Le calcaire actif est exprimé en pourcent. Selon Moughli, non daté), ce paramètre n'a pas d'effet direct sur la croissance de la plupart des cultures mais il peut affecter la disponibilité de certains éléments nutritifs tels que le phosphore, le zinc, le fer et le manganèse et augmenter la volatilisation des engrais azotés contenant de l'ammonium ou se transformant en ammonium (urée) sous forme d'ammoniac (NH3).

9. Calibration des sols et normes d'interprétation des analyses.

Les analyses de sol sont normalement calibrées contre la réponse prévisible aux quantités de fertilisants appliqués par le recours à de nombreux travaux de recherche en laboratoire, sous serre, et en plein champ. Dans la mesure où ces recherches permettent de déterminer l'indice de disponibilité de ces éléments à la culture, ainsi que la probabilité et l'ampleur d'une augmentation de rendement, on peut ainsi interpréter les résultats des analyses de sol.

Les teneurs du sol en éléments fertilisants sont données en partie par million (ppm) des éléments P, K, et Mg. Pour convertir les ppm en kg/ha, on multiplie les ppm par 2. Ensuite les résultats des teneurs en ces éléments sont converties en forme oxydée, par l'utilisation des conversions suivantes: P x 2,3 = P_2O_5, K x 1,2 = K_2O, Mg x 1,6 = MgO.

La valeur de potassium échangeable (Figure 2) rapportée dans les bulletins d'analyse de sol, extrait par l'acétate d'ammonium, contient aussi bien le potassium échangeable que le potassium de la solution du sol (Moughli, non daté).

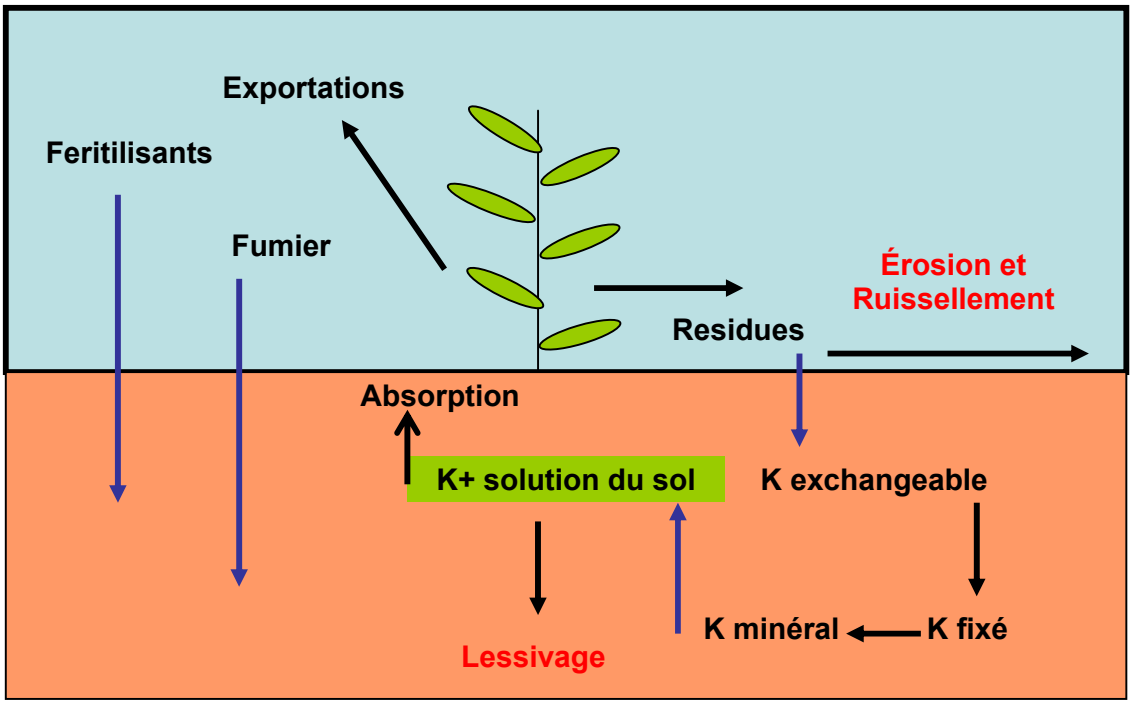


Figure 2. Cycle du potassium.

Le potassium échangeable dépend beaucoup de la CEC du sol. En général, il présente des valeurs élevées dans les sols à texture fine et plus basses dans les sols sableux et pauvres en matière organique (Moughli, non daté). Le potassium disponible représente moins de 2% du potassium total du sol et inclut le potassium de la solution du sol et la plupart du potassium échangeable. Le potassium échangeable (adsorbé sur les sites d'échange) contribue beaucoup au potassium disponible pour la plante en réapprovisionnant la solution du sol en potassium. Les analyses de sol donnent des valeurs comprises généralement entre 100 ppm et >300 ppm (Moughli, non daté).

L'azote minéral, exprimé en ppm (ou mg d'azote par kg de sol). Il est composé surtout de l'azote ammoniacal (NH4+) et l'azote nitrique (NO3-). Suite aux travaux de recherche menés sur la fertilisation azotée des cultures, de plus en plus de laboratoires ont tendance à utiliser les nitrates au lieu de l'azote minéral pour faire les recommandations d'azote pour les cultures (Moughli, non daté).

L'apport combiné de nitrate et d'ammonium donne une croissance optimale pour la plupart des plantes. Sur des essais au champ, il y a, généralement, peu de différence entre différentes sources d'azote. Le plus souvent le coût, la manipulation et la vitesse de réponse recherchée déterminent si on doit apporter de l'ammonium ou du nitrate :

- La forme nitrate donne une réponse plus rapide de la plante mais il est plus soumise au lessivage puisqu'elle est faiblement retenue par le sol.
- L'ammonium est mieux retenu par le sol mais la réponse de la culture à son apport est plus lente.

Il est aussi noté une faible tolérance des plantules des apports excessifs d'ammonium (mort de plantule). L'ammonium peut aussi restreindre l'absorption de K^+ s'il est apporté à forte dose.

Les résultats d'analyse obtenus au laboratoire ne revêtent aucune importance; car elles doivent être interprétées en mettant en relation les valeurs obtenues au laboratoire aux réponses des cultures sous les conditions locales. La relation qui relit le niveau de richesse du sol en un élément donné peut être représentée par la courbe de réponse proche de celle indiquée par la figure 3. Au fur et à mesure que les niveaux de richesse du sol s'écartent des valeurs faibles, le rendement de la culture augmenterait jusqu'à un certain niveau appelé "plateau". Au delà de ce point, aucune amélioration de rendement n'aura lieu avec des richesses supérieures au seuil critique auquel le niveau de rendement a plafonné. La richesse de sol optimale se trouve juste après ce seuil critique. Eventuellement, une réduction de rendement peut avoir lieu, sous certaines conditions, si le niveau de richesse de sol continue à augmenter au delà des teneurs optimales.

Une fois les courbes de réponse ont été déterminées a travers des essais au champs dans le site ou l'analyse de sol a eu lieu, les niveaux d'interprétation (i.e., Inférieur à l'Optimum, Optimum, Supérieur à l'Optimum) peuvent être établis (Figure 3).

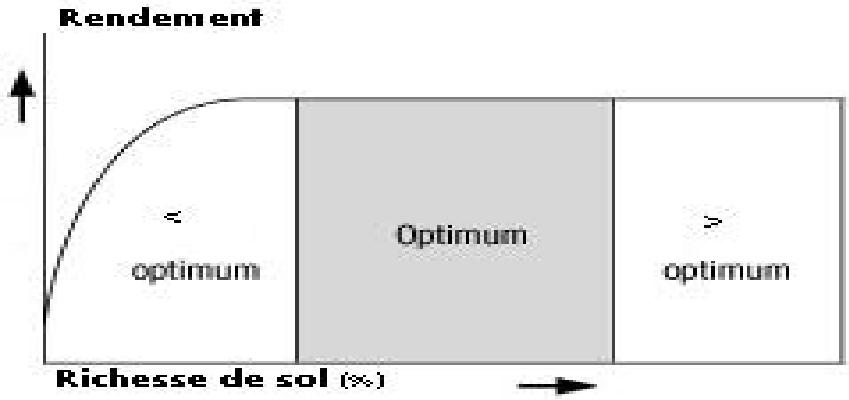


Figure 3. Courbe type d'interprétation des résultats d'analyse de sol.

L'analyse de sol, et surtout l'interprétation de l'analyse, sont l'étape clé du raisonnement de la fertilisation des cultures et constituent donc une des bases de l'agriculture raisonnée. Si des procédures d'interprétation des analyses de sol ont été développées et plus ou moins automatisées dans certains laboratoires de service au Maroc, on note qu'aucun système général n'avait été développé et publié pour proposer un raisonnement clair, basé sur les connaissances les plus récentes, pour l'utilisateur.

Une fois une procédure d'analyse de sol est développée, il est nécessaire de recourir au calibrage du test sur un grand nombre de sites dans les conditions de plein

champ. L'objectif de la calibration étant de déterminer la quantité d'éléments nutritifs qui doivent être apportées au sol selon les niveaux de richesse de l'élément en question pour l'obtention d'un rendement maximum.

Mis à part l'azote et le soufre, les analyses de sol ne mesurent pas la quantité d'éléments nutritifs disponibles pouvant être absorbés par les cultures, car les quantités présentes dans le sol doivent être corrélées avec la réponse des cultures aux apports croissants en ces éléments. Du fait que certaines variables tels que le climat, les mauvaises herbes, les attaques d'insectes, les maladies, le drainage, etc. conditionnent la réponse des cultures aux fertilisants, il est nécessaire de répéter les essais de calibrage pendant 3 à 5 ans avant de donner des conseils en matière de fertilisation. Dans l'absence de ces tests de calibrage des analyses de sol dans les différentes régions du Maroc, et pour les différents types de sol et les différentes cultures, nous allons utiliser l'existant et s'inspirer des essais faits dans d'autres régions du monde à climat et à sols similaires.

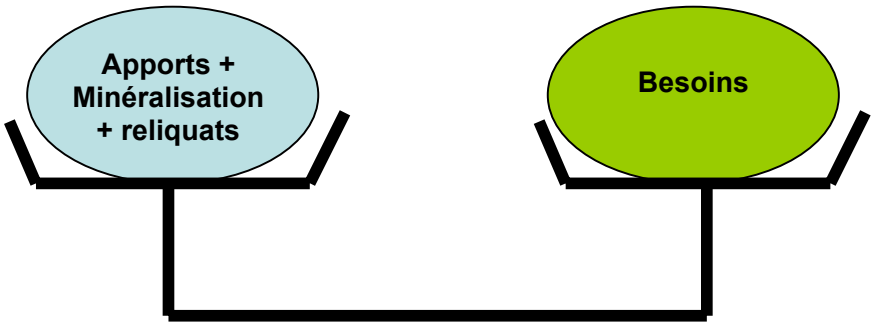
Bien qu'il est possible d'établir des régressions entre les teneurs en phosphore et la réponse des cultures aux apports en P, ces calibrations présentent un haut degré de spécificité lié au type de sol, type d'extractif, le climat, le génotype, ainsi qu'à d'autres facteurs (Blair et Lefroy, 1993).

Les normes d'interprétation des analyses sol ne sont pas malheureusement établies au Maroc pour les principales cultures. Dans le cas où ces normes ont été élaborées pour une culture dans une région donnée, elles ne le sont pas dans d'autres régions pour cette culture. Face à cette difficulté, nous allons utiliser ces normes lorsqu'elles existent et se contenter de celles élaborées dans d'autres pays à climat et à types de sols similaires, en mettant en garde que leur extrapolation peut amener à des conseils imprécis.

10. Les normes d'interprétation des analyses de sol.

Il est possible d'obtenir des rendements économiques maximaux si, en plus d'utiliser les doses d'engrais recommandées, on adopte des techniques agronomiques adéquates permettant de valoriser les apports en fertilisants. Comme on peut parfois améliorer les rendements en utilisant une dose supérieure aux doses recommandées, mais que cette hausse de rendement serait probablement négligeable et peu profitable. Par ailleurs, les quantités recommandées dépassent parfois quelque peu le seuil de rentabilité. Une telle pratique est souhaitable pour maintenir une fertilité élevée du sol et pour tenir compte des erreurs d'échantillonnage dans un champ.

Afin d'éviter que les sols ne s'appauvrissent, il est nécessaire de compenser les prélèvements en éléments nutritifs par la culture précédente ou ceux lessivés par les pluies. L'objectif de la fertilisation est d'approcher le meilleur rendement, la meilleure qualité tout en préservant l'environnement dans des conditions économiquement acceptables.



YARA International (Anonyme, non daté) propose une méthode de conduite de la fertilisation phospho-potassique qui vise à garantir une alimentation non limitante des cultures qui ne pénalise pas la production. Le raisonnement se fonde sur quatre critères principaux :

- exigence de l'espèce cultivée;
- l'analyse de sol;
- le passé récent de fertilisation;
- la restitution ou non des résidus de cultures du précédent.

La constitution de réserves (de sécurité) dans le sol est abandonnée au profit de la recherche d'un effet plus direct de la fertilisation sur les cultures (formes solubles, placement au plus près des besoins...). En fonction de l'exigence de la culture considérée et de types de sol, des valeurs seuils d'analyse de sols sont définies :

- **"Norme"** : valeur de l'analyse de sol au delà de laquelle le rendement n'augmente plus avec des apports d'engrais.

- **Seuil de renforcement** : valeur de l'analyse de sol en deçà de laquelle il faut renforcer la fumure pour obtenir une augmentation de rendement

La mise en oeuvre de cette approche se traduit schématiquement par trois types de stratégies de fertilisation :

- **Le renforcement ou redressement**: dans le cas d'une biodisponibilité faible, sur une parcelle pauvre avec une culture exigeante. Les apports doivent dépasser alors les quantités exportées par les cultures ;

- **L'entretien** : dans le cas d'une biodisponibilité intermédiaire, il suffit alors de compenser par les apports d'engrais les exportations d'éléments par les récoltes ;

- **La norme**: dans le cas d'une biodisponibilité élevée ou pour une culture peu exigeante, sur un sol riche, l'apport d'engrais peut être inutile.

Cette approche permet un meilleur raisonnement de la fumure phospho-potassique et apporte des éléments objectifs d'aide à la décision permettant d'éviter des stratégies d'impasse non raisonnées pouvant conduire à des pertes de rendement (Figure 4).

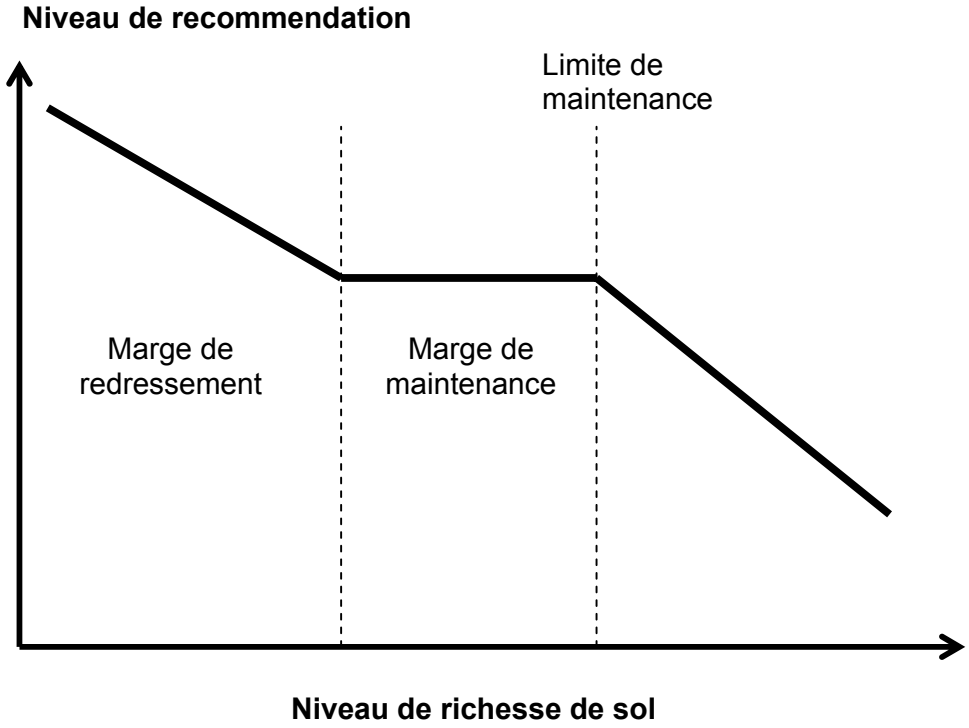


Figure 4. Niveaux d'apports en éléments fertilisants en fonction de la richesse de sol.

Raisonnement des apports en P et K en fonction des résultats d'analyse de sol.

Cas du phosphore (Achkar, non daté):

Teneur excessivement faible : il est recommandé de redresser le niveau de cet élément dans le sol, et assurer les besoins d'entretien ;

Teneur très faible : redresser le niveau et assurer les besoins d'entretien ;

Teneur faible : redresser le niveau de P et assurer les besoins d'entretien ;

Teneur moyenne : assurer les besoins d'entretien ;

Teneur satisfaisante : se contenter des apports d'entretien en tenant compte des disponibilités résiduelles en P_2O_5 (**X** - 40x3 en arboriculture ou **X** – 30x3 dans le cas des céréales). **X** étant la valeur de phosphore trouvée par les analyses de sol. Le niveau de phosphore est à contrôler annuellement.

Sol excessivement pourvu en phosphore, diminuer considérablement les apports de phosphore tout en contrôlant son niveau, au moins 300 unités de P2O5 seraient disponibles, ce qui est l'équivalent 670 kg de super triple 45%), dont il faut tenir compte dans les plans de fumure. Le niveau réellement disponible serait de l'ordre de (**X**-40) x 3. Le niveau de phosphore est à contrôler annuellement.

Tableau 3. Illustration du cas des céréales d'automne (Adapte de Achkar, non daté).

Intervalle de richesse en P_2O_5 (ppm) Olsen	Jugement	Besoin en redressement
<10	Excessivement faible	(30-**X**) x 3
≤10-20	Très faible	(30-**X**) x 3
≤20-30	Faible	(30-**X**) x 3
≤30-40	Moyenne	Théoriquement disponible
≤40-70	Satisfaisant	(**X**-30) x 3
≤70-140	Largement satisfaisant	(**X**-30) x 3
≤140	Très largement satisfaisant	(**X**-30) x 3

X : valeur de phosphore trouvée par le Kit Hach DR 2400.

Cas du potassium (Achkar, non daté):

Teneur excessivement faible : il est recommandé de redresser le niveau de cet élément dans le sol, et satisfaire les besoins d'entretien de la culture. Pour des raisons économiques, les doses de redressement de K_2O supérieures à 150 unités peuvent être fractionnées sur 2-4 ans.

Teneur très faible : redresser le niveau et assurer les besoins d'entretien de la culture ;

Teneur moyennement faible a faible: redresser le niveau de K et satisfaire les besoins d'entretien de la culture;

Teneur moyenne : assurer les besoins d'entretien de la culture;

Teneur satisfaisante : diminuer légèrement les apports potassiques dans les plans de fumure. Au moins 150 unités de K2O serait a en tenir compte dans les plans de fumure.

Sol excessivement pourvu en potassium, éliminer complètement la fumure potassique en contrôlant son niveau annuellement ou avant l'installation d'une nouvelle culture.

Tableau 4. Illustration du cas des céréales d'automne (Adapte de Achkar, non daté).

Intervalle	Jugement
Teneur en argile ≥37%	
≤250-300 et	Moyenne pour les céréales
≤300-350	Moyenne pour les autres cultures
≤350-400 et	Satisfaisant pour les céréales
≤350-450	Satisfaisant pour les autres cultures
≤400-600	Largement satisfaisant pour les céréales
≤450-650	Largement satisfaisant pour les autres cultures
>600 et	Très Largement satisfaisant pour les céréales
>650	Très largement satisfaisant pour les autres cultures
Teneur en argile <20%	
≤100-150	Teneur moyenne
≤150-250	Teneur satisfaisante
≤250-350	Teneur largement satisfaisante
>350	Teneur très largement satisfaisante

Illustration du cas ou la teneur en Argile est supérieure à 37% :

- Si la teneur (X) est inférieure à 250 (ou 300) : Nécessite de redressement (250-X)x3 ou (300-X)x3 ;
- Si la teneur trouvée (X) est supérieure à 250 (ou 300), la quantité de potasse théoriquement disponible est (X-250)x3 ou (X-300)x3.

Illustration du cas ou la teneur en Argile 20≤A≤37% :

- Utiliser l'abaque suivant :

Redressement = (X-x)x3 (avec x<X) ; X est la valeur souhaitée, et x est la valeur trouvée ;

Théoriquement disponible : (X-x)x3 (avec X>x) ; X est la valeur trouvée, et x est la valeur requise ;

Illustration du cas avec la teneur en argile A<20% (toutes les cultures) :

Redressement=(100-X)x3, si X (valeur trouvée)<100

Si X>150, la quantité de potasse théoriquement disponible est (X-150)x3

Tableau 5. Interprétation des résultats d'analyse de la matière organique (Achkar, non daté).

Intervalle (%)	Jugement	Dose de fumier recommandée (T/ha)
Sols argileux et limoneux : AA, A, AS, ASS, AL, ALS, LA, LSA, L, LS, et LL		
≥3	Largement satisfaisant	-
≤2-3	Satisfaisant	-
≤1,7-2	Moyenne	-
≤1,6-1,7	Moyennement faible	20
≤1,4-1,6	Moyennement faible	30
≤1,15-1,4	Faible	40
≤1-1,15	Très faible	50
≤0,8-1	Très faible	60
≤0,60-0,80	Excessivement faible	70
≤0,40-0,60	Excessivement faible	80
<0,40	Excessivement faible	100
Sols sableux : SA, SAL, SL, S, et SS		
≥2	Largement satisfaisant	-
≥1,75-2,00	Satisfaisant	-
≥1,5-1,75	Moyenne	-
≥1,25-1,50	Moyennement faible	20
≥1,00-1,25	Faible	30
≥0,86-1,00	Faible	40
≥0,70-0,85	Très faible	50
≥0,60-0,70	Très faible	60
≥0,50-0,60	Excessivement faible	80
≥0,40-0,50	Excessivement faible	90
<0,40	Excessivement faible	100

Tableau 6. Interprétation des niveaux de calcaire total et calcaire actif (Achkar, non daté).

Calcaire total (%)	Jugement	Commentaires
0	Nul	-
<0-1	Très faible	Aucun risque de chlorose
<1-4	Faible	Aucun risque de chlorose
<4-10	Moyenne	Risque de chlorose très faible
<10-15	Moyennement élevé	Risque de chlorose faible
<15-30	Elevé	Risque de chlorose important
<30-45	Très élevé	Très fort risque de chlorose, éviter toutes les cultures sensibles au calcaire, en arboriculture fruitière et viticulture, utiliser les portes greffes résistants. Risque de déficience en oligo-éléments (Cu, Zn, Fe, B, et Mn), sauf pour le molybdène.
>45	Excessivement élevé	
Calcaire actif (%)		
<0-3	Faible	Risque de chlorose très faible
<3-7	Moyenne	Risque moyen de chlorose
<7-15	Elevé	Risque élevé de chlorose, il faut faire des apports foliaires en oligo-éléments Cu, Zn, B, Fe, et Mn.
>15	Très élevé	Risque très élevé de chlorose, éviter toutes les cultures sensibles au calcaire, en arboriculture fruitière et viticulture, utiliser les portes greffes résistants. Risque de déficience en oligo-éléments (Cu, Zn, Fe, B, et Mn), sauf pour le molybdène.

Tableau 7. Interprétation des résultats d'analyse du pH de sol.

Valeurs optimales	Commentaires & interprétation
6,0-7,0	Un pH compris entre 6,0 et 6,5 est considéré comme adéquat pour la plupart des cultures, cependant il est recommandé des valeurs comprises entre 6,5 et 7,0 pour la luzerne et l'orge.
≥9.2	Très alcalin, utiliser les amendements gypseux.
8.7≤pH<9.2	Alcalin, utiliser les amendements gypseux.
8.0≤pH<8.7	Franchement basique
7.5≤pH<8.0	Basique
7.2≤pH<7.5	Légèrement basique
6.8≤pH<7.2	Neutre
6.5≤pH<6.8	Légèrement acide
6.0≤pH<6.5	Acide
5.5≤pH<6.0	Franchement acide, utiliser les amendements calcaires à raison de 3 t/ha de chaux éteinte et suivre l'évolution du pH chaque trois mois. Bien mélanger au sol. Des doses supérieures sont nécessaires pour les sols argileux. Eviter l'épandage juste avant l'installation de la culture ou par temps pluvieux ou sur un sol humide.
pH<5.5	Excessivement acide, utiliser les amendements calcaires, à raison de 4 t/ha de chaux éteinte et suivre l'évolution du pH chaque trois mois. Bien mélanger au sol. Des doses supérieures sont nécessaires pour les sols argileux. Eviter l'épandage juste avant l'installation de la culture ou par temps pluvieux ou sur un sol humide.

Tableau 8. Capacité d'échange cationique (CEC) des différents types de sol.

Type de sol	CEC (meq/100g)				
	Très faible	**Faible**	**Moyenne**	**Elevée**	**Très élevée**
Sableux	<4	4-6	6-8	8-10	10
Limoneux	<10	10-15	15-20	20-25	25
Argileux	<25	25-30	30-35	35-40	40

Adapté de Doucet (1992) cite dans Collectif (2001).

Tableau 9. Les niveaux moyens des exportations en éléments minéraux par certaines cultures (Chiffres compilés de plusieurs sources : (Dahnke et al, 1992 **;** Yara International, Anonyme non daté ; SCPA, 1989).

Culture	Exigences		Unités	Kg d'éléments par unité		
	P_2O_5	K_2O		N	P_2O_5	K_2O
Grandes cultures						
Blé dur grain	*Moyenne*	*Faible*	*Kg/q*	2,20	1,20	0,60
Plante entière				0,5	1,80	1,80
Blé tendre grain seul	*Faible*	*Faible*	*Kg/q*	1,87	0,90	0,50
Plante entière				0,50	1,20	1,80
Fève grain	*Forte*	*Moyenne*	*Kg/q*	3,50	1,10	1,50
Plante entière				4,50	1,50	5,00
Orge grain	*Moyenne*	*Faible*	*Kg/q*	1,49	0,85	0,75
Plante entière	*Faible*			0,50	1,10	2,10
Maïs grain	*Moyenne*	*Moyenne*	*Kg/q*	1,40	0,75	0,50
Plante entière			*grain*	2,20	1,62	3,73
Maïs ensilage			*Kg/t MS*	14,00	5,50	15,00
Tournesol grain	*Forte*	*Moyenne*	*Kg/q*	2,70	1,30	8,80
Tournesol Plante entière			*grain*	5,50	1,75	2,05
Cultures horticoles						
Ail : bulbe seul			Kg/q	3,87	0,9	4,80
Ail : plante entière				-	-	-
Courgette : légume			Kg/t	1,80	1,01	4,05
Courgette : plante entière						
Melon : fruits				3,78	0,07	0,35
Melon : plante entière						
Pastèque			Kg/t	3,73	0,21	
Pastèque : plante entière					0,21	
Tomate fruits			Kg/t	1,62	0,06	0,25
Tomate : plante entière				2,75	0,75-1,50	4,85-7,00
Cultures arboricoles						
Amandier fruit						
Olivier fruit						
Palmier dattier fruit						
Pommier fruit			Kg/t	8,30	4,17	15,00
Vigne fruit			Kg/t	8,30	3,33	13,30

NB. *Ces indices sont utiles dans le cas où on dispose d'équations de régression permettant de calculer les besoins en P et K en fonction du rendement objectif et des résultats des analyses de sol.*

Dans l'attente d'élaboration des seuils de réponse des principales cultures aux apports de phosphore et de potassium, nous avons compilé les données rapportées dans différentes publications nationales et internationales (Tableau 6).

Tableau 10. Réponse des différentes cultures aux apports en phosphore et en potassium selon la teneur (ppm ou mg/kg) du sol en ces éléments. (Adapté de Tyler and Lorenz, 1991, Jones, 1998 ; Reisenauer et *al.*, non daté, Badraoui et al., 2001).

Culture	**Réponse des différentes cultures aux apports en phosphore et en potassium**		
	Elément	Réponse probable	Réponse peu probable
Grandes cultures			
Blé dur	Phosphore	< 17,5[3] **(Doukkala)** < 16,0[3] **(Gharb)**	> 17,5[3] **(Doukkala)** > 16,0[3] **(Gharb)**
	Potassium	< 260[3] **(Doukkala)** < 140[3] **(Gharb)**	> 260[3] **(Doukkala)** > 140,0[3] **(Gharb)**
Blé tendre	Phosphore	< 17,5[3] **(Doukkala)** < 16,0[3] **(Gharb)**	> 17,5[3] **(Doukkala)** > 16,0[3] **(Gharb)**
	Potassium	< 40[2]	> 60[2]
Fève	Phosphore	-	-
	Potassium	< 200	>200
Orge	Phosphore	< 6	> 12
	Potassium	< 40[2]	> 60[2]
Maïs ensilage	Phosphore	< 6[2]	> 12[2]
	Potassium	< 50[2]	> 80[2]
Tournesol	Phosphore	<22[3] **(Gharb)** <30	>22[3] **(Gharb)** >50
	Potassium	<149[3] **(Gharb)** <100	>149[3] **(Gharb)** >150
Cultures horticoles			
Ail	Phosphore	< 8[1]	> 12[1]
	Potassium	<80[1]	> 100[1]
Courgette	Phosphore	< 5[1]	> 9[1]
	Potassium	< 50[1]	> 70[1]
Melon	Phosphore	<8[1]	>12[1]
	Potassium	-	-
Pastèque	Phosphore	<60	>160
	Potassium	<100	>170
Tomate	Phosphore	<6[1]	>12[1]
	Potassium	<50[1]	>80[1]
Cultures arboricoles			
Amandier	Phosphore	-	-
	Potassium	-	-

Olivier	Phosphore	-	-
	Potassium	-	-
Palmier dattier	Phosphore	-	-
	Potassium	-	-
Pommier	Phosphore	<50	>100
	Potassium	<150	>300
Vigne	Phosphore	<25	>50
	Potassium	<125	>160

Données compilées à partir de : [1]Soil and Plant Testing in California, University of California Division of Agricultural Science Bulletin 1879 (1983); [2]Reisenauer et al. (non daté) ; [3]Badraoui et al. (2001). (-) : Chiffres non disponibles.

11. Recommandations en matière de fertilisation des principales cultures.

11.1. Blé dur

Nous recommandons d'ajuster les apports en fonction du rendement objectif. Apportez 3,0 Kg de N, 1,7 kg de P et 2,2 kg de K pour tout quintal supplémentaire de blé au-delà des 50 qx/ha indiqués dans le tableau 8. Fractionner l'apport d'azote en 2 ou 3 applications. Incorporer les engrais de fond par une reprise superficielle avant le semis.

Apportez l'azote sous forme d'urée, de nitrate d'ammonium ou sulfate d'ammonium pendant la phase tallage-remplissage du grain ou les besoins en cet élément sont plus grands.

Tableau 11. Les recommandations en P et K pour le blé dur pour un rendement de 50 qx/ha (Adapté de Collectif, 2004) ; Anonyme, 2001 ; Rehm et *al.*, 1998 ; Sander, 1988).

Richesse du sol	Richesse du sol (en ppm)	
	Teneur en P (ppm) ***Selon la méthode Olsen***	**Quantités à apporter (Kg P_2O_5/ha)**
Très faible	< 10	130
Faible	11-19	110
Moyen	20-39	80
Moyennement élevé	40-58	30
Elevé	59-78	20
Très élevée	>78	0
	Teneur en K (ppm)	**Quantités à apporter (Kg K_2O/ha)**
Très faible	<18	100
Faible	19-37	100
Moyenne	38-74	80
Moyennement élevée	75-112	60

Elevée	113-148	60
Très élevée	≥149	60

11.2. Blé tendre:

Comme pour le blé dur, nous recommandons d'ajuster les apports en fonction du rendement objectif. Apportez 3,0 Kg de N, 1,7 kg de P et 2,2 kg de K pour tout quintal supplémentaire de blé au-delà des 50 qx/ha indiqués dans le tableau 8. Fractionner l'apport d'azote en 2 ou 3 applications. Incorporez les engrais de fond par une reprise superficielle avant le semis.

Apportez l'azote sous forme d'urée, de nitrate d'ammonium ou sulfate d'ammonium pendant la phase tallage-remplissage du grain ou les besoins en cet élément sont plus grands.

Tableau 12. Les recommandations en P et K pour le blé tendre (Adapté de Collectif, 2004 **;** Anonyme, 2001).

Richesse du sol	Richesse du sol (en ppm)	
	Teneur en P (ppm) ***Selon la méthode Olsen***	**Quantités à apporter (Kg P_2O_5/ha)**
Très faible	< 10	130
Faible	11-19	110
Moyen	20-39	80
Moyennement élevé	40-58	30
Elevé	59-78	20
Très élevée	>78	20
	Teneur en K (ppm)	**Quantités à apporter (Kg K_2O/ha)**
Très faible	< 18	100
Faible	19-37	100
Moyenne	38-74	80
Moyennement élevée	75-112	60
Elevée	113-148	60
Très élevée	≥149	60

11.3. Orge

Comme pour les blés, nous recommandons d'ajuster les apports en fonction du rendement objectif. Apportez 3,0 Kg de N, 1,7 kg de P et 2,2 kg de K pour tout quintal supplémentaire de d'orge au-delà des 50 qx/ha indiqués dans le tableau 8. Fractionner l'apport d'azote en 2 ou 3 applications. Incorporer les engrais de fond par une reprise superficielle avant le semis.

Apportez l'azote sous forme d'urée, de nitrate d'ammonium ou sulfate d'ammonium pendant la phase tallage-remplissage du grain où les besoins en cet élément sont plus grands.

Tableau 13. Les recommandations en P et K pour l'orge (Adapté de Collectif, 2004 ; Anonyme, 2001).

Rendement objectif (tons/ha)	Richesse du sol (en ppm)	
	Teneur en P (ppm) ***Selon la méthode Olsen***	**Quantités à apporter (Kg P_2O_5/ha)**
Très faible	< 10	130
Faible	11-19	110
Moyen	20-39	80
Moyennement élevé	40-58	30
Elevé	59-78	20
Très élevée	>78	20
	Teneur en K (ppm)	**Quantités à apporter (Kg K_2O/ha)**
Très faible	< 18	100
Faible	19-37	100
Moyenne	38-74	80
Moyennement élevée	75-112	60
Elevée	113-148	60
Très élevée	≥149	60

11.4. Maïs

Dans le cas où la teneur de votre sol en phosphore est très faible (inférieure à 10 ppm), et celle en potassium est très faible (inférieure à 40 ppm), les quantités de fertilisants recommandes dans ce cas ne permettront pas de changer les résultats de test de richesse du sol en ces éléments. Cependant, si les teneurs en ces éléments sont faibles, les apports en P et K permettront de remplacer les quantités prélevées par la culture (Dahnke, et *al.*, 1992).

Tableau 14. Les niveaux d'exportations en macroéléments et en Zinc chez le maïs. (Adapté de Tyler and Lorenz, 1991 ;

Niveau d'exportation des macroéléments et du Zinc (Zn)							
Rendement	**kg/ha**						
	N	**P2O5**	**K2O**	**MgO**	**CaO**	**S**	**Zn**
20 t de matière fraîche	208	60	228	25	42	14	0.21
Source: Fox,1973 in Collectif (2004)							

Vu que le phosphore et le potassium sont très peu mobiles dans le sol, comparativement à l'azote, il est possible d'augmenter progressivement leur disponibilité dans le sol. A titre d'exemple, l'application de 22 kg de P_2O_5 /ha permet d'augmenter la teneur du sol en phosphore d'un point. En d'autre terme, si la teneur du sol en P est de 5, et que vous désirez opérer avec une teneur en phosphore de 12, l'application de 157 kg P_2O_5 /ha (ou 342 Kg sous forme de 18-46-0), mélangé au sol dans les premiers 15 cm de sol permet d'augmenter la teneur du sol en P de 7 points (Dahnke, et *al.*, 1992).

De même, l'application de 11 Kg de K_2O permet d'améliorer la teneur du sol en K_2O d'un point (Dahnke, et *al.*, 1992).

Tableau 15. Les recommandations en P et K pour le maïs ensilage (rendement de 60 t/ha). (Adapté de Sims and Leytem ; Tyler and Lorenz, 1991).

Richesse du sol en phosphore (en ppm) *Selon la méthode Olsen*					Richesse du sol en potassium (en ppm) *Selon la méthode Bray-1*				
TF	F	M	E	TE	TF	F	M	E	TE
<10	11-19	20-39	40-58	>59	<18	19-37	38-74	75-112	113-200
Quantités à apporter (Kg P_2O_5/ha)					Quantités à apporter (Kg K_2O/ha)				
190	180	160	60	0	235	220	200	190	150-0

TF : Très faible ; F : Faible ; M : Moyenne ; E : Forte ; TE : Très Forte.

11.5. Tournesol

Les niveaux des exportations en macro et micro-éléments sont indiqués dans le tableau ci-après.

Tableau 16. Les niveaux d'exportations en éléments nutritifs chez le tournesol.

Exportations en éléments nutritifs primaires et secondaires					
Pour un rendement de 3,5 t/ha	**kg/ha**				
	N	**P_2O_5**	**K_2O***	**MgO**	**CaO**
Absorption	131	87	385	70	210
Exportation hors la parcelle	66	54	82	14	10
Résidus	65	33	303	56	200
* Notez le haut niveau des absorptions du potassium.					

Exportations en micro-éléments					
Pour un rendement de 3,5 t/ha	**g/ha**				
	Fe	**Cu**	**Zn**	**Mn**	**B***
Absorption	732	59	348	412	396
Exportation hors la parcelle	106	25	148	42	80
Résidus	626	34	200	370	316
* Parmi les micro-éléments, c'est le bore qui est le plus critique.					

Tableau 17. Les recommandations en P et K pour le tournesol (Les normes pour P et K sont respectivement de 30-50 ppm et 100-150 ppm) (Adapté de Collectif, 2004)**.**

Richesse du sol en phosphore (en ppm) *Selon la méthode Olsen*					Richesse du sol en potassium (en ppm) *Selon la méthode Bray-1*				
TF	F	M	E	TE	TF	F	M	E	TE
<10	11-19	20-39	40-58	>59	>18	19-37	38-74	75-112	113-200
Quantités à apporter (Kg P_2O_5/ha)					Quantités à apporter (Kg K_2O/ha)				
90	60	80	30	0	150	125	80	25	10-0

11.6. Fève :

Une récolte d'une tonne de grains de fève exporte environ 4 kg de phosphore, 10 kg potassium, 1,5 kg de soufre, et 1,3 kg de calcium. La règle générale à suivre dans la gestion des éléments fertilisants est de compenser leur exportation par la culture.

Apportez environ 20 unités d'azote/ha, soit environ 50 kg/ha d'urée ou 60 kg/ha d'ammonitrate au début du cycle pour favoriser le démarrage de la culture avant que l'azote atmosphérique ne soit disponible à la plante à travers les nodosités.

Apportez environ 30 kg/ha de soufre pour des sols sablonneux bien drainés, en absence d'analyses de sol.

Incorporer les engrais de fond par une reprise superficielle avant le semis.

Tableau 18. Les recommandations en P et K pour la fève (Adapté de Sims et Leytem. 2002).

	Richesse du sol en phosphore (en ppm) *Selon la méthode Olsen*					Richesse du sol en potassium (en ppm) *Selon la méthode Bray-1*				
	TF	F	M	E	TE	TF	F	M	E	TE
	<10	11-19	20-39	40-58	>59	<18	19-37	38-74	75-112	113-200+
	Quantités à apporter (Kg P_2O_5/ha)					Quantités à apporter (Kg K_2O/ha)				
	40	15	10	10	10	60	60	30	20	0

11.7. Ail :

Tableau 19. Les recommandations en P et K pour l'ail (les normes sont de 60-155 pour P et de 100-170 pour K) (Adapté de Collectif, 2004 ; Tyler and Lorenz, 1991).

	Richesse du sol en phosphore (en ppm) *Selon la méthode Olsen*					Richesse du sol en potassium (en ppm) *Selon la méthode Bray-1*				
	TF	F	M	E	TE	TF	F	M	E	TE
	<10	11-19	20-39	40-58	>59	<18	19-37	38-74	75-112	113-170
	Quantités à apporter (Kg P_2O_5/ha)					Quantités à apporter (Kg K_2O/ha)				
	265	235	179	110	70	215	190	160	120	80-25

11.8. Courgette :

Une récolte d'une tonne de courgette enlève de 0,9 à 1,35 kg N, 0,36 à 1,35 kg de P_2O_5, et 0,8 à 2,25 kg de K_2O du sol.

Adaptez les apports au rendement objectif et à la richesse du sol en N, P, et K. Appliquer entre 10 et 15 kg de Mg en bande au moment du semis, lorsque le sol contient moins de 1,5 meq Mg/100g de sol ou lorsque la teneur en calcium (Ca) est 10 fois plus élevée que celle du Mg.

Incorporez les engrais de fond par une reprise superficielle avant le semis.

En plus de l'azote appliqué au semis, nous recommandons deux applications additionnelles de 28 kg de N et de 90 kg de K par hectare à 3 et 6 semaines après la levée.

Déduire la quantité d'azote issue de la minéralisation et du précèdent cultural.

Tableau 20. Les recommandations en P et K pour la courgette (Adapté de Anonyme, 2004, Université Oregon).

Richesse du sol en phosphore (en ppm) *Selon la méthode Olsen*					Richesse du sol en potassium (en ppm) *Selon la méthode Bray-1*				
TF	F	M	E	TE	TF	F	M	E	TE
<10	11-19	20-39	40-58	>59	>18	19-37	38-74	75-112	113-200+
Quantités à apporter (Kg P_2O_5/ha)					Quantités à apporter (Kg K_2O/ha)				
75	75	50	25	25	150	150	120	100	50-0

11.9. Tomate de plein champ

Les besoins en azote sont élevés pendant la croissance végétative chez la tomate. Un modèle de fertilisation azotée de la tomate a été développé. Il permet de calculer la dose d'azote en tenant compte du niveau des exportations par la culture, de l'efficience d'utilisation e l'azote, et du niveau de richesse du sol indiqué par l'analyse (Feigin et al., 1986).

$$Nf = (Np / E) - Na$$

Où:
Nf = quantité d'azote à appliquer
Np = niveau des exportations donné par la littérature
E = Efficience d'utilisation de l'azote estimé entre 0.70 et 0.75
Na = Niveau de richesse du sol indiqué par l'analyse auquel plus l'azote issu de la minéralisation, moins le niveau de perte par dénitrification.

Tableau 21. Les recommandations en P et K pour la tomate de plein champ (les normes pour P et K sont, respectivement de 60-150 ppm et 110-200 ppm). (Adapté de Collectif, 2004 ; Tyler and Lorenz, 1991).

	Richesse du sol en phosphore (en ppm) *Selon la méthode Olsen*					Richesse du sol en potassium (en ppm) *Selon la méthode Bray-1*				
	TF	F	M	E	TE	TF	F	M	E	TE
	<10	11-19	20-39	40-58	59-150	<18	19-37	38-74	75-112	113-200
	Quantités à apporter (Kg P_2O_5/ha)					Quantités à apporter (Kg K_2O/ha)				
	140	122	88	78	65-10	150	145	135	120	10

11.10. Melon

Tableau 22. Les recommandations en P e K pour le melon en plein champ. (Pour des rendements compris entre 20 et 30 t/ha. (Adapté de Tyler and Lorenz, 1991).

Richesse du sol en phosphore (en ppm) *Selon la méthode Olsen*					Richesse du sol en potassium (en ppm) *Selon la méthode Bray-1*				
TF	F	M	E	TE	TF	F	M	E	TE
<10	11-19	20-39	40-58	>59	<18	19-37	38-74	75-112	113-250+
Quantités à apporter (Kg P_2O_5/ha)					Quantités à apporter (Kg K_2O/ha)				
220	190	125	27	0	230	200	150	85	50-0

11.11. Pastèque.

Le rendement objectif pour une culture intensive est généralement compris entre 15 et 30 t/ha.

Tableau 23. Les niveaux d'exportations en macroéléments et en Zinc chez la pastèque.

Niveau des exportations en éléments nutritifs					
Rendement t/ha	**kg/ha**				
	N	**P2O5**	**K2O**	**MgO**	**CaO**
15	56	16	100	25	98
Source : plusieurs					

Tableau 24. Les recommandations en phosphore et en potassium pour la pastèque (Les normes pour P et K sont, respectivement de 60-160 ppm et de 100-170 ppm) (Adapté de Collectif, 2004)**.**

Richesse du sol en phosphore (en ppm) *Selon la méthode Olsen*					Richesse du sol en potassium (en ppm) *Selon la méthode Bray-1*				
TF	F	M	E	TE	TF	F	M	E	TE
<10	11-19	20-39	40-58	>59	<18	19-37	38-74	75-112	113-160
Quantités à apporter (Kg P_2O_5/ha)					Quantités à apporter (Kg K_2O/ha)				
203	180	145	125	100	200	190	170	140	70-10

11.12. Amandier

Adaptez les apports au rendement objectif et à la richesse du sol en N, P, et K, vu qu'on ne peut pas donner une formule unique de fumure pour tous les cas de figures.

Appliquez le fumier dans les trous destinés à la plantation d'olivier et le mélanger au sol.

Tableau 25. Les besoins totaux de l'amandier en N, P, K, Ca, et Mg.

Elément	Besoins totaux (kg/ha/an)	
	Rdt (1 t/ha)	Rdt (4 t/ha)
Azote (N)	50	100
Phosphore (P_2O_5)	18	37
Potassium (K_2O)	55	108
Calcium (CaO)	45	56
Magnésium (MgO)	8	14

Tableau 26. Les recommandations en P et K pour l'amandier.

Richesse du sol en phosphore (en ppm) *Selon la méthode Olsen*					Richesse du sol en potassium (en ppm) *Selon la méthode Bray-1*				
TF	F	M	E	TE	TF	F	M	E	TE
<10	11-19	20-39	40-58	>59	>18	19-37	38-74	75-112	>113
Quantités à apporter (Kg P_2O_5/ha)					Quantités à apporter (Kg K_2O/ha)				
160	120	80	40	20	160	120	80	0	0

11.13. Olivier

Le rendement de l'olivier varie d'un site à l'autre et d'une année à l'autre. Le phénomène de l'alternance est commun, spécialement sous les conditions semi-arides et en absence d'irrigation.

Adaptez les apports au rendement objectif et à la richesse du sol en N, P, et K. Appliquez le fumier dans les fosses destinées à la plantation d'olivier et le mélanger au sol.

Apportez du fumier chez les jeunes plants d'olivier à raison 20 à 40 kg de fumier/arbre/an. Pour les oliviers en production, appliquez 40 à 60 kg de fumier/arbre/an et 800 à 1000 g d'azote/arbre soit 4 à 5 kg de sulfate d'ammoniaque.

Tableau 27. Les recommandations en N, P et K pour l'olivier (De La Vega de Luque, 1969 in Lasram et Tnani, non daté).

Niveau de production	**g/arbre**			
	Application d'hiver			**Application d'automne**
kg/arbre	**N**	**P_2O_5**	**K_2O**	**N**
< 15	200	200	400	300
15-30	300	300	600	300
30-50	400	400	800	400
> 50	500	500	1000	500

11.14. Pommier :

Adaptez les apports au rendement objectif et à la richesse du sol en N, P, et K. Appliquez le fumier dans les fosses destinées à la plantation du pommier et le mélanger au sol.

Tableau 28. Les recommandations en P et K pour le pommier (les normes pour le P et K sont respectivement, de 50-100 ppm, et 150-300 ppm) (Adapté de Collectif, 2004).

Rendement objectif (tons/ha)	Richesse du sol en phosphore (en ppm) *Selon la méthode Olsen*					Richesse du sol en potassium (en ppm) *Selon la méthode Bray-1*				
	TF	F	M	E	TE	TF	F	M	E	TE
	<10	11-19	20-39	40-58	>59	<18	19-37	38-74	75-112	113-170
	Quantités à apporter (Kg P_2O_5/ha)					Quantités à apporter (Kg K_2O/ha)				
	175	150	125	100	70	150	150	110	75	60

10.15. Palmier dattier :

El-Hammady et al. (1987) recommande 0,5 kg N/arbre/an réparti en trios applications, plus 165 g K_2O/arbre pour améliorer le rendement fruit du palmier. Les fertilisants peuvent être appliqués directement autour de l'arbre ou dans l'eau d'irrigation. L'application annuelle de fumier est une excellente manière de maintenir la fertilité du sol.

Nous recommandons d'appliquer le fumier annuellement pour maintenir la fertilité du sol et assurer une bonne productivité du palmier.

10.16. Vigne

Le besoin de la vigne en fertilisants est élevé pendant la reprise de végétation et la croissance rapide au printemps, et pendant le développement des grappes. Souvent, on apporte l'azote avant la reprise de la végétation.
Pour les sols à texture fine, et si l'irrigation est gravitaire, on fera un seul apport. Alors que pour les sols à texture grossière, on fractionne l'apport d'azote (fin de l'hiver et en mai).

Tableau 29. Les niveaux d'exportations en éléments nutritifs chez la vigne.

Exportations en macroéléments					
Rdt t/ha	**kg/ha/an**				
	N	**P_2O_5**	**K_2O**	**MgO**	**CaO**
7 - 25	22-84	5-35	41-148	6-25	28-204
Exportations en micro-éléments					
Rdt t/ha	**g/ha/an**				
	Fe	**B**	**Mn**	**Zn**	**Cu**
7 - 25	292-1 121	37-228	49-787	110-585	64-910
Source: Fregoni, 1981 in Delas (non daté).					

Tableau 30. Les recommandations en P e K pour la vigne. Les normes pour P et K sont respectivement de 25-50 ppm et 125-160 ppm) (Adapté de Anonyme, 2004)**.**

Rendement objectif (tons/ha)	Richesse du sol en phosphore (en ppm) *Selon la méthode Olsen*					Richesse du sol en potassium (en ppm) *Selon la méthode Bray-1*				
	TF	F	M	E	TE	TF	F	M	E	TE
	<10	11-19	20-39	40-58	>59	<18	19-37	38-74	75-112	113-170
	Quantités à apporter (Kg P_2O_5/ha)					Quantités à apporter (Kg K_2O/ha)				
	100	90	60	30	0	200	180	150	110	110-60

Autres méthodes d'évaluation des besoins en éléments nutritifs

1. L'analyse des tissus végétaux est la méthode la plus utilisée en arboriculture fruitière. Pour ce qui est des grandes cultures et des productions légumières, elle complète l'information fournie par l'analyse de sol.
2. Les symptômes de carence nutritionnelle sur les feuilles peuvent être très utiles dans certains cas, mais dans d'autres, comme pour ce qui est du phosphore et du potassium, ils présentent des inconvénients du fait que des pertes de rendement considérables peuvent être enregistrées avant même que les symptômes ne soient visibles sur les plantes.
3. Certains maintiennent que le producteur doit remettre au sol la quantité d'éléments fertilisants qui a été enlevée par la culture. Une telle règle semble valable pour l'azote puisque, pour certaines cultures, on remet approximativement ce qui a été utilisé. Par contre, elle s'applique rarement aux autres éléments fertilisants. En effet, on trouve dans plusieurs régions des sols argileux et des sols limono-argileux qui ont du potassium en réserve pour de nombreuses années à venir; un apport annuel de potassium constituerait donc une dépense inutile et ne saurait pas tirer partie d'un des quelques avantages que présente ce type de sol par rapport aux sols de texture plus grossière.

Les analyses de sol faites dans les laboratoires accrédités constituent, avec les analyses de tissus végétaux et les symptômes de carence nutritionnelle, le meilleur moyen de déterminer les besoins en engrais d'une culture précise dans un champ particulier.

Raisonnement de la fertilisation en agriculture raisonnée

L'agriculture raisonnée est fondée sur un principe de raisonnement global prenant en considération les finalités économiques, qualitatives, environnementales et sociales. La fertilisation raisonnée a pour but d'adapter les apports en éléments fertilisants aux besoins réels des cultures en tenant compte des éléments présents dans le sol et du rendement potentiel de la plante. Les outils développés pour aider l'agriculteur sont, par exemple :

- Les analyses de sol qui permettent de connaître les éléments fertilisants présents dans le sol,

- Des méthodes d'évaluation des besoins de la plante.

De plus, dans des situations à risques, l'agriculteur peut mettre en place des cultures intermédiaires qui piègent les nitrates et évitent les fuites d'azote en profondeur.

Références bibliographiques.

Achkar M (non daté) Interprétation des résultats d'analyse du sol. Document ronéoté, 21p.

Anonyme (2004) Pompkin and winter squash. Commercial Vegetable Production Guide. Oregon State University extension bulletin.

Anonyme (2002) Manuel d'instruction du spectrophotomètre de laboratoire portable, modèle DR-2400, Doc 022.77.00566 AUG02, Réf n°59400-94. Hach Company, 69 p.

Anonyme (non daté) Part 1 Section 2: Soil Fertility Management Agronomy Guide 2005-2006.

Badraoui M, Agbani M, Bouabid R et Zeraouli M (2001) Mieux fertiliser le blé en irriguédans le Gharb. Transfert de Technologie en Agriculture, Bulletin mensuel d'Information et de Liaison du PNTTA. N° 84.

Badraoui M, Agbani M, Bouabid R et Zeraouli M (2001) Mieux fertiliser le tournesol en irrigué. Transfert de Technologie en Agriculture, Bulletin mensuel d'Information et de Liaison du PNTTA. N° 80.

Badraoui M, Soudi B, Agbani M, El Gharous M, et Karrou M (2000) Analyses de sol pour les cultures de blé et de betterave en irrigue dans les Doukkala.Transfert de Technologie en Agriculture, Bulletin d'Information et de Liaison du PNTTA. N° 70.

Blair G, Lefroy R (1993) Interpretation of soil tests: a review. Austr. J. Exp. Agric. 33, 1045-1052.

Collectif (2004) Soil Test Recommendations for Agronomic Crops. Agricultural Analytical Services Laboratory. Penn State University. www.aasl.psu.edu/PROGDESC.Htm

Collectif (Personnel du MAAARO) 2002 Gestion du sol et usage de fertilisants: Analyse du sol, 5 p.

Collectif (2001) Guide de fertilisation des cultures. Préparé par la Direction de l'Aménagement des terres, 24 p.

Collectif (Non daté 1) De quoi se nourrit la plante ? La nutrition minérale des plantes-la fertilisation. Groupe d'Etude et de Réflexion sur les Fertilisants (ADEIC, AFOC, ANC, CNJA, Familles de France, FNE, Ministère de l'agriculture et de la pêche-France, Ministère de l'industrie-France, MNLE, UNAF, UNIFA).

(Collectif, non daté 2). La gestion des fertilisants et des amendements. Bonnes pratiques environnementales. MAPA, Quebec.

Dahnke WC, Fanning C, and Cattanach A (1992) Fertilizing Corn grain, popcorn, silage corn, and sweet corn. SF-722 (revised). 14 AGR-8-1. October 1992, 4 pages.

Delas J (1989) La fertilisation des vignobles de qualité. Vigne Vin, édition spécial, France (1989).

Delas J (non daté) Grape or grapevine (*Vitis vinifera* L.) In. World Fertlizer Use Manual (Agata W et al., authors).

El Hammady et al. (1987) cite par Van der Vorm PDJ *In*. Dates and figs. *In*. World Fertilizer Use Manual (Several authors, Agata W et *al.*).

Elmstrom GW, Fiskell JGA, Martin FG (1973) Watermelon yield and quality: Effect of fertilizer rate and placement. Proc. Fl. St. Hort. Soc. 86, 196-200 (1973).

Fergoni M (1981) Nutrizione e fertilizzazione della vite EDAGRICOLE, Bologna, Italy.

Fox (1973) et Daigger & Fox (1971) In. World Fertlizer Use Manual (Agata W et al., authors).

Jacobson JR, Miller R, and Skogley E (1992) N, P, and K accumulation by hard red spring wheat. Montana AgResearch, 9: 23-26.

Jones JB (1998) Plant nutrient Manual. CRC Press. Boca Raton, Florida. 149p.

Kechaou M, Tnani MT (1978) Effet de la fertilisation sur la production de l'olivier dans les conditions Sfaxiennes sur l'olivier et les oléagineux. FAO, Mahdia, Tunisia (1978).

Korb N, Clain J, and Jacobson J (2002) Potassium Cycling, Testing, and Fertilizer Recommendations. Nutrient Management Module N° 5. A self-study course from the Montana State University Extension Services Continuing Education Series, N° 4449-5.

Lasram M, et Tnani MT (non daté) Olive Institut National de la Recherche Agronomique de Tunisie, Ariana, Tunisia. In. World Fertlizer Use Manual (Agata W et al., authors).

Llamas JF (1983) Basis of fertilization in olive cultivation. International course on the fertilization and intensive cultivation of olive. Cordoba, Spain, UNDP/FAO (1983).

Loudyi B (2004) Echantillonnage et analyses des sols : raisonnement de la fertilisation des cultures. Formation des techniciens et vulgarisateurs. ENA Meknes. 91 p.

Lousser R, Brousse G (1978) L'olivier. Editions GP Maisonneuve et Larose (1978).

Majewski C (non date) Soils and soil fertility. UNH Cooperative Extension-Cheshire Colorado, USA.

Mallarino A and Sawyer J (1999) Interpreting Mehlich-3 soil test results. p. 11-14. In Integrated Crop Management Newsletter, IC-482(2). Iowa State University, Ames, IA.

Moughli L (2000) Les engrais minéraux : Caractérisation et utilisations. Transfert de Technologie en Agriculture, Bulletin d'Information et de Liaison du PNTTA. N° 72.

Moughli L (Non daté) Cours sur la fertilité du sol et contrôle de la pollution. DSS, IAV Hassan II. http://www.iav.ac.ma/agro/dss/fertilite_4/5analyses.htm

Pratt PF (1965) *In*. Methods of Soil Analysis. American Society of Agronomy p 1027. Van der Vorm, PDJ non daté.

Olsen SR and Dean LA (1965) Phosphorus. In Methods of soil science. Black, C.A. ed. American Society of Agronomy. Madison, WI.

Rehm G, Schmidt M, and Eliason R (1998) Fertilizing wheat in Minnesota. Extension Bulletin FO-03772-GO.

Reisenauer HM, Quick J, Voss RE, and Brown AL (non daté) Chemical Soil Tests for Soil Fertility Evaluation. UC Davis, Vegetables Research and Information Center, 4p.

Sander DN (1988) How to Apply Fertilizer to Wheat: Application time, forms of fertilizer and methods of application must be considered when applying fertilizer to wheat. Field crops, Small grains D-12, G889.

SCPA (1989) La fertilisation raisonnée. Publication de la société commerciale des potasses et de l'azote. Mulhouse, France.

Sims JT and Leytem AB (2002) Dept of Plant and Soil Sci. Univ of Delware, Newark DE 19717.

The Fertilizer Institute (1982) The fertilizer handbook. The Fertilizer Institute, Washington, DC.

Tyler KB and Lorenz A (1991) Fertlizer Guide for California Vegetable Crops. Department of Vegetable Crops, University of California.

Warnicke D (non daté) Meeting the Nutrient Needs of Vine Crops. Crop and Soil Sciences. Michigan State University.
http://www.glexpo.com/abstracts/2004abstracts/vinecrop.pdf

Yara International (Non daté) La fertilisation Phosphorique et Potassique : Calcul des doses de P2O5 et K2O pour les grandes cultures. YARA International ASA. **http://fert.yara.fr/fr/crop_fertilization/plant_nutrition_guide/pk_fertilization.html**