



ONEP



FAO

Convention FAO/UTF/MOR023/MOR

**Assistance technique au programme de développement de
l'alimentation de l'eau potable rurale et de l'assainissement**

Guide technique de réutilisation en agriculture des eaux usées épurées et des boues des stations d'épuration

Préparé par :
Brahim Soudi et Dimitri Xanthoulis

Septembre 2007

Table des matières

<i>Liste des Figures</i>	4
<i>Liste des Tableaux</i>	4
<i>Liste des encadrés</i>	5
<i>Liste des annexes</i>	5
<i>Pourquoi ce guide ?</i>	7
<i>Pourquoi ce guide ?</i>	7
<i>1.0. Planification d'un projet de réutilisation des EUT</i>	8
1.1. Approche participative: base de planification d'un projet de réutilisation des EUE	8
1.2. Elaboration du projet.....	9
1.3. Etude d'impact sur l'environnement (EIE).....	10
1.3.1. Objectifs de l'EIE.....	10
1.3.2. Contenu type d'une étude d'impact d'un projet de traitement - réutilisation sur l'environnement	10
1.4. Choix de site de mise en place du périmètre de réutilisation	10
1.4.1. Topographie	10
1.4.2. Sols.....	10
1.4.3. Géologie et nature du sous – sol	20
1.4.4. Nappe souterraine	22
1.4.5. Climat.....	22
1.4.6. Occupation du sol.....	27
1.4.7. Récapitulatif sur le choix de site	28
<i>2.0. Choix des cultures</i>	30
2.1. Démarche et raisonnement de choix des cultures	30
2.1.1. Enquête agricole.....	30
2.1.2. Qualité des EUE.....	32
2.1.3. Système d'irrigation.....	35
2.1.4. Le sol et le niveau de la nappe	40
2.1.5. Récapitulatif	41
<i>3.0. Techniques de valorisation agronomique de l'eau et des éléments nutritifs</i>	44
3.1. Irrigation avec les EUE	44
3.1.1. Bases de calcul des besoins en eau des cultures.....	44
3.1.2. Analyse des options d'utilisation des eaux épurées : avec ou sans stockage	51
3.1.3. Autres considérations sur l'option de stockage.....	56
3.2. Valorisation des éléments nutritifs.....	59

3.2.1. Considérations générales.....	59
3.2.2. Calcul des quantités d'éléments nutritifs et bilan de masse	60
3.2.3. Estimation des excédents d'éléments nutritifs (autres méthodes).....	62
3.3. Optimisation de l'eau et des éléments nutritifs	63
4.0. Valorisation des boues	66
4.1. Composition typique des boues	66
4.2. Contraintes à gérer pour la valorisation des boues.....	67
4.2.1. Les éléments traces métalliques (ETM).....	67
4.2.2. Les pathogènes	69
4.2.3. Valeur fertilisante des boues	72
5.0. Evaluation des gains agronomiques de la réutilisation des EUT et de valorisation des boues.....	77
5.1. Bases de calcul des gains	77
5.2. Etude de cas réalisée pour la commune de Drarga (Soudi, 1999).....	77
6.0. Organisation et gestion d'un projet de réutilisation	80
6.1. Considérations générales.....	80
6.2. Mode de distribution de l'eau	80
6.3. Mode d'organisation des usagers des EUT	82
6.4. Ebauches d'une démarche institutionnelle pour les projets de traitement – réutilisation des eaux usées en agriculture.....	83
7. 0. Suivi, surveillance et contrôle	85
7.1. Points de contrôles	85
7.2. Paramètres et fréquence de suivi.....	85
7.3. Directives sanitaires et environnementales	87
7.4. Mesures d'accompagnement.....	88
7.4.1. Information, Education, Communication (IEC).....	88
7.4.2. Formation.....	88
7.5. Moyens humains et matériel	89
7.5.1. Moyens humains	89
7.5.2. Moyens matériels et financiers.....	89
Références et documents consultés	90
ANNEXES.....	93

Liste des Figures

Figure 1: Exemple d'une carte des sols élaborée pour le choix de site de réutilisation (étude de cas dans la commune de Sidi Bibi à Agadir)	11
Figure 2: Carte des sols dominants (rapportée par FAO, 2006).....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 4 : Zones agroécologiques du Maroc (rapportée par FAO 2006.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 5: Exemple de carte d'occupation du sol	28
Figure 6: Evapotranspiration (ETP), Pluies (P) et déficit climatique (P-ETP) à Casablanca.....	46
Figure 7 : Besoins en eau des cultures et surface irrigable.....	52
Figure 8 : Besoin en eau des cultures et provenance des eaux d'irrigation pour une superficie irriguée de 28,5 ha.	52
Figure 9 : Besoins en eau des cultures et eau en excès pour une superficie irriguée de 10,6 ha.	53
Figure 10 : Besoin en eau des cultures comparés à la production d'eau usée pour une superficie irrigable de 14 ha	54
Figure 11 : Illustration graphique de l'excès mensuel et cumulé des eaux épurées en fonction des mois de l'année.....	55
Figure 12 : Élimination des bactéries fécales par stockage des eaux usées épurées. (Source Trad, 2002)	57
Figure 13 : Coupe transversale d'un bassin de stockage trapézoïdal	57
Figure 14 : Variation du coût du bassin de stockage en fonction du volume.....	58
Figure 15 : Points de contrôle et de surveillance du système de réutilisation des EUE.....	85

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Modèle de matrice d'analyse des concernés	8
Tableau 2 : Correspondance de nomenclature des sols entre les systèmes de classification (Badraoui et Stitou, 2001)	12
Tableau 3: Zones agro – écologiques du Maroc.....	22
Tableau 4 : Appréciation globale et relative des priorités de réutilisation des eaux usées traitées dans les centres programmés par l'ONEP	24
Tableau 5 : Niveaux de paramètres de choix de site favorable à la réutilisation des eaux usées en agriculture .	29
Tableau 6 : Qualité de l'eau traitée et risque de colmatage physique et biologique du système d'irrigation localisée	33
Tableau 7 : Critères de réutilisation des EUE au Maroc	34
Tableau 8 : Facteurs affectant le choix de la méthode d'irrigation et les mesures spéciales exigées quand l'eau usée est utilisée, en particulier quand elle ne rencontre pas les directives de l'OMS (Adapté de Mara et Cairncross, 1989).....	36
Tableau 9 : Matrice de choix des cultures	42
Tableau 10 : Coefficient Kc pour les principales cultures au Maroc	47
Tableau 11 : Caractéristiques quantitatives des rejets	47
Tableau 12 : Production d'eau usée mensuelle	48
Tableau 13 : Besoins brut en eau des cultures (m ³ /ha).....	50
Tableau 14 : Production d'eau usée mensuelle et surface irrigable.....	51
Tableau 15 : Bilan en eau sans stockage pour une superficie irriguée de 10,6 ha tout au long de l'année	53
Tableau 16 : Composition des principaux types de boues (ADEME, 2001)	66
Tableau 17 : Exemple de composition des boues séchées et chaulées en Algérie (Dridi et Zerrouk, 2000).....	66
Tableau 18. Exemple de composition de boues en Tunisie (Gabteni et Gallali, 1988).....	66
Tableau 19 : Exemple de composition de boues issues d'une station d'épuration des eaux usées par lagunage au Sud du Maroc (Souidi et Jemali, 1998).....	67
Tableau 20 : Valeurs cumulatives limites pour les principaux métaux lourds applicables aux sols cultivés en fonction de la CEC*(d'après US. EPA, 1977).....	68
Tableau 21 : Teneurs limites cumulatives des principaux éléments traces dans les sols recevant les boues séchées et/ou compostées (propositions pour les pays du proche orient et d'Afrique du nord).....	69
Tableau 22 : Normes tunisiennes d'éléments traces métalliques.....	69
Tableau 23 : Agents pathogènes communément rencontrés dans les boues résiduelles et les maladies qui leur sont associées (Selon différentes sources citées par Hunt (1984).....	70
Tableau 24 : Durée de survie des pathogènes dans le sol et sur la plante (Doran et al. 1976).....	70

Tableau 25 : Seuils de référence pour les teneurs en micro-organismes dans les boues (Directives françaises selon l'arrêté du 8 janvier 1998 relatif aux épandages de boues sur les sols agricoles).....	71
Tableau 26 : Concentrations moyennes en éléments majeurs (N, P ₂ O ₅ et K ₂ O) dans les boues résiduaires (valeurs moyennes d'après plusieurs références).....	72
Tableau 27 : Taux de minéralisation de l'azote durant la première année d'épandage.....	72
Tableau 28 : Fraction estimée (en %) d'azote susceptible d'être disponible pour la culture après différents temps d'application et pour différents types de boues (Evanylo, 1999).	72
Tableau 29 : Principales actions du compost sur les paramètres de la qualité des sols	74
Tableau 30 : Doses d'application de boues permettant de satisfaire les besoins en azote et en phosphore pour quelques cultures (Di Pinto et Minnini, 1985).....	75
Tableau 31 : Coûts estimatifs de l'eau d'irrigation et de fertilisation de quelques cultures irriguées dans le périmètre de Souss Massa (D'après le Service de Production Végétale de l'ORMVA - SM).	77
Tableau 32 : Gain économique de l'irrigation avec les eaux usées épurées	78
Tableau 33 : Rendements actuels et escomptés pour les principales cultures à promouvoir dans le projet de réutilisation des eaux usées épurées	79
Tableau 34 : Nature des interventions des principales institutions concernées par la réutilisation des eaux usées en agriculture.....	84
Tableau 35 : Paramètres et fréquences de suivi et de contrôle du système de réutilisation	86
Tableau 36 : Mesures post-traitement et réduction des pathogènes.....	88

Liste des encadrés

Encadré 1 : Exemple de résultats de l'analyse des concernés pour le cas du projet assainissement -traitement -réutilisation des eaux usées de trois villages à Sidi Bibi (Soudi, 2004).....	8
Encadré 2 : Démarche globale de l'élaboration d'un projet de réutilisation (inspirée de Faby et Brissaud, 1997)	9
Encadré 3 : Texture, structure, profondeur du sol.....	13
Encadré 4 : Caractéristiques hydrauliques.....	15
Encadré 5 : Caractéristiques chimiques et physico-chimiques.....	19
Encadré 6 : Contenu et légende d'une carte d'occupation de sols	27
Encadré 7: Quelques illustrations de cas influençant le degré de réussite et d'acceptabilité de la réutilisation des EUT.....	31
Encadré 8 : Contenu de la grille d'enquête à effectuer avant le projet de REUE	32
Encadré 9 : Risques liés au Chlore et au Bore	33
Encadré 10 : Directives complémentaires de la matrice de choix des cultures.....	43
Encadré 11 : Formule de BLANEY-CRIDDLE	44
Encadré 12 : Formule de TURC	44
Encadré 13 : Formule de PENMAN	45
Encadré 14 : Illustration de la méthode de calcul des quantités d'éléments nutritifs mobilisables par les cultures	61
Encadré 15 : Méthode de bilan de masse pour l'estimation de la lixiviation des nitrates pour une culture donnée	62
Encadré 16 : Bilan global d'azote à l'échelle du périmètre de réutilisation	63
Encadré 17 : Fiche culturale du maïs (Zea mays L.)	63
Encadré 18 : Valeur fertilisante azotée (VFN) des boues résiduaires.....	73
Encadré 19 : Exemple de calcul de dose de boues pour une culture de maïs (exemple repris intégralement de Fiche technique 2.1., ADEME (2001))	75
Encadré 20 : Modes d'application des boues : avantages et inconvénients.....	76
Encadré 21 : Arrêtés et décrets en relation avec l'usage de l'eau conventionnelle et sa gestion en agriculture.	83

Liste des annexes

Annexe 1 Table des matières de l'étude d'impact des projets d'AEP, de traitement et de réutilisation des eaux usées traitées et des boues résiduaires à Sidi Taïbi (ONEP)	94
Annexe 2 Normes marocaines de qualité des eaux destinées à l'irrigation (BO du 5-12-2002).....	96
Annexe 3 Normes marocaine, tunisienne, syrienne et jordanienne pour la réutilisation des eaux usées (mg/l)...	98
Annexe 4 Données astronomiques : p, N et Ra	100

<i>Annexe 5: Evapotranspiration (ETP), pluie (P) et déficit climatique (P-ETP) mensuels sur 13 sites au Maroc (Adapté de FAO)102</i>	
<i>Annexe 6 : Coefficient Kc (tiré de Dorenbos et al.).</i>	<i>106</i>
<i>Annexe 7 Durée de la saison végétative et des phases de développement de cultures de plein champ et Coefficient cultural Kc pour les différentes phases de croissance.....</i>	<i>108</i>
<i>Annexe 8. Ordres de grandeur des doses d'engrais utilisées pour les principales cultures au Maroc.....</i>	<i>111</i>
<i>Annexe 9.Teneurs limites en éléments -traces métalliques dans les sols agricoles (mg/kg sol sec), selon les différents pays de l'Union Européenne (UE) et la Suisse. D'après, OTV (1997).....</i>	<i>112</i>

Pourquoi ce guide ?

Suite à la réalisation par l'ONEP des stations d'épuration, plusieurs demandes de réutilisation des eaux usées épurées (REUE) parviennent à l'Office de la part des agriculteurs qui utilisaient auparavant les eaux usées brutes et/ou des agriculteurs pour lesquels la pérennité des eaux usées épurées a suscité un nouveau intérêt.

Pour être conforme à la Loi sur l'Eau 10-95, l'ONEP, au même titre que les régies et les concessionnaires, est appelé à traiter les eaux jusqu'à un niveau tel que les compositions des effluents soient conformes aux normes de rejets. Cependant, selon la directive relative à la qualité des eaux destinées à l'irrigation qui définit, en trois niveaux de qualité des eaux les cultures à irriguer, la qualité des eaux épurées conforme à la norme de rejets ne permet pas une irrigation non restrictive.

Devant cette situation, et dans le but de promouvoir la réutilisation des eaux usées épurées (REUE), des traitements complémentaires peuvent être appliqués pour élargir la liste des cultures à promouvoir. Cela devrait rendre la REUE plus attractive et capable de générer des gains agronomiques significatifs en termes de rendements des cultures et de valeur marchande des produits agricoles tout en écartant les risques sanitaires.

Aussi, et afin de répondre aux demandes croissantes de la REUE à l'aval des stations d'épuration, les Directions Régionales de l'ONEP, ayant pour mandat de mettre en oeuvre des projets de réutilisation des eaux usées, ont un besoin pressant et effectif d'un support technique, sous - forme de guide, leur permettant de disposer des éléments de réponse avec la démarche à suivre pour mettre en place ces projets.

Ainsi, c'est dans le cadre de l'Assistance Technique de la FAO qu'il a été décidé de produire un guide technique et pratique traitant les différents volets de mise en place d'un projet de REUE depuis la planification du projet jusqu'à la gestion du périmètre de réutilisation.

Des propositions concernant l'usage rationnel des EUE et des boues sera également émis en tenant compte des spécificités agro-pédologiques, climatiques, socio-économiques et environnementales du contexte marocain.

Des éléments pratiques relatés dans des encadrés jouent le rôle de coffres à outils qui offrent à l'utilisateur de ce guide des enseignements précieux en matière de réutilisation des eaux usées et des boues.

1.0. Planification d'un projet de réutilisation des EUT

1.1. Approche participative: base de planification d'un projet de réutilisation des EUE

Une planification adéquate d'un projet de réutilisation des EUE est la base de sa pérennité. Pour cela, il est essentiel, au stade même de l'identification du site de traitement des eaux usées et de diagnostic des potentialités de réutilisation, d'impliquer la population, les usagers potentiels des EUE et tous les acteurs et partenaires concernés. Cette démarche, basée sur l'approche participative, commence par une première étape clé : l'analyse baptisée « analyse des concernés » dans la méthode de planification des projets par objectifs.

Cette analyse permettra de lister et regrouper en entités homogènes les différentes parties qui sont concernées par le projet et d'identifier les craintes et les attentes de chaque catégorie de concernés ainsi que leurs contributions à la réussite du projet. Ceci reviendrait à remplir le modèle de matrice présenté dans le **Tableau 1**. Cette analyse doit déboucher sur l'identification des principaux partenaires et leur regroupement en différentes catégories (bailleurs de fond, institutions d'appui, bénéficiaires ou groupe cible, etc.). Cette étape est réalisée avec la participation de tous les acteurs au niveau de la localité concernée par le projet dans le cadre d'un atelier. Celui-ci permettra d'éviter, à un moment opportun, des conflits, de recueillir des informations supplémentaires, de faire émerger de nouvelles solutions au problème et d'accroître la confiance du public et l'engagement communautaire.

Tableau 1 : Modèle de matrice d'analyse des concernés

Concernés	Attentes	Craintes	Contributions potentielles
Commune			
Association			
Département de l'environnement			
...			

Un exemple de résultats de cette analyse effectuée dans le cadre du projet USAID-WPM à Sidi Bibi est rapporté dans l'**Encadré 1**.

Encadré 1 : Exemple de résultats de l'analyse des concernés pour le cas du projet assainissement - traitement - réutilisation des eaux usées de trois villages à Sidi Bibi (Soudi, 2004)

A. Concernés

Groupe cible

- Associations
- Population
- Agriculteurs
- Coopérative agricole

Institutions

- Agence de bassin hydraulique
- Communes de Sidi Bibi et d'Aït Aâmira
- Gestionnaires de terres collectives
- Ministère la santé
- ONEP
- ORMVA – SM
- Province de Chtouka Aït Baha
- Secrétariat d'Etat chargé de l'environnement

Encadré 1 (suite)

B. Attentes :

Les attentes ont été scindées en trois catégories :

- Catégorie 1. Attentes en matière de protection de l'environnement et des ressources en eau souterraines.
- Catégorie 2. Attentes de protection de la santé de la population.
- Catégorie 3. Attentes en matière de gain économique : ressource en eau additionnelle et éléments fertilisants.

C. Craintes

Trois catégories de craintes ont été identifiées :

- Catégorie 1. La multiplicité des intervenants.
- Catégorie 2. L'implication de deux communes.
- Catégorie 3. Le souci de durabilité du projet en relation avec les aspects techniques, institutionnels et financiers.

1.2. Elaboration du projet

Après la validation de la pertinence du projet, on procède à son élaboration en adoptant une démarche qui se décline en trois étapes succinctement décrites dans l'**Encadré 2**.

Encadré 2 : Démarche globale de l'élaboration d'un projet de réutilisation (inspirée de Faby et Brissaud, 1997)

Etape 1. Etude d'opportunité

Cette étape qui devra être réalisée dans le cadre d'un diagnostic préalable à l'analyse des concernés exposée plus haut. Il s'agit d'une étape légère mais essentielle. Elle se base sur des données immédiatement disponibles pour examiner les possibilités et les chances d'aboutissement du projet. Elle présente l'avantage de permettre au maître d'œuvre de décider sur l'opportunité d'engager des dépenses pour la réalisation d'une étude plus importante ;

Etape 2. Etude de pré faisabilité

Elle consiste à approfondir le diagnostic et à formuler de manière claire et précise des scénarii (dont certains peuvent être déjà émis par l'étude d'opportunité). Durant cette étape, les différents scénarii et options sont comparés au moyen d'une analyse économique. Une sélection restreinte des scénarii résulte de cette première étape.

Etape 3. Etude de faisabilité détaillée

L'étude de faisabilité détaillée reprend la trame de l'étape précédente, en approfondissant les rubriques insuffisamment analysées, et aboutit au choix des scénarii d'assainissement – traitement - réutilisation. L'étude se termine par une analyse financière et l'élaboration des plans d'exécution ou de mise en œuvre du projet.

1.3. Etude d'impact sur l'environnement (EIE)

1.3.1. Objectifs de l'EIE

Cette étude ne se réalise pas uniquement pour les projets de réutilisation mais concerne toutes les composantes d'un projet intégré de collecte – traitement et réutilisation. Si l'analyse coûts avantages démontre la faisabilité du projet, il s'impose d'évaluer de manière détaillée les impacts négatifs sur le milieu physique, biologique et humain et de proposer les mesures de leur atténuation et/ou leur compensation. Par la même occasion, cette étude permet de définir les mesures de renforcement et/ou de pérennisation des impacts positifs.

Sur le plan réglementaire, le Dahir n° 1-03-60 du 10 rabii I 1424 (12 mai 2003) a porté promulgation de la loi n° 12 -03 relative aux études d'impact sur l'environnement.

1.3.2. Contenu type d'une étude d'impact d'un projet de traitement - réutilisation sur l'environnement

Sur base d'une grille - guide élaboré par le département de l'Environnement, on se propose de rapporter en **Annexe 1** le contenu type d'une étude d'impact d'un projet intégré d'AEP, d'assainissement, de traitement et de réutilisation des eaux usées sur l'environnement qui a été déjà adaptée pour la commune de sidi Taïbi (informations communiquées par l'ONEP).

1.4. Choix de site de mise en place du périmètre de réutilisation

Le choix d'un site adéquat pour la mise en place du périmètre de réutilisation des EUE revêt une importance capitale et influence de manière importante la planification, le dimensionnement et la gestion de l'ensemble du système. On se propose de traiter ici les caractéristiques importantes à considérer pour l'évaluation du site de réutilisation.

1.4.1. Topographie

Les paramètres de relief et de topographie sont importants et sont en relation directe avec la susceptibilité à l'inondation et/ou à l'engorgement des sols. La carte des pentes peut être établie à partir des cartes topographiques disponibles au Maroc à l'échelle 1/50 000. La topographie des terrains situés à l'amont du périmètre de réutilisation est à considérer aussi pour évaluer les risques de ruissellement ou de drainage latéral vers le site de réutilisation.

Les pentes excessives sont généralement défavorables pour la mise en place d'un périmètre de réutilisation. Le maximum recommandé pour une réutilisation en agriculture est de 15%.

Le paramètre « Topographie ou relief » influence aussi le coût de pompage et de distribution de l'eau.

1.4.2. Sols

1.4.2.1. Identification et cartographie des sols

Les sols doivent être identifiés et caractérisés et de préférence une carte des sols doit être établie à une échelle d'au moins 1:20 000. Cette carte doit obligatoirement mentionner la répartition spatiale des sols et de leur texture.

Un exemple de carte des sols réalisée dans le cadre de l'étude de faisabilité du projet de réutilisation des eaux usées de la commune de Sidi Bibi (Agadir) est illustré par la **Figure 1**.

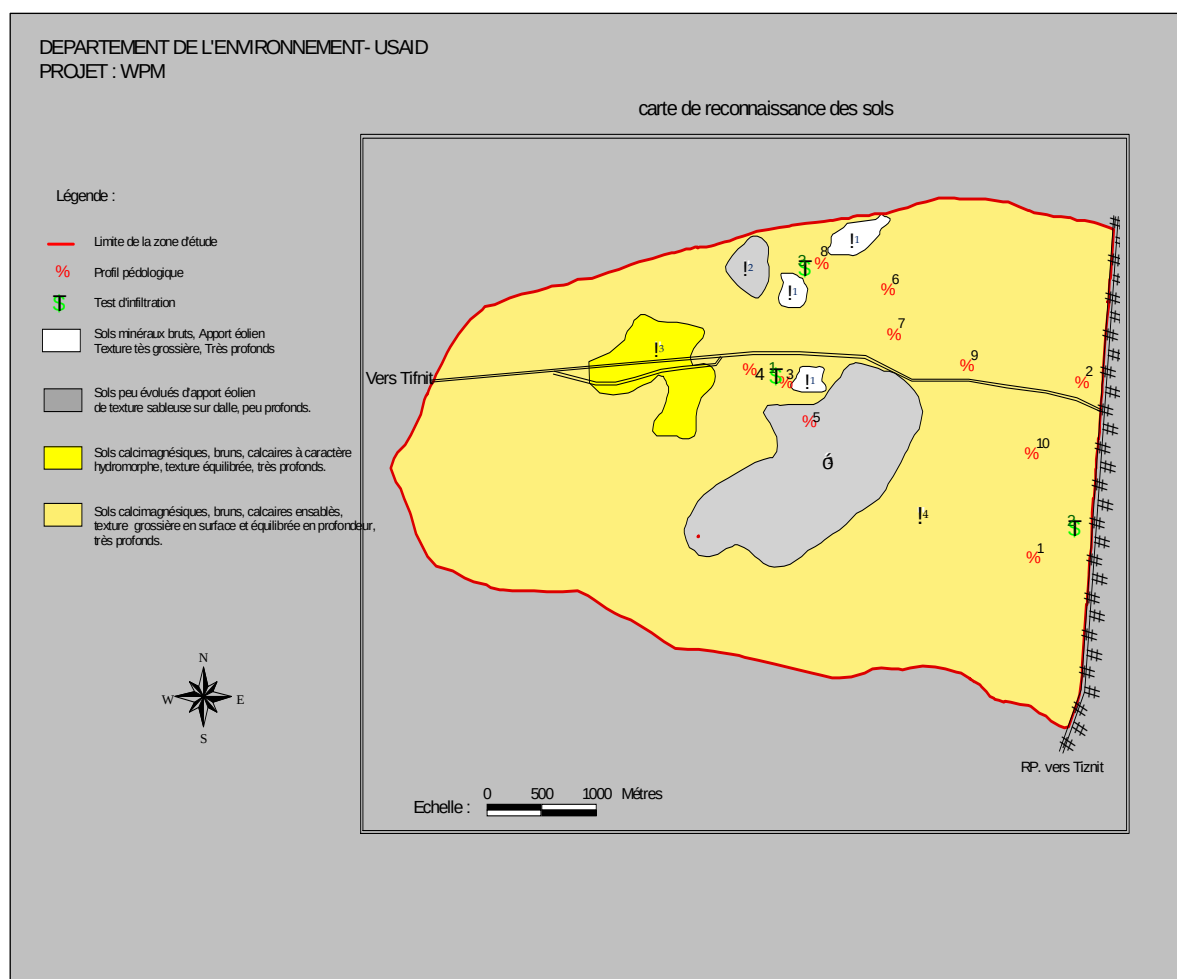


Figure 1: Exemple d'une carte des sols élaborée pour le choix de site de réutilisation (étude de cas dans la commune de Sidi Bibi à Agadir)

La correspondance de la nomenclature des sols entre les différents systèmes de classification est rapportée dans le **Tableau 2**.

Tableau 2 : Correspondance de nomenclature des sols entre les systèmes de classification (Badraoui et Stitou, 2001)

Classification française (CPCS, 1967)	Taxonomie américaine (Soil taxonomy)	Légende FAO (1989)
Sols minéraux bruts	Entisols	Fluvisols, Regosols, Lithosols
Sols peu évolués d'érosion	Entisols, Aridisols	Regosols, Lithosols, Rankers, Yermosols
Sols peu évolués d'apport	Inceptisols, Mollisols, Aridisols	Fluvisols, Rankers, Greyzems
Sols calcimagnésiques	Inceptisols, Mollisols, Aridisols	Rendzinas, Yermosols, Xerosols
Sols isohumiques	Inceptisols, Mollisols	Xerosols, Kastanozems, Chernozems, Phaeozems
Vertisols	Vertisols	Vertisols
Sols brunifiés	Inceptisols, Alfisols	Cambisols, Luvisols
Sols sodiques	Sols avec une phase salée	Solontchaks, Solonetz
Sols hydromorphes	Sols avec un égimehydrique saturé	Gleysols, Planosols

1.4.2.2. Caractéristiques du sol

Les principales caractéristiques physiques en relation avec la réutilisation des eaux usées épurées sont les suivantes :

- Les caractéristiques physiques (texture, structure et profondeur du sol)
- Les caractéristiques hydrauliques du sol
- Les caractéristiques chimiques et physico-chimiques du sol

1.4.2.2.1. Caractéristiques physiques

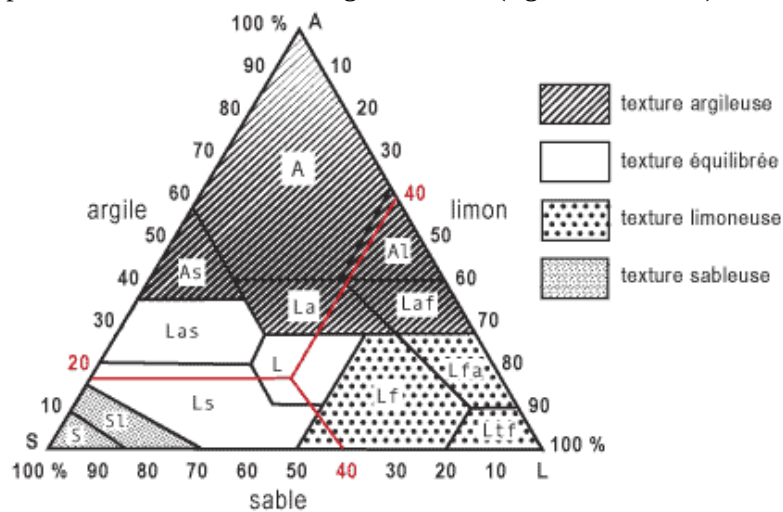
Les principales caractéristiques physiques à considérer dans la caractérisation des sols du périmètre de réutilisation sont : la texture, la structure et la profondeur du sol (**Encadré 3**) et les caractéristiques hydrauliques représentées essentiellement par le taux d'infiltration et la perméabilité verticale ou conductivité hydraulique (**Encadré 4**).

Encadré 3 : Texture, structure, profondeur du sol

a. Texture du sol

La texture du sol est sa composition centésimale en sable, limon et argile. Les tailles de ces particules élémentaires du sol sont : Argile : < 0.002 mm ; Limon : 0.002 – 0.05 mm ; sable : 0.05 – 2 mm. L'importance de ce paramètre réside dans le fait qu'il conditionne l'infiltration de l'eau dans le sol et la rétention de l'eau par le sol. Ces éléments sont importants dans la détermination de la réserve en eau du sol, pour le choix du système d'irrigation et pour le pilotage de l'irrigation.

La texture est déterminée au laboratoire par l'analyse granulométrique. Lorsque les proportions d'argile, de limon et de sable sont déterminées, la classe texturale du sol se détermine par report des valeurs dans le triangle texturale (figure ci-dessous).



Classes texturales	
A : argileux	L : limoneux
As : argilo-sableux	Ls : limono-sableux
Al : argilo-limoneux	Lfa : limoneux fins argileux
La : limono-argileux	Lf : limoneux fins
Laf : limono-argileux fins	Ltf : limoneux très fins
Las : Limono-argileux sableux	Sl : sablo-limoneux
	S : sableux

La texture équilibrée est la plus favorable à la réutilisation des eaux usées épurées.

b. Structure du sol

La structure du sol est définie par le mode d'agencement spatial des particules du sol. Un sol de bonne structure est aéré et permet une circulation normale de l'eau et des racines des cultures. Ce paramètre est déterminé par la méthode d'évaluation de la stabilité des agrégats ou par une appréciation qualitative sur le terrain.

c. Profondeur du sol

La profondeur du sol est importante pour la rétention des composants des eaux usées par la masse des particules du sol. En effet, il a été démontré que la rétention du phosphore par exemple est conditionnée par le temps de rétention des eaux usées dans le sol et par la durée de contact avec les colloïdes minéraux et organiques du sol. Un sol profond permet un

développement racinaire important et donc une valorisation maximale de l'eau épurée et des éléments nutritifs.
La profondeur optimale pour l'irrigation avec les eaux usées épurées est comprise entre 50 et 100 cm.

Encadré 4 : Caractéristiques hydrauliques

a. Vitesse d'infiltration

La vitesse d'infiltration (également appelé taux d'infiltration) est liée à la conductivité hydraulique par la relation (loi de Darcy) :

$$V = K.I$$

Avec

V = Vitesse d'infiltration (cm/h)

K = conductivité hydraulique (cm/h)

I = gradient hydraulique (m/m)

La conductivité hydraulique, parfois appelée perméabilité, caractérise la vitesse avec laquelle l'eau circule dans le sol quelque soit le sens de l'écoulement (horizontal ou vertical) et dépend des conditions auxquelles le sol est soumis. Par contre la vitesse d'infiltration cherche à définir la vitesse avec laquelle l'eau quitte la surface libre du sol pour rejoindre la nappe. La mesure de terrain (méthode du double anneau ou du trou) définit directement la vitesse d'infiltration et non la conductivité hydraulique.

b. Normes marocaines d'interprétation (Administration de génie rural)

Les valeurs de la vitesse d'infiltration sont comparées aux normes rapportées dans le tableau suivant :

Symbole	Appellation	V en cm/h
V1	Très élevée	> 20
V2	Elevée	10 à 20
V3	Moyenne	2 à 10
V4	Faible	0.5 à 2
V5	Très faible	< 0.5

c. Relation entre texture du sol et sa vitesse d'infiltration.

Corrélation entre la texture du matériau sol et sa vitesse d'infiltration.

Texture du sol	Vitesse d'infiltration (m/s)	Vitesse d'application maximum (cm/h)
Sable moyen	4.10^{-4} à 1.10^{-4}	147,6
Sable fin	1.10^{-4} à 8.10^{-5}	39,6
Sable limoneux	7.10^{-5} à 3.10^{-5}	25,6
Limon sableux	3.10^{-5} à 1.10^{-5}	11,2
Limon argileux	1.10^{-5} à 7.10^{-6}	4,0
Argile sablonneuse ³	9.10^{-6} à 7.10^{-6}	3,3
Argile limoneuse	7.10^{-6} à 4.10^{-6}	2,6
Argile, marne	$< 4.10^{-6}$	Non souhaitable

d. Mesure de la vitesse d'infiltration :

La vitesse d'infiltration peut être déterminée par la méthode du double anneau de Munts ou par la méthode de Porchet. Dans le domaine agricole, la méthode du double anneau est largement utilisée. Elle demande peu de matériel et permet, par une formulation adéquate, de définir la vitesse d'infiltration. C'est de la valeur de cette vitesse que l'on déduit la valeur du coefficient de perméabilité en utilisant la loi de Darcy.

d.1. Méthode du double anneau de Munts



Photo : Xanthoulis D.

L'appareil est composé de deux anneaux (diamètres 30 et 50 cm sur la photo) enfoncés dans le sol de quelques centimètres (15 cm sur la photo) et rempli d'eau. Le principe est de suivre l'évolution du niveau d'eau en fonction du temps dans l'anneau interne pour connaître la vitesse d'infiltration sur chaque pas de temps. Notons que durant toute la mesure on doit veiller à ce que les niveaux d'eau dans les deux anneaux restent les mêmes (au besoin, on modifie celui de l'anneau externe). On peut alors supposer que sous l'anneau interne l'infiltration est verticale. Au bout d'un certain temps un régime permanent s'installe et la vitesse d'infiltration devient constante.

$$V = \Delta h \cdot 60 / \Delta t$$

V = vitesse d'infiltration verticale en cm/h

Δt = temps de mesure (en minutes)

Δh = variation de hauteur d'eau (en cm)

d.2. Méthode du double anneau de Porchet

Parce qu'elle demande peu de moyens, la méthode de mesure de la vitesse d'infiltration in situ par la méthode Porchet est recommandée. Celle-ci doit être réalisée selon un protocole expérimental défini afin de fournir une valeur de vitesse d'infiltration la plus proche des conditions réelles de fonctionnement.

Les étapes suivantes décrivent la procédure d'un test standard :

1. creuser un trou de 15 cm de Ø à la profondeur proposée pour le fond de la tranchée (généralement 0,8 m) le trou doit être cylindrique sur une hauteur minimum de 30 cm, dans la zone racinaire ;
2. Griffer les parois et le fond du trou afin de retrouver la texture naturelle du sol.
3. enlever toute la terre excédentaire ;
4. placer au fond du trou une couche de 5 cm de gravier fin (Ø de 1,2 à 1,8 cm) ;
5. remplir le trou avec de l'eau claire sur une hauteur minimum de 30 cm ;
6. laisser le sol se pré-saturer pendant au moins 4 h mais de préférence pendant une nuit. L'eau doit être claire, exempte de produits organiques ou de fortes teneurs en sodium ;
7. effectuer la mesure :
 - a. si l'eau demeure dans le trou après la période de pré-saturation. On ajuste la profondeur de l'eau à 15 cm. On mesure ensuite la baisse du niveau d'eau toutes les 30 minutes. Continuer l'essai jusqu'à ce que la dernière lecture soit identique à la précédente ou alors après 4 heures ;
 - b. s'il ne reste plus d'eau dans le trou après la période de pré-saturation. On ajoute 15 cm d'eau dans le trou. On mesure ensuite la baisse du niveau d'eau par intervalle de 30 minutes, et on ajuste la hauteur d'eau à 15 cm en apportant l'eau manquante. Continuer l'essai jusqu'à ce que la dernière lecture soit identique à la précédente ou alors après 4 heures ;
 - c. si les 15 cm d'eau apportés ont disparu avant que le délai de 30 minutes ne se soit écoulé, dans ce cas, l'intervalle de temps entre les mesures doit être de dix minutes.
8. calculs:

$$\text{Vitesse d'infiltration (cm / min)} = \frac{\text{Abaissement du niveau d'eau (cm)}}{\text{Temps (min)}}$$

9. au moins trois essais de percolation doivent être réalisés.

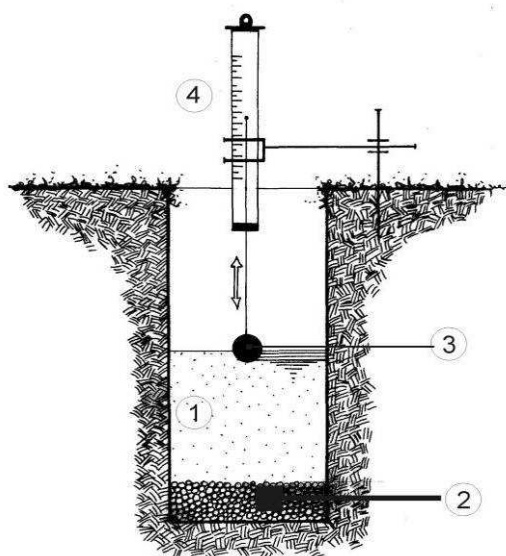


Schéma du système de mesure à niveau variable

Légende

1. eau de ville utilisée pour le test (niveau variable)
2. gravier de protection
3. flotteur
4. système de mesure du niveau du flotteur



***Prise de mesure de la vitesse d'infiltration par la méthode à niveau variable.
(Photo Epuvaleur asbl)***

Source : Grela et *al.*, 2004

Une bonne conductivité hydraulique doit être supérieure à 5 cm/heure.

Remarque générale : la plupart des sols marocains ne posent pas de contrainte d'infiltration.

1.4.2.2.2. Caractéristiques chimiques et physico-chimiques

Les principaux paramètres chimiques et physicochimiques du sol à considérer pour l'évaluation du site de réutilisation sont succinctement définis et expliqués dans l'**Encadré 5**.

Encadré 5 : Caractéristiques chimiques et physico-chimiques

pH

Le pH du sol influence la biodisponibilité des éléments nutritifs, la volatilisation de l'ammonium et la solubilité des éléments traces métalliques. La fourchette des pH des sols marocains est comprise, dans la majorité des cas entre 6.5 et 8.5. De ce fait, ce paramètre présente rarement des contraintes.

Conductivité électrique de l'extrait de pâte saturé (CEps)

Ce paramètre renseigne sur la salinité globale d'un sol. Lorsque les sels s'accumulent dans la zone racinaire, la croissance et le développement des plantes cultivées sont entravés et leurs rendements diminuent. Les effluents secondaires peuvent être assez riches en sels. La pratique courante permettant d'éviter l'accumulation des sels dans les sols est le lessivage par application d'une fraction supplémentaire d'eau d'irrigation. L'estimation de la fraction de lessivage se fait en appliquant la formule de « lavage requis » ou « Leaching Requirement » qui s'écrit :

$$LR = \frac{EC_e}{5.(CE_e - CE_w)}$$

Où :

- LR: fraction supplémentaire d'eau d'irrigation pour l'élimination des sels de la zone racinaire ou Lavage Requis
- CE_w : conductivité électrique de l'eau d'irrigation
- CE_e : conductivité électrique du sol moyenne tolérée par la culture (Ce de l'extrait de pâte saturée)

La capacité d'Echange Cationique (CEC)

La CEC est un paramètre physico - chimique qui exprime la capacité du sol à retenir les cations par les charges négatives des colloïdes argileux et humiques (Complexe argilo -humique). Un sol à CEC élevée est un sol capable de retenir des cations et éviter ainsi leur perte par lixiviation. En général les sols argileux et riches en matière organique ont une CEC élevée. Les sols sableux ont une faible CEC.

Pourcentage de sodium échangeable (ou *Exchange Sodium Percentage (ESP)*)

Le paramètre ESP est donné par la relation :

$$ESP = \frac{Na^+ \text{échangeable}}{CEC}$$

Le sodium échangeable est le sodium qui se trouve adsorbé sur le complexe argilo – humique du sol. Si ce paramètre dépasse 15%, le sol devient sodique et voit sa structure et sa perméabilité se détériorer. C'est pour cela que l'irrigation avec des eaux riches en sodium favorise le phénomène de sodification. C'est pour cela aussi qu'on détermine dans l'eau épurée le paramètre SAR (taux d'adsorption de sodium ou *Sodium Adsorption Ratio*) qui permet d'évaluer le risque de sodification du sol si on irrigue le sol avec une eau traitée de SAR donnée. Le paramètre SAR est calculé comme suit :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt[2]{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}}$$

Le sodium, le calcium et le magnésium sont déterminés dans l'eau usée traitée. Il existe des relations empiriques qui mettent en relation les paramètres ESP et le SAR.

Autres caractéristiques

Il est aussi recommandé de procéder à la détermination de la matière organique et des éléments nutritifs (Phosphore, azote et potassium) contenus dans le sol avant application des EUT

1.4.3. Géologie et nature du sous – sol

La nature géologique du sous-sol est un aspect important par ses inter-relations avec les ressources en eau souterraines et avec la dynamique et la vulnérabilité de l'aquifère. Généralement, ces données sont disponibles au niveau des agences de bassins. Il est recommandé de présenter les coupes lithologiques indiquant l'épaisseur et la superposition des différents matériaux du sol et du sous-sol. Ces données sont également essentielles du fait

qu'elles permettent d'évaluer le risque de transfert de solutés vers la nappe. La **Figure 3** montre un exemple de coupe lithologique de la région de Sidi Bibi à Agadir (rapporté par Souidi,2003).

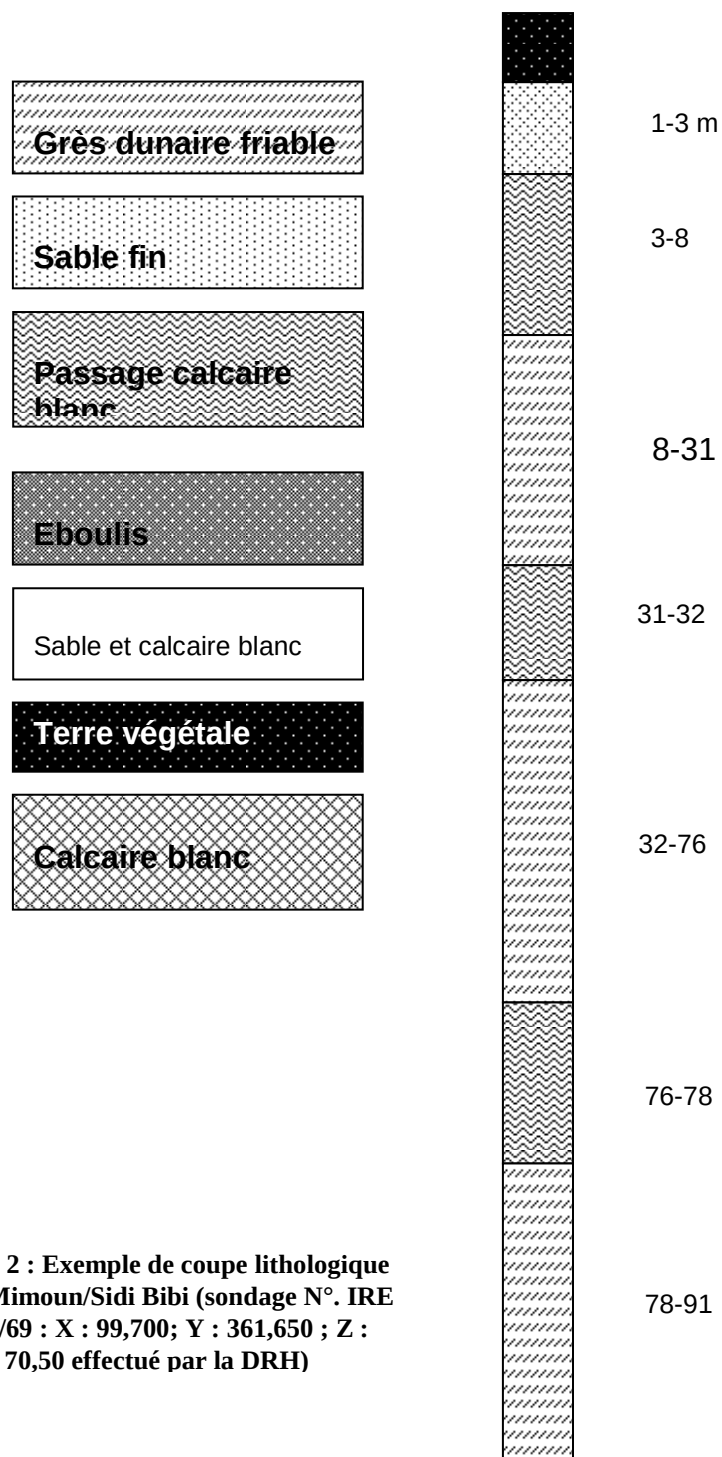


Figure 2 : Exemple de coupe lithologique d'Ait Mimoun/Sidi Bibi (sondage N°. IRE 1225/69 : X : 99,700; Y : 361,650 ; Z : 70,50 effectué par la DRH)

1.4.4. Nappe souterraine

La nappe intervient dans l'évaluation du site par deux aspects importants : sa qualité et sa profondeur. En ce qui concerne la profondeur, la nappe doit dépasser une profondeur minimale de 2 mètres au-delà de la zone racinaire. Dans le cas du risque de remontée de la nappe, la mise en place d'un réseau de drainage est nécessaire.

En ce qui concerne la qualité, il est important que l'irrigation avec les eaux usées épurées n'induisse pas la détérioration de sa qualité. Ainsi, il est important de caractériser la qualité actuelle de l'eau de la nappe pour avoir une situation initiale de référence et éviter de lui envoyer des excédents d'éléments nutritifs comme l'azote nitrique.

1.4.5. Climat

Pour la gestion du périmètre de réutilisation des eaux usées, les données climatiques sont importantes à considérer. Elles conditionnent, comme nous allons le voir, un ensemble de paramètres de l'étude :

- Le déficit ou la demande climatique (évaporation – précipitations)
- Les besoins en eau des cultures à promouvoir dans le périmètre de réutilisation.
- La vitesse et la direction des vents
- Les paramètres (température, ensoleillement)

Pour avoir une idée des aptitudes des différentes régions du Maroc en termes de production végétale, on peut se référer aux six régions agro - écologiques définies sur la base du climat, de la topographie, des caractéristiques des ressources naturelles et des systèmes de production (Tableau 3).

Tableau 3: Zones agro – écologiques du Maroc

Zones	Précipitations (mm)	Moyenne normale des précipitations (mm)	Terres arables ('000ha)	Proportion de terres arables
	mm	mm	'000 ha	Pour cent
Favorable	> 400	565	2 610	30
Intermédiaire	300-400	347	2 088	24
Défavorable sud	200-300	320	1 044	12
Défavorable oriental	200-300	248	1 044	12
Montagne	400-1 000	510	1 305	15
Saharienne	< 150	113	609	7

Ces données agro - écologiques nous donnent déjà une idée sur les zones à grand potentiel de réutilisation des EUE qui représentent d'après le **Tableau 3** près de 50% des terres arables. Soulignons aussi que les possibilités d'irrigation avec les eaux conventionnelles, de surface et souterraines, conditionnent les potentialités et la rentabilité des projets de réutilisation. Dans ce qui suit (**Tableau 4**), on se propose de classer de 1 à 5 les niveaux de priorités de réutilisation des eaux usées épurées dans les centres où l'ONEP réalise et/ou projette des installations de stations d'épuration avec une éventuelle réutilisation des eaux usées épurées. Pour ce classement, deux critères majeurs sont retenus : le déficit climatique et le niveau de disponibilité des eaux conventionnelles. Le déficit climatique est noté de + 1 (le plus faible déficit) à + 5 (le déficit le plus élevé) et le niveau de disponibilité en eau conventionnelle est notée de – 5 (le niveau de disponibilité le plus élevé) à – 1 (le niveau de disponibilité le plus faible).

Il est clair qu'il s'agit ici d'une appréciation globale et approximative. Une étude plus détaillée basée sur l'outil de cartographie numérique (SIG) mérite d'être réalisée. Cette étude couplée à une analyse coûts – avantages des différents scénarii de réutilisation, permettra d'évaluer la rentabilité économique de la réutilisation en fonction du contexte climatique et la disponibilité des eaux conventionnelles. Ceci reviendra à superposer les zones de réutilisation potentielle à la carte des centres qui seront assainis dans le cadre du PNA en vue de dégager une typologie des zones selon l'opportunité de réutilisation. Les principaux critères à considérer sont : le climat (précipitations et évaporation), la disponibilité des eaux barrage et le prix du mètre cube, la disponibilité des eaux souterraines et le prix du mètre cube selon la piézométrie et le mode de pompage, le niveau de traitement des eaux usées qui détermine le type des cultures à promouvoir et donc la valeur du gain agronomique, la vulnérabilité des eaux souterraines etc.

Tableau 4 : Appréciation globale et relative des priorités de réutilisation des eaux usées traitées dans les centres programmés par l'ONEP

Région	Province	Villes	Déficit climatique	disponibilité des eaux conventionnelles	Total	Classement
Gharb-Chrarda-Hcine	SIDI KACEM	SIDI KACEM	3	- 3	0	5
Région de l'oriental	TAOURIRT	TAOURIRT	5	- 1	+ 4	1
Chaouia -Ouardigha	SETTAT	BERRECHID	5	- 2	+ 3	2
Souss-Massa-Draa	OUARZAZATE	OUARZAZATE	5	- 3	+ 2	3
Souss-Massa-Draa	TAROUDANTE	OULAD TEIMA	5	- 3	+ 2	3
Taza-Al Hoceima-Taounate	TAZA	TAHLA	4	- 4	0	5
Tadla-Azilal	AZILAL	AZILAL	4	- 3	+ 1	4
Fes Boulemane	BOULEMANE	OUTAT EL HAJ	5	- 2	+ 3	2
Souss-Massa-Draa	OUARZAZATE	KALAAT M'GOUNA	5	- 2	+ 3	2
Marrakech-Tensift	CHICHAOUA	SID L'MOKHTAR	5	- 1	+ 4	1
Laayoune-Boujdour-S El Hamra	LAAYOUNE	LAAYOUNE	5	- 1	+ 4	1
Chaouia -Ouardigha	KHOURIBGA	OUAD ZEM	5	- 1	+ 4	1
Rabat-Salé-Zaer-Zemmour	KHEMISSET	TIFLET	3	- 2	+ 1	4
Chaouia -Ouardigha	KHOURIBGA	BEJAAD	5	- 1	+ 4	1
Taza-Al Hoceima-Taounate	TAOUNATE	TAOUNATE	3	- 3	0	5
Meknes-Tafilalt	ERRACHIDIA	ERRICH	4	- 2	+ 2	3
Taza-Al Hoceima-Taounate	TAOUNATE	KARIA BA MOHAMED	3	- 3	0	5
Guelmim Smara	TATA	TATA	5	- 1	+ 4	1
Marrakech-Tensift	EL KALAA	LA ATTAOUIA	5	- 2	+ 3	2
Tadla-Azilal	AZILAL	AFOURAR	4	- 3	+ 1	4
Taza-Al Hoceima-Taounate	AL HOCEIMA	TARGUIST	3	- 1	+ 2	3
Souss-Massa-Draa	TAROUDANTE	OULAD BERHIL	5	- 1	+ 4	1
Souss-Massa-Draa	OUARZAZATE	BOUMALNE DADES	5	- 2	+ 3	2
Guelmim Smara	GUELMIM	BOUIZAKARNE	5	- 2	+ 3	2
Marrakech-Tensift-El Haouz	CHICHAOUA	CHICHAOUA	5	- 1	+ 4	1
Souss-Massa-Draa	TAROUDANTE	SEBT EL GUERDANE	5	- 1	+ 4	1
Taza-Al Hoceima-Taounate	TAZA	OUAD AMLIL	4	- 1	+ 3	2
Rabat-Salé-Zaer-Zemmour	KHEMISSET	S. ALLAL EL BAHRAOUI	3	- 3	0	5
Souss-Massa-Draa	CHTOUKA AIT BAHA	AIT BAHA	5	- 2	+ 3	2
Marrakech-Tensift-El Haouz	ESSAOUIRA	TALMEST	4	- 2	+ 2	3

Marrakech-Tensift-El Haouz	EL KALAA	SKHOUR RHAMNA	5	- 1	+ 4	1
Tanger-Tetouane	TANGER	DAR CHAOUI	3	- 2	+ 1	4
Chaouia -Ouardigha	KHOURIBGA	KHOURIBGA	5	- 1	+ 4	1
Région de l'oriental	BERKANE	BERKANE+S.SLIMANE CH.+BOUHDILA	4	- 3	+ 1	4
Meknes-Tafilalt	KHENIFRA	KHENIFRA +AMALOU	4	- 2	+ 2	3
Gharb-Chrarda-Hcine	KENITRA	SIDI SLIMANE	4	- 3	+ 1	4
Meknes-Tafilalt	ERRACHIDIA	ERRACHIDIA	5	- 2	+ 3	2
Marrakech-Tensift	ESSAOUIRA	ESSAOUIRA	4	- 2	+ 2	3
Souss-Massa-Draa	TIZNIT	TIZNIT	5	- 1	+ 4	1
Chaouia -Ouardigha	BEN SLIMANE	BEN SLIMANE	4	- 3	+ 1	4
Meknes-Tafilalt	IFRANE	AZROU	3	- 2	+ 1	4
Oued Eddahab-Laguouira	OUAD EDDAHAB	DAKHLA	5	- 1	+ 4	1
Région de l'oriental	NADOR	EL AAROU	4	- 3	+ 1	4
Guelmim Smara	ESSEMARA	ESSEMARA	5	- 1	+ 4	1
Meknes-Tafilalt	KHENIFRA	M'RIRT	5	- 1	+ 4	1
Région de l'oriental	NADOR	ZAIO	4	- 2	+ 2	3
Chaouia -Ouardigha	BEN SLIMANE	BOUZNKA	4	- 3	+ 1	4
Meknes-Tafilalt	ERRACHIDIA	Mly ALI CHERIF(Rissani)	5	- 1	+ 4	1
Région de l'oriental	FIGUIG	BOUARFA	5	- 1	+ 4	1
Chaouia -Ouardigha	SETTAT	BEN AHMED	4	- 1	+ 3	2
Meknes-Tafilalt	EL HAJEB	AIN TAOUJDATE	4	- 2	+ 2	3
Souss-Massa-Draa	CHTOUKA AIT BAH	BIOUGRA	5	- 2	+ 3	2
Chaouia -Ouardigha	SETTAT	EL GARA	4	- 1	+ 3	2
Gharb-Chrarda-Hcine	SIDI KACEM	DAR GUEDDARI	4	- 3	+ 1	4
Laayoune-Boujdour-S El Hamra	LAAYOUNE	TARFAYA	5	- 1	+ 4	1
Région de l'oriental	BERKANE	TAFOGHALT	4	- 1	+ 3	2
Doukkala-Abda	SAFI	YOUSOUFIA	4	- 1	+ 3	2
Souss-Massa-Draa	TAROUDANTE	TAROUDANTE	5	- 1	+ 4	1
Région de l'oriental	JRADA	JRADA	5	- 1	+ 4	1
Taza-Al Hoceima-Taounate	AL HOCEIMA	AL HOCEIMA	3	- 2	+ 1	4
Marrakech-Tensift-El Haouz	EL KALAA	KELAAT SRAGHNA	5	- 2	+ 3	2
Gharb-Chrarda-Hcine	SIDI KACEM	OUZZANE	3	- 2	+ 1	4
Marrakech-Tensift-El Haouz	EL KALAA	BEN GUERIR	5	- 1	+ 4	1

Taza-Al Hoceima-Taounate	TAZA	GUERCIF	5	- 2	+ 3	2
Guelmim Smara	TANTAN	TAN TAN	5	- 1	+ 4	1
Meknes-Tafilalt	KHENIFRA	MIDELT	5	- 2	+ 3	2
Gharb-Chrarda-Hcine	KENITRA	SOUK EL ARBAA	4	- 3	+ 1	4
Gharb-Chrarda-Hcine	KENITRA	S. YAHYA EL GHARB	4	- 3	+ 1	4
Souss-Massa-Draa	OUARZAZATE	TINGHIR	5	- 1	+ 4	1
Région de l'oriental	TAOURIRT	EL AIOUN S.MELLOUK	5	- 1	+ 4	1
Tanger-Tetouane	CHEFCHAOUEN	CHEFCHAOUEN	3	- 1	+ 2	3
Taza-Al Hoceima-Taounate	AL HOCEIMA	IMZOUREN	3	- 2	+ 1	4
Souss-Massa-Draa	ZAGORA	ZAGORA	5	- 2	+ 3	2
Meknes-Tafilalt	EL HAJEB	EL HAJEB	4	- 2	+ 2	3
Meknes-Tafilalt	ERRACHIDIA	ARFOUD	5	- 2	+ 3	2
Laayoune-Boujdour-S El Hamra	BOUJDOUR	BOUJDOUR	5	- 1	+ 4	1
Fes Boulemane	BOULEMANE	MISSOUR	5	- 2	+ 3	2
Taza-Al Hoceima-Taounate	AL HOCEIMA	BNIBOUAYACH	3	- 1	+ 2	3
Meknes-Tafilalt	IFRANE	IFRANE	3	- 2	+ 1	4
Guelmim Smara	TATA	FOUM ZGUID	5	- 1	+ 4	1
Guelmim Smara	TATA	FOUMEL HISN	5	- 1	+ 4	1
Guelmim Smara	TATA	AKKA	5	- 1	+ 4	1
Souss-Massa-Draa	TIZNIT	TAFRAOUT	5	- 1	+ 4	1
Rabat-Salé-Zaer-Zemmour	SHIRAT-TEMARA	SIDI YAHIA ZAER	4	- 1	+ 3	2
Région de l'oriental	JRADA	DEBDOU	5	- 1	+ 4	1
Tadla-Azilal	BENIMELLAL	ZAOUAT CHEIKH	4	- 2	+ 2	3
Région de l'oriental	NADOR	BEN TAEIB	4	- 1	+ 3	2
Gharb-Chrarda-Hcine	KENITRA	SIDI TAIBI	4	- 2	+ 2	3

1.4.6. Occupation du sol

Il est nécessaire d'établir une carte d'occupation actuelle du sol qui relate aussi bien l'occupation agricole que d'autres occupations (habitations, points de pollution ponctuelle, aménagements, etc.).

L'établissement de la carte d'occupation du sol est une opération qui se déroule en trois étapes successives : la photo-interprétation ou le traitement des images satellitaires, les prospections et observations sur le terrain et le traitement des données.

La carte d'occupation du sol doit comprendre tous les éléments en relation directe ou indirecte avec le projet de réutilisation des eaux usées. Le contenu type de la légende de cette carte est rapporté comme exemple dans l'**Encadré 6**

Encadré 6 : Contenu et légende d'une carte d'occupation de sols
<u>Les occupations agricoles, pastorales et sylvicoles</u> - les céréales en agriculture pluviale (non irriguée) - la céréaliculture en irrigué, les cultures maraîchères en plein champ et sous serre - les cultures fourragères - l'arboriculture fruitière - la végétation naturelle - les terrains incultes et de parcours <u>Les points de pollution ponctuelle</u> - habitations - décharge d'ordures ménagères - cimetière - points de rejets d'eaux usées <u>Infrastructure</u> - routes et différents types de voirie - forages - etc.

Un exemple de carte d'occupation élaborée dans le cadre d'une étude de faisabilité du projet de traitement – réutilisation des eaux usées dans des localités relevant de la commune de sidi Bibi (Agadir) est illustré par la **Figure 3**.

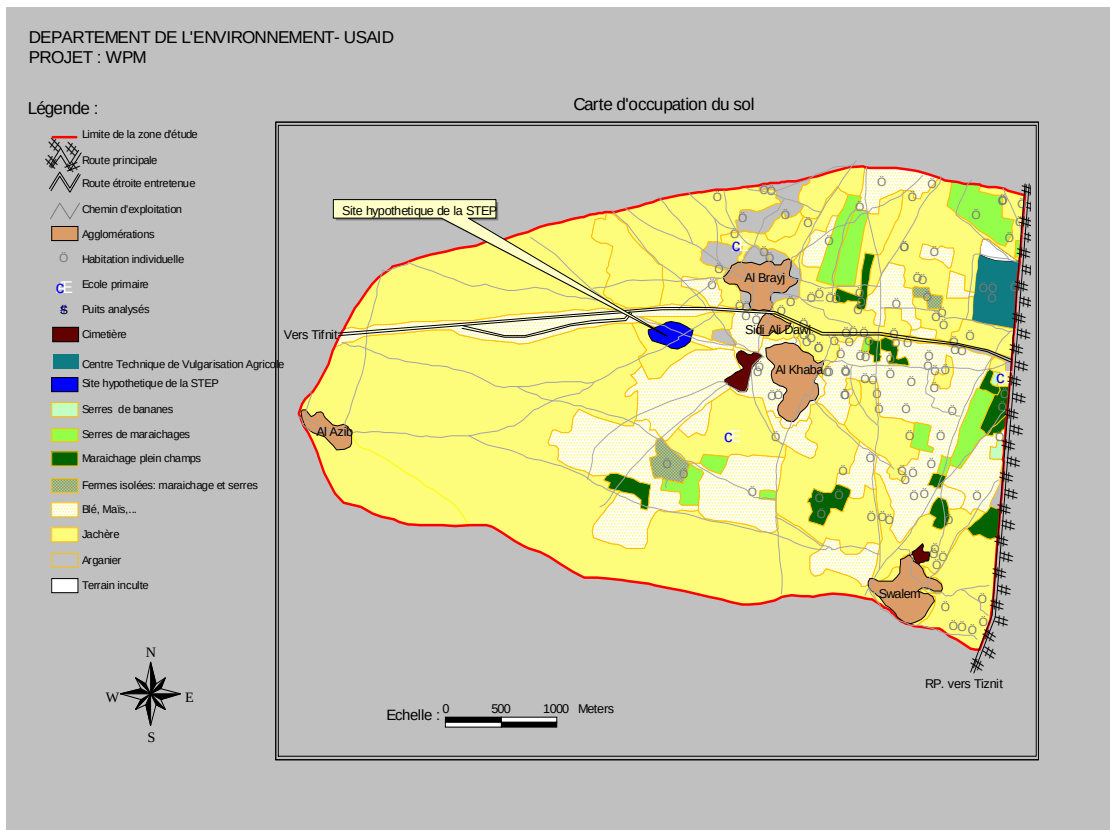


Figure 3: Exemple de carte d'occupation du sol

1.4.7. Récapitulatif sur le choix de site

Les principaux paramètres à retenir pour le choix de site de réutilisation des eaux usées épurées sont : la nature du sol (texture, profondeur) les paramètres de qualité du sol physiques (conductivité hydraulique et physico-chimiques (pH, CEC, salinité, sodicité), la topographie, le niveau piézométrique de la nappe et la susceptibilité de remontée de la nappe. Le **Tableau 5** récapitule les niveaux restrictifs modérés et favorables de ces paramètres. La dernière colonne du **Tableau 4** relate des observations et des possibilités d'atténuation de la sévérité de certains paramètres en adoptant des pratiques ou des aménagements particuliers.

Tableau 5 : Niveaux de paramètres de choix de site favorable à la réutilisation des eaux usées en agriculture

Paramètre	Niveau favorable	Niveau modéré	Niveau sévère	Observations
<u>Sol</u>				
Texture	Texture équilibrée	Sols sablo-argileux	Sols très argileux en surface	Tous les sols peuvent être irrigués avec les eaux usées épurées à condition de gérer les paramètres suivants : Drainage, colmatage en cas des valeurs élevées en MES
Profondeur	> 50 cm	25-50 cm	< 20 cm	
Conductivité hydraulique	> 5 cm/h	-	-	La plupart de sols marocains ne posent pas de problèmes d'infiltration. Il est clair qu'une conductivité hydraulique élevée favorise la circulation de l'eau et permet d'éviter la stagnation d'eau mais elle favorise aussi la lixiviation des éléments nutritifs si les doses et les fréquences d'irrigation ne sont pas maîtrisées.
Salinité	< 4 mS/cm	4-8 mS/cm	> 8 mS/cm	Le drainage et la pratique de lessivage peuvent atténuer ce problème
Sodicité (ESP)	< 10%	10-15%	> 15%	Les amendements chimiques et organiques peuvent atténuer ce problème
<u>Nappe</u>	> 10 m	5-10 m	< 5 m	Une surveillance de la remontée de la nappe est obligatoire en adoptant un système de drainage.
<u>Topographie (pente)</u>	5-10%	15-20%	> 20%	

Les autres critères liés au climat et à la nature du sous-sol sont importants à caractériser pour pouvoir en tenir compte pour le pilotage de l'irrigation et la gestion du risque de propagation des excès d'éléments nutritifs et tout particulièrement les nitrates vers la nappe.

Les aspects relatifs à l'occupation du sol sont aussi importants à prendre en considération pour le choix des cultures et la proposition des cultures à promouvoir en fonction de la qualité des sols et des eaux épurées.

2.0. Choix des cultures

2.1. Démarche et raisonnement de choix des cultures

Le choix des cultures irriguées avec les EUE est un processus qui dépend d'une multitude de critères ayant des poids variables et dont la plupart sont interactifs:

- La tradition des agriculteurs et leurs pratiques actuelles et les objectifs économiques des usagers
- La qualité des eaux usées épurées et donc du niveau de traitement et du degré de précaution
- Le risque de transmission des pathogènes
- L'adoption de bonnes pratiques culturales
- La qualité des sols et leurs caractéristiques physiques, hydrauliques et physico-chimiques
- Le climat
- Le système d'irrigation
- La disponibilité de l'eau et du terrain
- La vulnérabilité de la nappe
- La capacité de mobilisation des éléments nutritifs par les cultures
- Le type de produit destiné au consommateur

Selon les situations, on sélectionne les critères qui s'avèrent les plus prépondérants. On se propose de détailler dans les paragraphes suivants les aspects qui méritent d'être considérés.

2.1.1. Enquête agricole

Cette enquête sur les activités agricoles actuelles et sur les cultures possibles à promouvoir est une étape préalable très importante. En effet, elle permet de déduire les potentialités actuelles de production, l'organisation actuelle des agriculteurs et leur niveau de technicité, les besoins en vulgarisation et en information etc. Les résultats de cette enquête aboutiront inéluctablement à différentes conclusions selon la situation actuelle. Plusieurs situations peuvent être rencontrées au Maroc et conduiront à des décisions différentes en matière de choix de cultures, de rentabilité de réutilisation et d'acceptabilité des agriculteurs :

- Les agriculteurs sont usagers des eaux usées brutes
- Les agriculteurs puisent de l'eau de nappe à une profondeur donnée
- Les agriculteurs sont usagers des eaux mobilisées en zones de grande hydraulique ou de petite et moyenne hydraulique
- Le climat de la région et donc le niveau de pluviométrie annuelle
- Le mode actuel d'irrigation et le coût du mètre cube d'eau
- La nature des cultures pratiquées et leur diversité
- Etc.

Certains de ces aspects sont illustrés dans l'**Encadré 7**.

Encadré 7: Quelques illustrations de cas influençant le degré de réussite et d'acceptabilité de la réutilisation des EUT

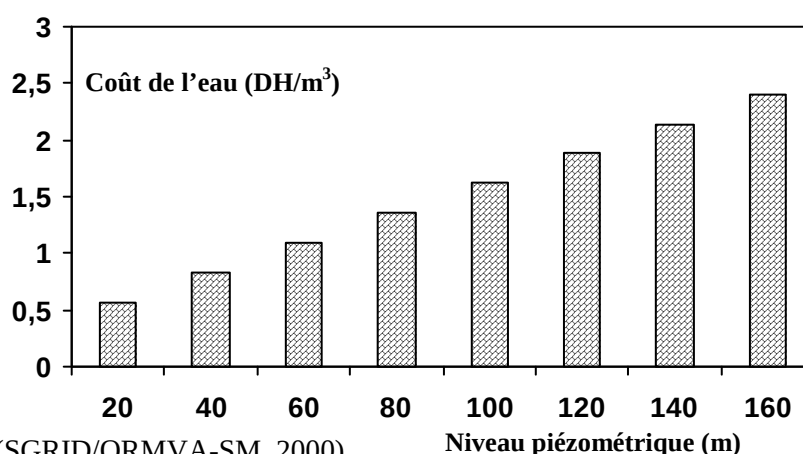
A. Cas des zones irriguées

a/ Coût du mètre cube d'eau conventionnelle :

Eau de barrage : les tarifs restent faibles malgré l'augmentation récente des prix pour assurer l'équilibre du service de l'eau (couverture des frais d'exploitation, de maintenance et de renouvellement des infrastructures) ; ils varient selon les offices régionaux de mise en valeur agricole de 0,17 à 0,63 dirham/m³ (Ministère de l'Agriculture, 2000). Ces tarifs ne couvrent pas plus de 20% du coût total de l'eau. L'Etat maintient des subventions importantes et particulièrement pour certains offices.

b/ Eau de pompage

Le coût de pompage de l'eau varie selon le type d'énergie utilisé et surtout selon le niveau piézométrique de la nappe comme l'illustre la figure suivante :



Source (SGRID/ORMVA-SM, 2000)

B. Zones d'agriculture pluviale (Bour)

Ces zones se distinguent en bour favorable et en bour défavorable selon le niveau des précipitations. Généralement, dans ce type de situation, l'intérêt de la REUE est plus élevé. En effet, l'irrigation avec les eaux usées traitées génèrera des accroissements de rendement des cultures et donc un gain économique nettement supérieur à celui généré par la situation actuelle (avant projet de réutilisation) caractérisée par le déficit hydrique).

C. zones de réutilisation des eaux usées brutes

Dans ces zones, les agriculteurs sont déjà habitués à la réutilisation des EU et donc il serait plus facile de promouvoir la réutilisation des eaux usées épurées. Leur participation est possible moyennant une bonne information sur la nouvelle qualité des EUT et moyennant des mécanismes de subvention.

Pour pouvoir intégrer tous ces aspects, une enquête sur les activités et pratiques actuelles de l'agriculture dont le contenu sommaire de la grille d'enquête est rapportée dans l'Encadré 8.

Encadré 8 : Contenu de la grille d'enquête à effectuer avant le projet de REUE

- Superficie agricole cultivée
- Acceptation des eaux usées épurées par les agriculteurs
- Superficie cultivable autour de la STEP
- Types de sols
- Pratiques agricoles actuelles
- Cultures pratiquées et mode d'assolement
- Rendements des cultures
- Destination des produits agricoles
- Cultures irriguées et cultures non irriguées
- Cultures en plein champ et cultures sous serres
- Apports d'engrais minéraux et organiques (forme, doses pour les différentes cultures, coûts)
- Irrigation : type de ressource en eau (eau de barrage ou eau souterraine), système de pompage, système d'irrigation, doses d'irrigation, qualité de l'eau d'irrigation, méthode de gestion de la distribution d'eau, prix de l'eau, coût de pompage, etc.

2.1.2. Qualité des EUE

La qualité des EUE est un aspect très important à considérer non pas seulement pour le choix des cultures mais aussi pour le choix adéquat du système d'irrigation et pour la quantification et donc l'ajustement des quantités d'éléments nutritifs.

Pour rester dans la démarche de choix des cultures, les paramètres de qualité des EUE les plus importants sont rapportés et discutés ci-après.

Salinité des EUE

La salinité des EUE est appréciée par les paramètres suivants :

- Conductivité électrique (CE exprimée en mS/cm et le résidu sec exprimé en g/l)
- Le risque d'alcalinité sodique du sol ou SAR : Sodium Adsorption Ratio (Cf. Encadré 5)

Concentration en éléments nutritifs

Cette donnée est à confronter avec les besoins des cultures à promouvoir. Comme il sera développé plus loin, l'azote est l'élément le plus important à considérer.

Concentration en éléments phyto-toxiques (Eléments traces métalliques, Bore et Chlore)

Théoriquement, les éléments traces métalliques dans les eaux usées domestiques non mélangées aux eaux industrielles se trouvent en teneurs négligeables. Dans le cas de présence d'éléments traces en quantité, ils se retrouvent concentrés dans les boues résiduaires par décantation. Ainsi, la problématique liée aux éléments traces métalliques est plus importante dans les boues..

Le bore et le chlore sont des éléments généralement négligés alors qu'ils peuvent constituer un grand problème et particulièrement en zones arides et semi -arides. L'Encadré 9 donne quelques explications concernant ces deux éléments.

Encadré 9 : Risques liés au Chlore et au Bore**L'anion chlorure (Cl⁻) :**

Bien qu'élément indispensable à la vie des plantes mais en très faibles quantités, l'anion Cl⁻ devient toxique dès que les seuils de toxicité (variables selon les plantes) sont dépassés. Avec les autres anions majeurs, le chlorure accompagne souvent et en quantités appréciables les cations et participe ainsi au processus de salinisation. Mais ce qui est encore plus important à souligner c'est la toxicité fréquente et importante que cause cet élément aux plantes cultivées sur des sols affectés par la salinité et la sodicité et les diminutions des rendements qui en résultent.

Le bore :

Le bore est toxique pour plusieurs espèces végétales à des niveaux juste légèrement supérieurs à ceux exigés par les plantes pour une croissance et un développement normaux. Cette toxicité est souvent associée aux caractères arides et semi-arides du climat où la concentration de l'anion borate est souvent élevée dans les sols. La connaissance de la concentration en cet élément dans les eaux usées épurées dans ces régions est particulièrement importante. En somme, le statut du bore est étroitement lié avec les composantes de la salinisation et la sodification des sols. Il constitue un aspect important de ces processus puisque ses teneurs primaires élevées dans les sols et surtout son accumulation via les eaux usées épurées pourrait entraîner une chute importante des rendements si les valeurs limites sont dépassées.

Les normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation sont rapportées en **Annexe 2**.

Paramètres de qualité en relation avec le colmatage des goutteurs dans le cas de l'irrigation localisée

Le Tableau 6 relate les paramètres responsables du colmatage et le classement du niveau de restriction (FAO, 1983 - *Adapté de Nakayama, 1982*).

Tableau 6 : Qualité de l'eau traitée et risque de colmatage physique et biologique du système d'irrigation localisée

Problème potentiel		Unités	Degré de restriction de l'usage		
			Aucun	Faible à modéré	Sévère
Physique					
	MES	mg/l	< 50	50- 100	> 100
Chimique					
	pH		< 7.0	7.0 - 8.0	> 8.0
	Solides dissous	mg/l	< 500	500-2000	> 2000
	Manganèse	mg/l	< 0.1	0.1 - 1.5	> 1.5
	Fer	mg/l	< 0.1	0.1 - 1.5	> 1.5
	Sulfure d'hydrogène	mg/l	< 0.5	0.5 - 2.0	> 2.0
Biologique		maximum			
	Populations bactériennes	nombre/ml	< 10000	10 000 - 50 000	> 50000

Niveau des nématodes intestinaux et des coliformes fécaux.

Le choix des cultures dépend de manière étroite de ces paramètres de qualité biologique des EUE qui elle-même varie en fonction du niveau de traitement. Les directives adoptées au Maroc concernant ces aspects sont rapportées dans le **Tableau 6**. L'**Annexe 3** présente les normes microbiologiques dans plusieurs pays.

Tableau 7 : Critères de réutilisation des EUE au Maroc

Catégorie	A	B	C
Conditions de réutilisation	Irrigation des cultures consommées à l'état cru, des terrains de sport et des parcs ⁱⁱⁱ⁽⁺⁾	Irrigation des cultures céréalières, industrielles fourragères, cultures pastorales et arbres fruitiers	Irrigation des cultures de la catégorie B si les agriculteurs, le public et les consommateurs n'y sont pas exposés.
Groupes exposés	Agriculteurs Public Consommateurs	Agriculteurs	Néant
Nématodes intestinaux Moyenne logarithmique du nombre d'oeufs par 100 ml i(*)	Absence	Absence	Sans objet
Coliformes fécaux Moyenne géométrique du nombre par 100ml ⁱⁱ⁽⁺⁾	≤1000 (d)	Pas de standards recommandés	Sans objet
Procédé de traitement des EU pour assurer la qualité microbiologique requise	Série de bassins de stabilisation permettant de garantir une bonne qualité microbiologique des effluents ou tout autre système de traitement équivalent; catégorie A	rétenion dans un bassin de stabilisation pendant 8 – 10 jours ou tout autre système permettant une élimination équivalente des helminthes et des coliformes fécaux	Traitement préliminaire en conformité avec les techniques d'irrigation avec au moins une décantation primaire

^{i(*)} *Ascaris*, *Trichuris*(whipworm) et *Ankylostoma*

ⁱⁱ⁽⁺⁾ *Durant la période d'irrigation*

ⁱⁱⁱ⁽⁺⁾ *A Directive stricte (<200 CF/100ml) est justifiée pour le gazon avec lequel le public peut avoir un contact direct.*

Selon la FAO (1989), les cultures peuvent être classées comme suit selon le risque de transmission des pathogènes :

- i. Légumes consommés crus,
- ii. Légumes consommés cuits,
- iii. Plantes ornementales produites pour être vendues dans les serres,
- iv. Arbres produisant des fruits, mangés crus sans être pelés,
- v. Pelouses dans des endroits d'agrément avec accès libre au public,
- vi. Arbres produisant des fruits que l'on mange crus après les avoirs pelés,
- vii. Pelouses et autres arbres dans des zones d'agrément d'accès limité,
- viii. Cultures fourragères,
- ix. Arbres produisant des noix et d'autres arbres similaires,
- x. Cultures industrielles ou grandes cultures.

Dans la démarche proposée, on juge utile de dissocier la catégorie des légumes en légumes des plantes à tubercules (produits de la partie souterraine de la plante) comme la pomme de terre et les carottes des autres légumes produits de la partie aérienne. En effet, le contact avec les eaux est différent selon ces catégories des cultures et selon le système d'irrigation.

2.1.3. Système d'irrigation

Le système d'irrigation constitue un élément important à prendre en considération. En effet, le risque sanitaire peut varier selon le système adopté.

Le choix du système d'irrigation approprié dépend de la qualité de l'eau usée, de la culture, des coutumes, de l'expérience, de la compétence, de la capacité des agriculteurs à gérer les différentes méthodes et du risque potentiel sur l'environnement et sur la santé des agriculteurs et du public.

Pour une eau conventionnelle, le choix du système d'irrigation dépendra de la qualité de l'eau (essentiellement sa salinité), des cultures à irriguer, de l'investissement possible et du type de sol. L'utilisation d'eaux usées implique des préoccupations supplémentaires telles que les éléments toxiques, la résistance et la méfiance sociale, les aspects culturels et légaux ainsi que les précautions sanitaires et environnementales associées. Il est toutefois possible de réduire les effets indésirables de l'utilisation des eaux usées par la sélection de méthodes d'irrigation appropriées.

Si une eau usée traitée répond à la directive de l'OMS, toutes les méthodes d'irrigation sont appropriées du point de vue du contrôle de la transmission de maladies, à condition que les critères agricoles soient également satisfaits. Si l'eau usée ne répond pas aux critères de santé alors (Tableau 8):

- l'irrigation par aspersion (mini asperseurs, asperseurs, 'cracheurs', etc.) est seulement limitée aux fourrages, fibre, et production de graines.
- l'irrigation par aspiration de pelouses ou de domaines à accès illimité, peut être pratiquée pendant la nuit.
- l'irrigation par aspersion n'est pas recommandée en conditions venteuses. Les microbes pathogènes peuvent être emportés par le bouillard ou l'aérosol formé par la dérive du vent ce qui peut engendrer un risque sanitaire pour les ouvriers, les habitants de la ferme et des zones résidentielles voisines.

Les méthodes d'irrigation doivent également être examinées par rapport à l'ampleur de leur pratique dans une zone ou un pays, l'expérience des agriculteurs de certaines méthodes et l'ampleur de la contamination qu'elles peuvent induire sur les cultures et plus particulièrement sur les parties comestibles.

Tableau 8 : Facteurs affectant le choix de la méthode d'irrigation et les mesures spéciales exigées quand l'eau usée est utilisée, en particulier quand elle ne rencontre pas les directives de l'OMS (Adapté de Mara et Cairncross, 1989)

Méthode d'irrigation	Facteurs affectant le choix	Mesures spéciales pour les eaux usées
Irrigation à la planche	Plus faible coût, planage précis non nécessaire	Protection complète pour des ouvriers agricoles, les ouvriers qui manipulent les produits agricoles et les consommateurs
Irrigation à la raie	Faible coût, planage précis peut être nécessaire	Protection pour des ouvriers agricoles, éventuellement pour les ouvriers qui manipulent les produits agricoles et les consommateurs
Irrigation par aspersion	Efficacité moyenne d'utilisation de l'eau, nivellement non requis	Les arbres fruitiers, ne devraient pas être irrigués. Distance minimum de 50 – 100 m des maisons et des routes. Des eaux ayant été traitées par voie anaérobie ne devraient pas être employées, en raison des nuisances olfactives.
Irrigation souterraine et localisée	Coût élevé, efficacité d'utilisation de l'eau élevée, rendements plus élevés	Filtration pour prévenir le colmatage des distributeurs

2.1.3.1. Irrigation de surface

L'irrigation en surface est pratiquée en sol bien nivelé et requiert moins d'équipement que le système d'irrigation par aspersion. Ce système n'est pas recommandé pour les sols très filtrants de texture sableuse. Il a aussi le désavantage de ne pas permettre une application uniforme des EUT.

Plusieurs systèmes existent :

- irrigation par submersion (à la planche ou par bassin), humecte presque toute la surface du terrain
- Irrigation par tuyaux
- Irrigation à la raie (ou par sillon), une partie de la surface du terrain est humectée

Ces méthodes sont utilisées sur presque 95% des superficies irriguées à travers le monde. Elles sont peu coûteuses, simples à comprendre et à mettre en œuvre. Elles conviennent à beaucoup de pays, en particulier si l'eau n'est pas le facteur limitant pour la production agricole en raison de leur faible efficience d'irrigation.

a) Les irrigations à la planche, par bassin et par submersion impliquent le recouvrement complet de la surface du sol avec l'effluent traité et donc la contamination des cultures qui poussent sur le sol ou dans le sol. Avec ces méthodes, les fermiers ou les agriculteurs sont en contact avec l'effluent. Ces méthodes d'irrigation ne seront acceptées que pour la production de fourrages, céréales ou arbres fruitiers à condition que les eaux soient au moins de classe B et que les ouvriers évitent le contact direct avec l'eau pendant l'irrigation.



Photo 1 : L'irrigation à la planche

b) L'irrigation à la raie ne mouille pas l'entièreté de la surface du sol. Cette méthode peut réduire la contamination des cultures puisque les plantes poussent sur les buttes. Mais une protection sanitaire complète ne peut pas être garantie. Le risque de contamination est réduit si l'effluent est transporté par des conduites fermées. La photo ci-après visualise le cas de l'irrigation à la raie d'eau agro-industrielle fortement chargée en matière organique,



Photo 2 : L'irrigation à la raie avec des eaux usées d'industrie agroalimentaire

Outre les risques sanitaires, l'irrigation de surface comporte un danger de pollution du sol et des nappes phréatiques supérieures à celui des autres systèmes d'irrigation à cause des pertes par colature et par percolation. En définitive, l'irrigation gravitaire nécessite deux types de mesures de protection majeures :

- Bien maîtriser la dose appliquée pour éviter une percolation des eaux en profondeur qui entraînerait des nitrates vers la nappe.
- Les ouvriers opérateurs de l'irrigation doivent être protégés et sensibilisés

2.1.3.2. Irrigation par aspersion

Les cultures et le sol sont mouillés de la même manière qu'avec la pluie. Ce système peut être adopté même en terrains de pente supérieure à 15%. L'irrigation par aspersion peut être utilisée pour épandre des eaux usées qui ont subi un traitement secondaire pour autant que l'effluent ne soit pas trop salin. Des précautions supplémentaires telles que la filtration et le choix d'ajutage de diamètre adéquat sont nécessaires. L'irrigation par aspersion, implique moins de risques de colmatage que l'irrigation localisée mais, en revanche, elle introduit un risque lié à la contamination des cultures par contact avec l'eau et du voisinage par aéroaspersion. Les cultures industrielles et les cultures consommées cuites peuvent être irriguées avec ce procédé.



Photo 3 : L'irrigation par aspersion de cultures industrielles avec des eaux usées d'une industrie agroalimentaire

L'inconvénient de ce système réside dans la diffusion d'aérosol et la difficulté de garantir une bonne uniformité d'arrosage.

2.1.3.3. Irrigation localisée

L'irrigation localisée s'applique quelque soit la topographie et est la technique la mieux adaptée à l'apport d'eaux usées épurées parce qu'elle engendre le moins de risques sanitaires. Malgré ces avantages, les économies en eau ainsi que l'augmentation des rendements associées à ces systèmes, les agriculteurs montrent une réticence à installer ces systèmes à cause du coût d'investissement élevé. Pour inciter à l'économie de l'eau d'irrigation, les autorités marocaines ont mis en place des subventions et mesures incitatives pour encourager les agriculteurs à installer ces systèmes.

Ces systèmes requièrent une filtration efficace et demandent un entretien constant à cause de leur sensibilité au colmatage.

Pour assurer un bon fonctionnement et une gestion efficace d'un système d'irrigation localisée qui utilise les eaux usées épurées, il faut veiller à l'entretien régulier du matériel en raison des caractéristiques de ce type d'eau. Il faut intégrer dans le système certains composants tels que : filtres à tamis, filtre à sable, vanne de purge, etc. Il est important d'effectuer régulièrement un

contrôle et une vérification de la performance des composants; ainsi que du fonctionnement de tout le système. Des rapports réguliers sur le fonctionnement et l'entretien du réseau sont nécessaires pour parer au plus vite à une défaillance.

Les caractéristiques principales du système sont:

- efficacité élevée d'application. Si elle est employée correctement, c'est probablement, la meilleure méthode d'irrigation dans les endroits où la pénurie de l'eau est un problème.
- méthode appropriée pour faire face aux problèmes associés à la salinité de l'eau d'irrigation et à l'alcalinité du sol.
- cette méthode est sûre et pourrait être la plus prometteuse pour l'irrigation avec l'eau usée, en particulier si le traitement est suffisant pour empêcher l'obstruction des orifices par :
 - L'utilisation de filtre à sable et filtre à tamis pour empêcher le colmatage physique (voir photo ci-après),
 - L'utilisation d'acides pour empêcher le colmatage chimique
 - L'utilisation d'algicide pour empêcher la prolifération d'algues dans les tuyaux d'irrigation
- le contact de l'eau usée avec les agriculteurs et les cultures irriguées est réduit au minimum.
- aucun aérosol ne se forme et, en conséquence, aucune pollution de l'atmosphère et de la zone proche des champs irrigués ne se produit.



Photo 4 : Filtre à sable et filtre à tamis en irrigation localisé

L'irrigation par Bubbler est une technique d'irrigation localisée avec régulation de l'écoulement. Lorsqu'il y a danger de colmatage, ce système convient mieux que l'irrigation goutte à goutte et les minis asperseurs lorsque l'eau est de mauvaise qualité.

2.1.3.4. Choix du système d'irrigation

Le choix du système d'irrigation approprié dépend de la qualité de l'eau usée, de la culture, des coutumes, de l'expérience, de la compétence, de la capacité des agriculteurs à gérer les différentes méthodes et du risque potentiel sur l'environnement et sur la santé des agriculteurs et du public.

Les problèmes de colmatage des asperseurs, des minis asperseurs, des goutteurs et des systèmes d'irrigation souterrains peuvent être sérieux. Le développement (dépôts biologiques, bactéries, etc.) dans les asperseurs, les orifices d'émission ou les canalisations d'alimentation, produit le colmatage. Les sels et les solides en suspension peuvent également produire le colmatage. Le colmatage le plus sérieux se produit avec l'irrigation localisée qui est considérée comme le système idéal en ce qui concerne la protection sanitaire et la contamination des plantes, mais pourrait être difficilement utilisable si l'eau usée épurée contient de fortes concentrations de matières en suspension (MES).

Les agriculteurs doivent savoir que pour une eau usée traitée répondant à la norme marocaine, toutes les méthodes d'irrigation sont appropriées du point de vue du contrôle de la transmission de maladies, à condition que les critères agricoles soient également rencontrés. Si l'eau usée ne répond pas aux critères de santé alors:

- l'irrigation par aspersion (mini asperseurs, asperseurs, 'cracheurs', etc.) est seulement limitée aux fourrages, fibre, et production de graines.
- l'irrigation par aspiration de pelouses ou de domaines à accès illimité, peut être pratiquée pendant la nuit.
- l'irrigation par aspersion n'est pas recommandée en conditions venteuses. Les microbes pathogènes peuvent être emportés par le bouillard ou l'aérosol formé par la dérive du vent ce qui peut engendrer un risque sanitaire pour les ouvriers, les habitants de la ferme et des zones résidentielles voisines.
- si l'eau usée traitée n'a pas la qualité sanitaire et/ou environnementale acceptable, il faut mélanger l'eau usée traitée avec l'eau d'irrigation conventionnelle, si elle est disponible, pour permettre d'atteindre les prescriptions pour un certain usage.

Les méthodes d'irrigation doivent également être examinées par rapport à l'ampleur de leur pratique dans une zone, l'expérience des agriculteurs de certaines méthodes et l'ampleur de la contamination qu'elles peuvent induire sur les cultures, en particulier sur les parties comestibles.

2.1.4. Le sol et le niveau de la nappe

2.1.4.1. Sol

Comme il a été développé dans la section relative au choix du site de réutilisation, les paramètres liés au type de sol notamment sa profondeur et sa texture sont importants à considérer dans le choix des cultures et le système d'irrigation. Dans la démarche proposée dans ce guide, on retient trois niveaux de texture (sableuse, argileuse et équilibrée) et deux niveaux de profondeur (< 50 cm et > 50 cm). La profondeur du sol n'est limitante que dans le cas d'arboriculture qui requiert des sols profonds. Toutefois, un sol profond est favorable pour toutes les cultures car il permet de maximiser la valorisation de l'eau et des éléments nutritifs à travers un bon développement racinaire.

Comme pour le cas des EUT, la salinité des sols est aussi considérée en retenant trois niveaux : faible pour un sol non salé si la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée (CEps) est < 4 mS/cm ; moyen si CEps est comprise entre 4 et 8 et élevé : si la CEps > 8 mS/cm. Le sol devient très salé à partir d'une CEps de 16 mS/cm.

2.1.4.2. Nappe

Une nappe profonde de niveau piézométrique supérieur 20 mètres est supposée très acceptable. Si le niveau de la nappe est inférieur à 2 mètres, des précautions particulières devront être prises et un drainage éventuel est à prévoir.

2.1.5. Récapitulatif

Pour guider le choix des cultures on se propose d'établir une matrice (**Tableau 9**) sur la base des paramètres jugés les plus importants listés ci-après :

- Le classement des cultures selon le risque de transmission des pathogènes
- Le niveau de traitement et donc de la catégorie microbiologique des effluents
- Le système d'irrigation
- La texture et la profondeur du sol
- Le niveau de salinité des sols et des EUT

Selon les situations, d'autres paramètres ou aspects particuliers peuvent être intégrés. Pour cela, on associe à cette matrice des compléments qui tiennent compte d'autres facteurs ou des combinaisons de facteurs qui ne sont difficiles à faire apparaître dans la matrice (**Encadré 10**).

Tableau 9 : Matrice de choix des cultures																				
	Niveau de traitement			Système Irrigation			Sol					Nappe			Niveau de Salinité					
							Profondeur		Texture						Eau		Sol			
Cultures ¹	TT(A)	TS/B	TP/C	IL/sf	IL/ St	IG	<0.5 m	>0.5m	A	Eq	S ₂	< 2m	>2m	P	F	M	E	F	M	E
Légumes consommés crus																				
Légumes à tubercules consommés crus (carottes)																				
Légumes à tubercules consommés cuits (PdT)																				
Légumes consommés cuits																				
Plantes ornementales produites pour être vendues (dans les serres)																				
Arbres produisant des fruits, mangés crus sans être pelés,																				
Pelouses dans des endroits d'agrément avec accès libre au public																				
Arbres à fruits que l'on mange crus après les avoirs pelés																				
Pelouses et autres arbres dans des zones d'agrément d'accès limité																				
Cultures fourragères																				
Arbres produisant des noix et d'autres arbres similaires																				
Cultures industrielles																				
Grandes cultures																				

Risques faibles

Risques modérés

Risques élevées

Les risques peuvent être d'ordre sanitaire, environnemental (qualité des sols et des eaux) ou d'ordre agronomique (phyto – toxicité et diminution des rendements agricoles ;

1 : Cultures classées selon le risque de transmission des pathogènes (FAO, 1989)

TT : traitement tertiaire (série de bassins de stabilisation permettant de garantir une bonne qualité microbiologique des effluents ou tout autre système de traitement équivalent; catégorie A

TS : Traitement secondaire (rétention dans un bassin de stabilisation pendant 8 – 10 jours ou tout autre système permettant une élimination équivalente des helminthes et des coliformes fécaux ; catégorie B

TP : Traitement préliminaire en conformité avec les techniques d'irrigation avec au moins une décantation primaire; ; catégorie C

IL/sf : Irrigation localisée de type goutte à goutte avec application en surface

IL/st : Irrigation localisée souterraine (sub-surface irrigation)

IG : Irrigation de surface gravitaire

Texture : A : argileuse, S : sableuse ; Eq : texture équilibrée

2 : Si la texture du sol est sableuse, le système d'irrigation gravitaire n'est pas efficient

Nappe : Si nappe est profonde de moins de 2 mètres, il est important de surveiller sa remontée, un drainage peut s'avérer nécessaire ; P : nappe profonde (> 20 mètres)

Niveau de salinité de l'eau : F : faible si CE < 2 mS/cm ; M : Moyen si CE est comprise 2 et 2.5 et élevée si CE > 3 mS/cm

Niveau de salinité du sol : F : faible pour un sol non salé si la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée (CEps) est < 4 mS/cm ; M : Moyen si Ceps est comprise entre 4 et 8 et

E : si la CEps > 8mS/cm. Le sol devient très salé à partir d'une CEps de 16.

NB. Toutes ces suggestions requièrent l'adoption de bonnes pratiques de réutilisation, des précautions de la part des opérateurs et de nettoyage adéquat des produits.

Encadré 10 : Directives complémentaires de la matrice de choix des cultures

Complément 1. Qualité de l'eau traitée et risque de colmatage physique et biologique du système d'irrigation localisée

Problème potentiel		Unités	Degré de restriction de l'usage		
			Aucun	Faible à modéré	Sévère
Physique					
	MES	mg/l	< 50	50- 100	> 100
Chimique					
	pH		< 7.0	7.0 - 8.0	> 8.0
	Solides dissous	mg/l	< 500	500-2000	> 2000
	Manganèse	mg/l	< 0.1	0.1 - 1.5	> 1.5
	Fer	mg/l	< 0.1	0.1 - 1.5	> 1.5
	Sulfure d'hydrogène	mg/l	< 0.5	0.5 - 2.0	> 2.0
Biologique		maximum			
	Populations bactériennes	nombre/ml	< 10000	10 000 - 50 000	> 50000

Complément 2. Texture et système d'irrigation

	Irrig. gravitaire	Irr. localisée	Irr. Aspersions
Texture sableuse	Risque élevé	Risque faible	Risque faible
Texture équilibrée	Risque modéré	Risque faible	Risque faible
Texture argileuse	Risque faible	Risque faible	Risque faible

Complément 3. Pour le cas des cultures fourragères, il est préférable de choisir le ray gras d'Italie ou le bersim. La luzerne fixe l'azote atmosphérique du sol et la fixation de l'azote atmosphérique est inhibée suite à un apport excessif d'azote.

Complément 4. Favoriser dans le choix des cultures celles les plus consommatrices d'azote et diversifier le positionnement des cycles de cultures pour éviter le maximum possible les périodes creuses.

3.0. Techniques de valorisation agronomique de l'eau et des éléments nutritifs

3.1. Irrigation avec les EUE

3.1.1. Bases de calcul des besoins en eau des cultures

Evapotranspiration potentielle (ETP) et évapotranspiration maximale (ETM)

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est la quantité d'eau perdue par une végétation de référence en phase active de croissance recouvrant totalement un sol assurant une alimentation hydrique optimale. L'ETP dépend surtout du climat et peut être considérée comme une grandeur climatique déterminée par l'énergie de radiation disponible pour la vaporisation de l'eau et la vitesse de transfert de la vapeur des surfaces évaporantes dans l'atmosphère. L'ETP varie de 1 à 4 mm.j⁻¹ sous climat humide, 8 à 12 mm/jour sous climat aride.

L'évapotranspiration maximale (ETM) est la quantité d'eau perdue par une végétation jouissant d'une alimentation hydrique optimale. L'ETM varie au cours du développement d'une culture annuelle et augmente progressivement avec le taux de recouvrement du sol par la plante pour atteindre l'ETP et diminue à la fin du cycle végétatif.

L'ETP est estimée par des formules prenant en compte des données météorologiques, par des mesures sur bacs évaporimétriques affectées d'un coefficient de conversion ou par des mesures lysimétriques de référence. Dans ce manuel, nous présentons quelques formules couramment utilisées au Maroc pour l'estimation de l'ETP, soit les formules de Blaney-Criddle, de Turc et de Penman (voir **Encadré 11, Encadré 12 et Encadré 13**).

Encadré 11 : Formule de BLANEY-CRIDDLE

Il s'agit d'une formule empirique simple nécessitant un seul paramètre climatique; la température :

$$ETP = 0,254 p (t + 17,78)$$

Où :

ETP = évapotranspiration potentielle en mm par mois;

t = température moyenne mensuelle en °C;

P = pourcentage en heures d'insolation possibles pour le mois envisagé rapporté à la quantité totale d'heures d'insolation pour l'année (fourni par des tables en annexe 4; tableau A2.1).

Cette formule donne de bons résultats dans un climat analogue à celui pour lequel elle a été établie (Sud de la Californie).

Encadré 12 : Formule de TURC

La formule de **TURC**, est une formule qui intègre en plus le rayonnement et nécessite donc 2 paramètres climatiques; la température et le rayonnement :

$$ETP=0,40\frac{t}{t+15}(Rg+50)$$

Dans laquelle :

ETP = évapotranspiration potentielle mensuelle en mm;

T = température moyenne journalière du mois, en °C

Rg = rayonnement global moyen journalier en calories.j⁻¹.cm⁻² de surface horizontale

Encadré 13 : Formule de PENMAN

Elle déduite de la combinaison entre le bilan radiatif et les conditions d'échange dans les couches basses de l'atmosphère s'écrit

$$ETP = \frac{d}{d+a} \frac{R_n}{L} + \frac{a}{d+a} (A+BU)(e'_a - e_a)$$

Expression dans laquelle :

- ETP = évapotranspiration potentielle en mm.jour-1
- Eb = évaporation potentielle d'un plan d'eau, en mm.jour-1
- L = chaleur latente de vaporisation (en calories par 0,1 gr d'eau)
- a = coefficient psychrométrique ($\approx 0,5$ mm Hg.°C-1)
- d = $\frac{\Delta e'}{\Delta T}$ = pente de la courbe de saturation de la vapeur d'eau à la température de l'air

en mm Hg.°C⁻¹

- Rn = rayonnement net en cal.cm⁻².jour⁻¹
- U = vitesse du vent à 2m au-dessus du sol en m.s⁻¹
- A et B = coefficients numérique valant respectivement
A = 0,175; B = 0,184 pour une végétation : type gazon court
- e'_a = pression de vapeur d'eau saturante à la température de l'air (mbar)
- e_a = pression de vapeur d'eau réelle dans l'air (mbar)

La formule de PENMAN implique l'évaluation du rayonnement net Rn. Lorsque Rn n'est pas mesuré au niveau de la station météorologique, on peut l'évaluer par la relation:

$$R_n = (1-\alpha)R_g - R_b$$

Dans laquelle :

A : albédo de la surface envisagée.

Rb : bilan radiatif en grande longueur d'onde de la surface évaporante, en cal.cm⁻².jour⁻¹, calculé par la formule empirique

$$R_b = \varepsilon \sigma T^4 \left(0,56 - 0,092 \sqrt{e_a} \right) \left(0,1 + 0,9 \frac{n}{N} \right)$$

- Dans laquelle :
- ε = pouvoir émissif de la surface (0,95 à 0,98)
 - σ = constante de STEFAN-BOLTZMANN = $1,18.10^{-7}$ cal.cm⁻².jour⁻¹
 - e_a = tension de vapeur en mm Hg
 - T = température absolue en °Kelvin
 - n/N = insolation relative
 - n = nombre réel d'heures d'insolation
 - N = nombre possible d'heures d'insolation fonction du mois de l'année et de la latitude du lieu (voir annexe 4 ; tableau A2.2)

Rg est le rayonnement solaire ou rayonnement global. Lorsque Rg n'est pas mesuré au niveau de la station météorologique, on peut l'évaluer par la relation:

$$R_g = \left(0,25 + 0,50 \frac{n}{N} \right) R_a$$

avec Ra = Rayonnement extra terrestre fonction du mois de l'année et de la latitude du lieu (voir annexe 4 ; tableau A2.3)

Le Logiciel CROPWAT, associé à la base de données climatique CLIMWAT, permet de calculer l'évapotranspiration en automatique et donne le programme des irrigations pour un certain nombre de cultures les plus courantes. Le logiciel et la base de données sont accessibles librement et gratuitement sur le site de la FAO.

<http://www.fao.org/ag/AGL/aglw/cropwat.stm>
<http://www.fao.org/ag/AGL/aglw/climwat.stm>

Cet outil a été utilisé pour calculer l'évapotranspiration ETP et le déficit climatique P-ETP connaissant par ailleurs la pluie P fournie également par la base de données pour 13 sites au Maroc (Annexe 5): Agadir, Cabo-Jubi, Casablanca, Ifrane, Kasbah Tadla, Marrakech, Mekhnès, Ouarzazate, Oujda, Rabat, Sidi-Ifni, Tanger et Tan-Tan.

La Figure 4 reprend l'évapotranspiration, la pluie et le déficit climatique à Casablanca. Il apparaît que de novembre à février, les pluies P sont supérieures à l'ETP. L'Annexe 5 reprend les valeurs de P, ETP et P-ETP mensuels pour 13 sites au Maroc.

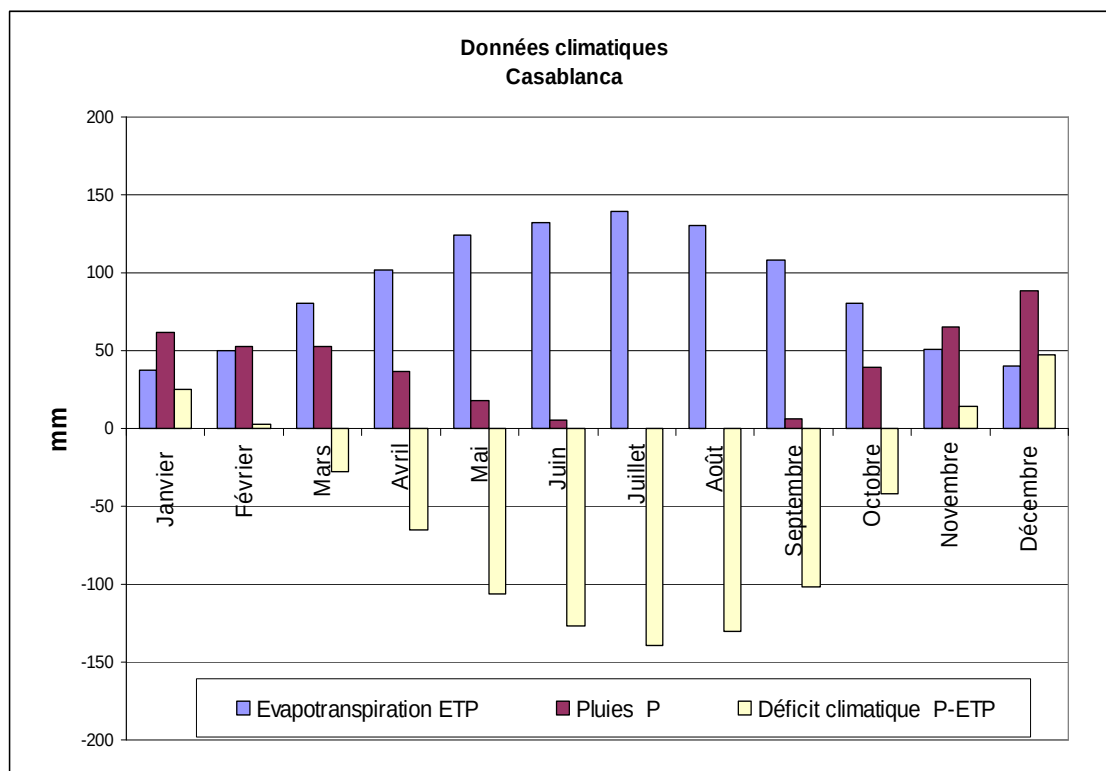


Figure 4: Evapotranspiration (ETP), Pluies (P) et déficit climatique (P-ETP) à Casablanca

Le passage de l'ETP à l'ETM se fait par l'introduction d'un coefficient cultural K_c par la relation :

$$ETM = K_c.ETP$$

Nous renvoyons aux publications de la FAO pour l'évaluation des coefficients K_c . L'Annexe 6 décrit succinctement l'évaluation de K_c et donne des valeurs pour différentes cultures.

Le Tableau 10 reprend les coefficients K_c pour un certain nombre de cultures au Maroc tout au long de leur phase de croissance.

Tableau 10 : Coefficient Kc pour les principales cultures au Maroc

Cultures	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Agrumes	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,68	0,66	0,65	0,65	0,65	0,67	0,70
amandier	0,40	0,40	0,85	0,95	1,05	1,15	1,15	1,15	1,10	0,90	0,85	0,40
avoine	0,40	0,40	1,05	1,05	0,25						0,40	0,40
bersim	0,60	0,70	0,90	1,00	1,00					0,60	0,60	0,60
Betterave à sucre				0,36	0,85	1,20	1,15	0,95	0,75			
blé	0,40	0,40	1,05	1,05	0,25						0,40	0,40
culture maraîchère	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
luzerne	0,50	0,60	0,70	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	1,00	0,80	0,70
maïs			0,30	0,55	1,20	0,96	0,60					
olivier			0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	0,70			
orge	0,40	0,40	1,05	1,05	0,25	0,25					0,40	0,40
Palmier dattier	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,90
Pomme de terre			0,50	0,75	1,15	1,15	0,81					
Rosacée (poirier, pommier)			0,50	0,50	0,75	1,00	1,10	1,10	1,10	0,85		
sorgho			1,00	1,10	1,20	1,20	1,10					

Exemple de calcul

Soit à réutiliser les eaux épurées d'une petite ville de 10.000 EH ayant les caractéristiques quantitatives de rejet repris au tableau 11.

Tableau 11 : Caractéristiques quantitatives des rejets

EH = Population totale (EH)	10000
Cj = Consommation journalière (l/EH)	110
Tp = Taux de raccordement à l'eau potable	0,95
Te = Taux de raccordement à l'égout	0,9
Pd = Production journalière d'eau usée domestique (m³/j)	941
Ti = Taux production eau industrielle (%)	10%
Pj = Production journalière d'eau usée (m³/j)	1035

Production d'eau usée

La production journalière d'eau usée (P_j) tient compte des eaux usées domestiques et des eaux usées industrielles et est donnée par la relation :

$$P_j = P_d.(1 + T_i)$$

Avec :

$$Pd = EH.Cj.Tp.Te.$$

La production d'eau usée mensuelle (Pt) est trouvée en multipliant les valeurs journalières par le nombre de jours dans le mois (Tableau 12).

Tableau 12 : Production d'eau usée mensuelle

Mois	Nombre jours dans le mois	Production d'eau usée (Pt)
Déc.	31	32 071
Janv.	31	32 071
Fév	28	28 967
Mars	31	32 071
Avril	30	31 037
Mai	31	32 071
Juin	30	31 037
Juillet	31	32 071
Août	31	32 071
Sept	30	31 037
Oct.	31	32 071
Nov.	30	31 037
Total	365	37 7611

Assolement et système d'irrigation

L'assolement dans l'exemple traité comprend 60% de cultures fourragères (Bersim et luzerne) irrigué par aspersion (efficacité d'irrigation de 70%) et 40% de cultures maraîchères (Poivron, haricot vert, courgette et aubergine) irriguée au goutte à goutte (efficacité d'irrigation de 90%).

Besoins en eau

Le besoin net en eau (Bn) est la quantité nette d'eau nécessaire à la culture pour sa croissance. Bn est calculé en fonction des besoins en eau de chaque culture et de la superficie occupée par la relation :

$$Bn = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^m ETM_i . Si$$

Avec :

- Bn = besoins nets en eau d'irrigation (m³/ha)
- ETM_i = évapotranspiration de la culture i (m³/ha)
- Si = superficie occupée par la culture i (ha)
- S = Superficie total irriguée (ha)

Le besoin brut en eau d'irrigation (Bb) est alors calculé par la relation :

$$Bb = \sum_{i=1}^n \frac{Bn_i}{E_i}$$

Avec :

Bn_i = besoins nets d'irrigation des cultures irriguées avec le système d'irrigation i
en m³/ha

E_i = efficience d'application de l'eau par le système d'irrigation i .

Le tableau 13 reprend les besoins mensuels bruts (Bb) en eau des cultures calculés de cette façon. Dans notre exemple, l'efficience E est prise égale à 90% pour l'irrigation goutte à goutte et de 70% pour l'irrigation gravitaire. Le maximum des besoins en eau se situe en juillet avec 3 015 m³/ha et le minimum en décembre avec 1 126 m³/ha.

Tableau 13 : Besoins brut en eau des cultures (m³/ha)

	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Total
Cultures fourragères													
Bersim	1057	829	1064	686						1064	829	829	6357
Luzerne	286	329	521	1243	1686	2571	2857	3343	3143	2000	1686	907	20571
Total fourrages	1343	1157	1586	1929	1686	2571	2857	3343	3143	3064	2514	1736	26929
Cultures maraîchères													
Poivron	800	911	978	1033	1222	900				490	644	744	7723
Haricot vert			1556	1922	1633								5111
Courgette					889	1604	1356	1356					5204
Aubergine		611	722	833	889	1056	1111	1167	1278	1111			8778
Total maraîchage	800	1522	3256	3789	4633	3560	2467	2522	1278	1601	644	744	26817
Besoins bruts en eau (<i>Bb</i>) (m³/ha)	1126	1303	2254	2673	2865	2967	2701	3015	2397	2479	1766	1339	26884

3.1.2. Analyse des options d'utilisation des eaux épurées : avec ou sans stockage

Il est possible d'envisager 3 options d'utilisation des eaux épurées en irrigation :

Option 1 : l'eau épurée est utilisée en totalité pour irriguer des superficies de cultures qui diffèrent tout au long de l'année en fonction des besoins bruts en eau. En été, lorsque les besoins en eau sont élevés, les superficies irrigables sont faibles. Inversement, en hiver lorsque les besoins en eau sont faibles, les superficies que l'on peut irriguer avec le même volume d'eau sont alors élevées. La surface irrigable sans stockage (S_{ss}) variera de 10,6 ha en juillet à 28,5 ha en décembre (Tableau 12 et Figure 5).

La surface irrigable sans stockage (S_{ss}) est calculée, pour le mois considéré, par la relation :

$$S_{ss} = \frac{Pt}{Bb}$$

L'avantage de cette option est de permettre l'utilisation de la totalité des eaux usées sans procéder au stockage. L'inconvénient est qu'elle nécessite la mise en place de système d'irrigation sur 29 ha et qu'une partie de cette superficie devra être irriguée avec de l'eau conventionnelle en provenance de la nappe par exemple. Avec l'hypothèse d'équiper 28,5 ha, la quantité d'eau en provenance de la nappe pour subvenir aux besoins en eau des cultures est reprise aussi au Tableau 14

Tableau 14 : Production d'eau usée mensuelle et surface irrigable

Mois	Nombre de jours par mois	Production d'eau usée (Pt)	Besoins bruts en eau (Bb)(m³/ha)	Surface irrigable S_{ss} (ha)	Eau d'irrigation en provenance des eaux usées (m³)	Eau d'irrigation en provenance de la nappe (m³)
Déc.	31	32071	1126	28,5	32079	0
Janv.	31	32071	1303	24,6	37122	5051
Fév.	28	28967	2254	12,9	64215	35248
Mars	31	32071	2673	12,0	76152	44081
Avril	30	31037	2865	10,8	81622	50585
Mai	31	32071	2967	10,8	84528	52457
Juin	30	31037	2701	11,5	76950	45913
Juillet	31	32071	3015	10,6	85896	53825
Août	31	32071	2397	13,4	68289	36218
Sept.	30	31037	2479	12,5	70625	39588
Oct.	31	32071	1766	18,2	50312	18241
Nov.	30	31037	1339	23,2	38147	7110
Total	365	377611	26884		765941	388320

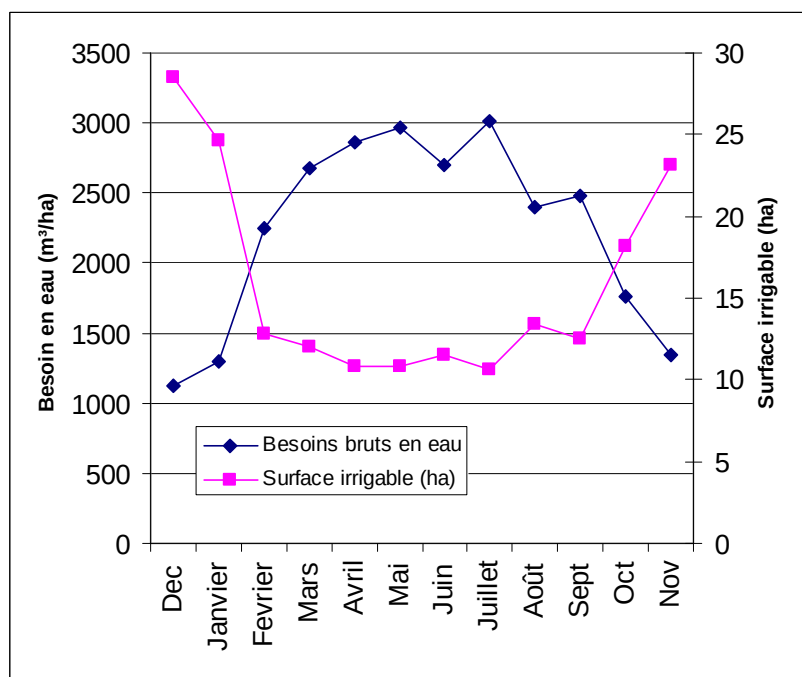


Figure 5 : Besoins en eau des cultures et surface irrigable

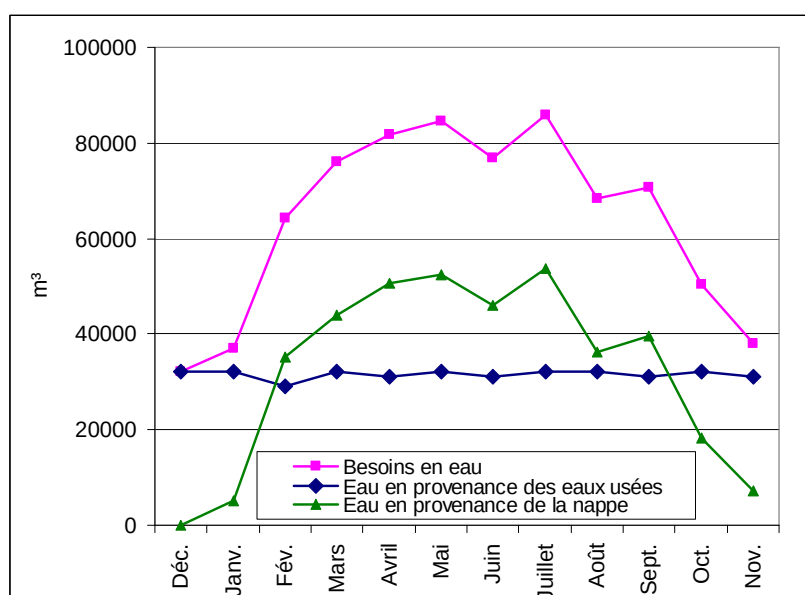


Figure 6 : Besoin en eau des cultures et provenance des eaux d'irrigation pour une superficie irriguée de 28,5 ha.

Option 2 : Seule la superficie sans stockage (Sss) minimum est équipée en matériel d'irrigation, sans stockage des eaux épurées. Sss minimale est définie pendant le mois où les besoins en eau sont maximum (juillet dans l'exemple) et est égale à 10,6 ha. L'avantage de cette option est une économie en matériel d'irrigation puisque seulement la superficie irrigable toute l'année est équipée et les frais de stockage sont évités. L'inconvénient est la perte d'eau non utilisée pour l'irrigation, rejeté dans le milieu naturel en dehors du mois le plus contraignant (juillet). Dans l'exemple cité, le volume d'eau épurée non utilisé pour l'irrigation et rejeté dans le milieu naturel (V_r) varie de 0 m³ en juillet à 20.095 m³ en décembre (voir [Tableau 15](#) et [Figure 7](#)). Par rapport à la production d'eau usée mensuelle (P_t), cela correspond à 0% en juillet à 63% en décembre. Le volume annuel non utilisé pour l'irrigation et rejeté

correspond à 24,3% du volume total d'eau épurée annuel. Toutefois, l'eau excédentaire peut, lorsque cela est possible, être utilisé pour l'irrigation des espaces verts avoisinants.

$$\% \text{ d'eau rejetée} = \frac{V_r}{P_t} \cdot 100$$

Tableau 15 : Bilan en eau sans stockage pour une superficie irriguée de 10,6 ha tout au long de l'année

Mois	Production eau usée = P_t	Besoin brut en eau des cultures = B_b	Volume d'eau usée en excès rejeté = V_r	% d'eau rejeté
Déc.	32071	11976	20095	57%
Janv.	32071	13864	18207	63%
Fév.	28967	23976	4992	17%
Mars	32071	28434	3637	11%
Avril	31037	30477	559	2%
Mai	32071	31563	508	2%
Juin	31037	28734	2302	7%
Juillet	32071	32071	0	0%
Août	32071	25499	6572	20%
Sept.	31037	26373	4663	15%
Oct.	32071	18791	13280	41%
Nov.	31037	14247	16789	54%
Total	377611	286005	91606	24,3%

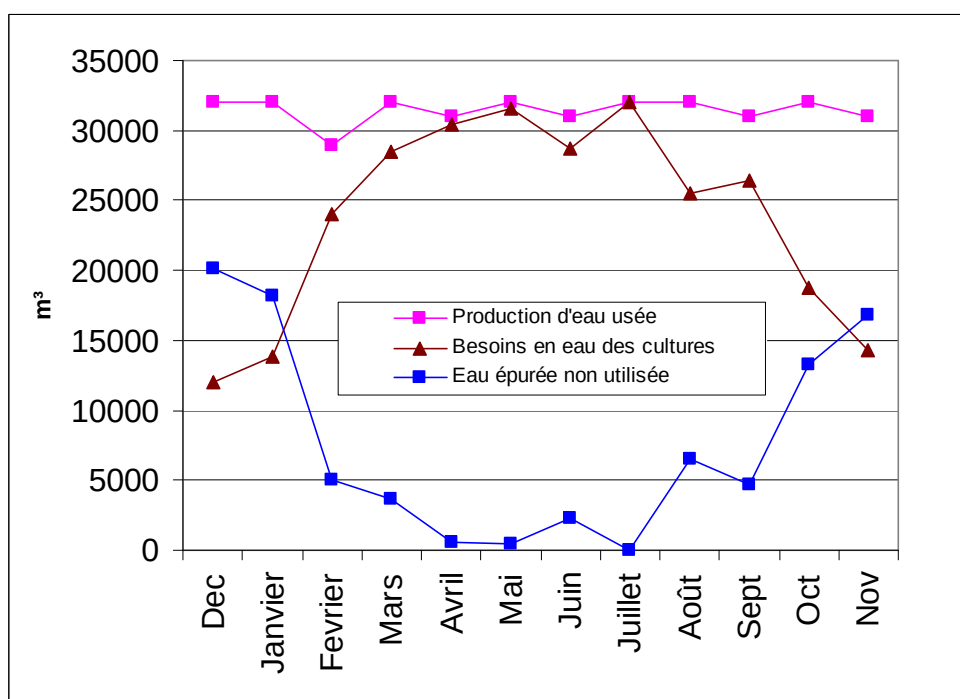


Figure 7 : Besoins en eau des cultures et eau en excès pour une superficie irriguée de 10,6 ha.

Option 3 : Le surplus d'eau épurée qui dépasse les besoins est stocké pour être utilisé pendant les périodes de forte demande en eau par les plantes. Ce stockage permet d'augmenter la superficie irrigable. Avec stockage la superficie irrigable (S_{as}) est calculée sur base de la production annuelle d'eau épurée P_t (voir Figure 11) et du besoin brut annuel en eau B_b (voir Tableau 10, par la relation :

$$Sas = \frac{Pt}{Bb}$$

Avec :

Pt = production annuelle d'eau épurée (m³)
 Bb = besoin annuel brut en eau usée (m³/ha)

Dans l'exemple traité, la superficie irrigable avec stockage des eaux épurées est (Tableau 5) :

$$Sas = \frac{377.611}{28.884} = 14ha$$

Soit une superficie irrigable de 32% supérieure à la superficie irrigable sans stockage qui est de 10,6 ha. En comparant la production d'eau usée et le besoin en eau brut en eau des cultures (Figure 8), il apparaît un besoin en eau inférieur à l'eau disponible d'octobre à janvier.

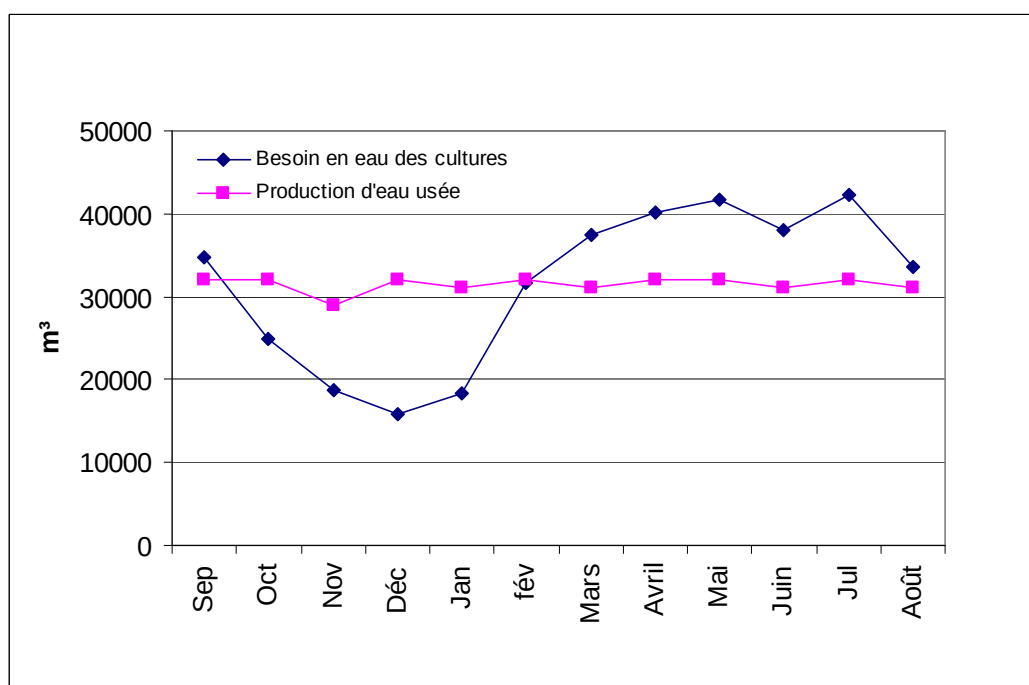


Figure 8 : Besoin en eau des cultures comparés à la production d'eau usée pour une superficie irrigable de 14 ha

Comme le montre bien la Figure 9, le volume de stockage est calculé à partir de l'eau épurée en excès cumulée sur l'année. La pente de la droite AB donne le débit moyen annuel et la distance T en m³ donne le volume du réservoir à prévoir pour régulariser le débit d'eau épurée. Dans notre exemple, le volume de stockage à prévoir est de 36.000 m³. Cela correspond à un ratio de stockage de 2560 m³/ha.

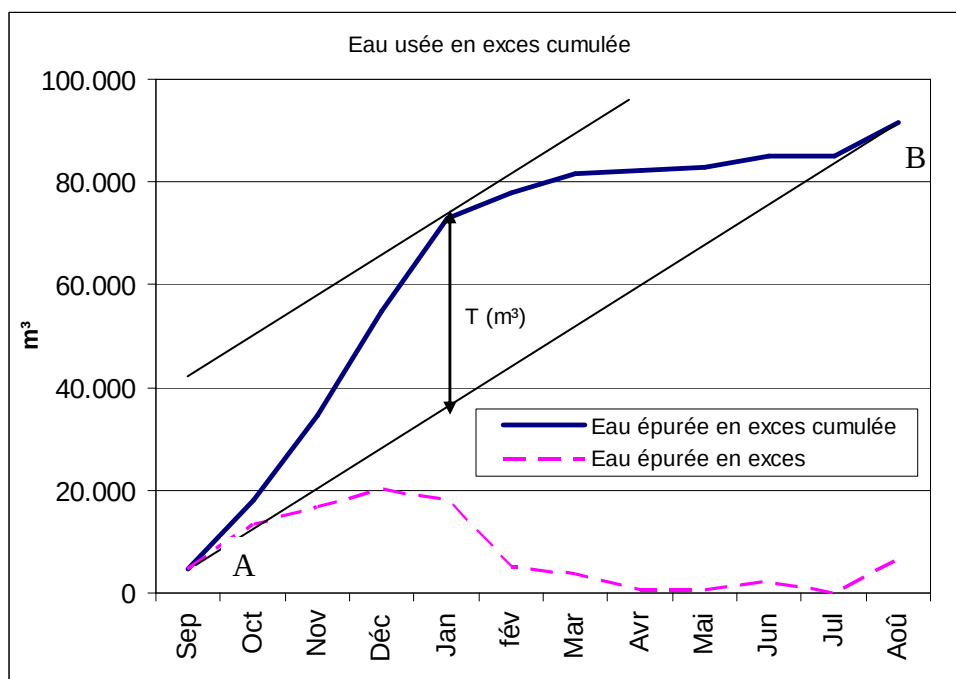


Figure 9 : Illustration graphique de l'excès mensuel et cumulé des eaux épurées en fonction des mois de l'année

3.1.3. Autres considérations sur l'option de stockage

3.1.3.1. Action sur la qualité de l'eau

Des essais de stockage de courte et longue durée réalisés en Tunisie (Trad et al, 1998) ont montré que le stockage en bassins constitue un traitement complémentaire pouvant réduire la contamination microbienne des eaux à un niveau permettant leur utilisation pour l'irrigation de toutes les cultures sans restriction.

Des essais ont été menés pour déterminer la durée et les conditions de décontamination des effluents secondaires (provenant d'une station à boues activées et contenant $4,4 \times 10^4$ à $5,5 \times 10^5$ coliformes fécaux dans 100 ml) ainsi que les impacts d'un stockage saisonnier sur la qualité des eaux. L'objectif étant, à chaque fois, d'obtenir un abattement à 3 Ulog pour que la charge bactérienne atteigne une limite compatible avec une utilisation agricole non restrictive selon les recommandations de l'O.M.S. Pour des températures se situant entre 22 et 25°C, l'abattement des coliformes fécaux est de l'ordre de 3 Ulog pour un temps de séjour de 3 jours et pour une profondeur inférieure à 1,5 m. Lorsque la température atteint 25,5 à 28°C, le même abattement est réalisé en 8 jours. En dessous de 20°C, la décontamination est fortement ralentie : il faut 17 jours pour un abattement de 3 Ulog à une température de 12,5 à 18°C. Le stockage saisonnier d'une durée de 2 à 7 mois n'affecte pas la bonne qualité bactériologique des eaux : après décontamination, aucune prolifération des indicateurs bactériens n'est constatée durant le stockage. Le degré de salinité ne subit également pas de changements appréciables (les pluies compensant globalement l'évaporation). En hiver, les deux indicateurs bactériens de pollution fécale ont un comportement similaire, mais en été, les streptocoques fécaux ont une plus longue persistance dans les eaux par rapport aux coliformes fécaux.

Dans un bassin profond, la décontamination est beaucoup plus lente dans la zone anaérobie (en deçà de 150 cm). Il est donc recommandé de construire des bassins de faible profondeur (max. 1,5 m) pour traiter les effluents secondaires avec un temps de séjour réduit. Des essais menés en Tunisie (Trad, 2002) ont montré l'efficacité du stockage dans l'élimination des bactéries fécales. Après 8 jours de stockage, une qualité d'eau de classe A selon la directive de l'OMS est obtenue (Figure 10)

Un stockage de longue durée (plusieurs jours) peut être propice au développement d'algues. Ce développement peut être évité en recouvrant le bassin d'un plastique opaque.

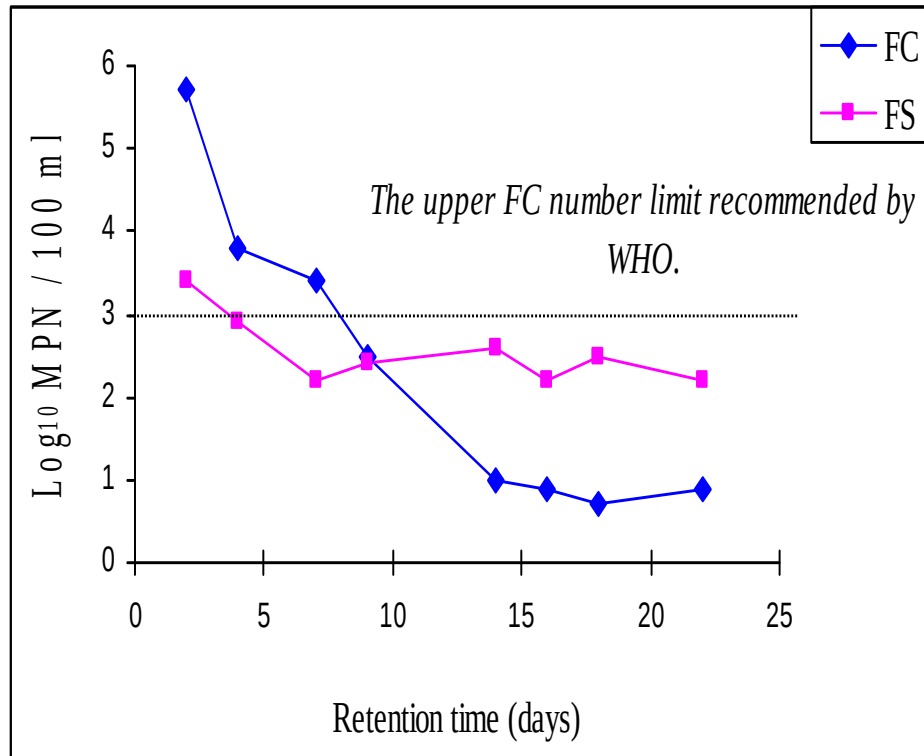


Figure 10 : Élimination des bactéries fécales par stockage des eaux usées épurées.
(Source Trad, 2002)

3.1.3.2. Coût du stockage

Pour un bassin de stockage de 5 m de profondeur, de pente 1/1 ayant la configuration reprise à la Figure 11, le coût est repris à la Figure 12. Ce coût est basé sur les hypothèses suivantes :

- coût de terrassement : 30 DH/m³
- coût de la géomembrane, compris la pose : 60 DH/m²

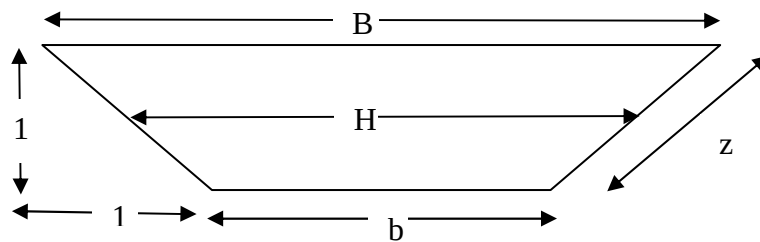


Figure 11 : Coupe transversale d'un bassin de stockage trapézoïdal

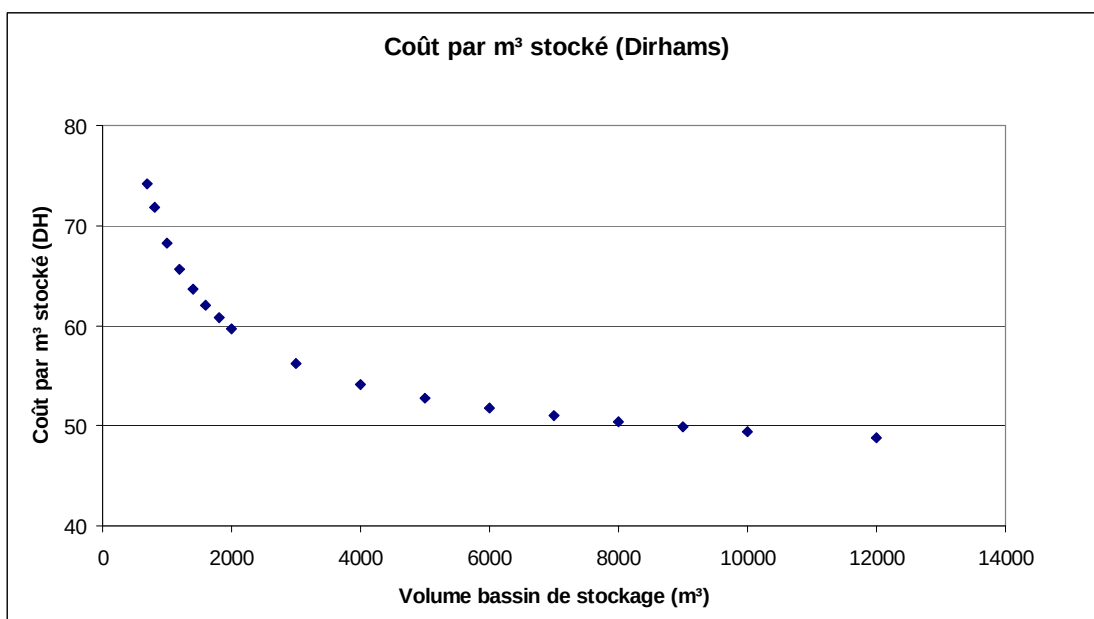


Figure 12 : Variation du coût du bassin de stockage en fonction du volume

Il est évident que l'investissement pour la mise en place d'infrastructures de stockage se justifie surtout lorsque l'eau épurée peut être valorisée par la production de cultures fortement rémunératrices utilisant des moyens de production modernes.

3.2. Valorisation des éléments nutritifs

3.2.1. Considérations générales

Le contenu nutritif de l'eau usée pouvant dépasser les besoins de la plante, l'irrigation avec ces eaux peut poser un problème de pollution de la nappe souterraine. L'excès de nutriments peut causer un développement végétatif excessif, retarder la maturité ou encore réduire la qualité des récoltes. Il est donc nécessaire de considérer les éléments nutritifs présents dans l'effluent comme partie intégrante de la fertilisation des cultures irriguées. A cet égard, l'analyse de l'eau usée est donc nécessaire au moins une fois en début de la saison de croissance des cultures.

Les concentrations excessives en phosphore et potassium ont des conséquences agronomiques ou environnementales minimales, puisque les excès sont retenus par le sol. Le phosphore pose un problème lorsqu'il est véhiculé sous forme soluble ou particulaire vers les lacs et retenus de barrage où il peut, avec l'azote, déclencher le processus d'eutrophisation.

Ainsi, connaître la concentration en N dans l'eau usée et gérer convenablement les apports sont des actes essentiels pour vaincre les problèmes associés aux concentrations élevées en N.

La teneur **en azote** dans les eaux épurées dépend du système de traitement et se situe généralement entre 20 et 60 mg/l sans traitement tertiaire de dénitrification. La connaissance et la détermination de la forme de l'azote minéral véhiculé par les eaux usées épurées sont d'importance capitale. En effet, selon la filière de traitement adoptée, les eaux peuvent contenir l'ammonium (cas de lagunage) ou les nitrates (cas de l'infiltration - percolation). Dans le premier cas, il est peut être recommandé d'utiliser des inhibiteurs de la nitrification mais ce n'est envisageable que pour des cultures à haute valeur ajoutée étant donné le prix de ces produits. Dans le second cas, deux possibilités sont offertes: mettre en place un système de dénitrification au niveau de la station d'épuration ou mélanger les eaux usées épurées avec une proportion d'eau de nappe ou de surface pour diminuer la teneur en nitrates. Un traitement tertiaire de dénitrification peut s'avérer nécessaire si les ressources en eau souterraines doivent être protégées.

Comme il sera montré plus loin, il est fortement recommandé d'établir un bilan de masse d'azote dans le but de protéger la nappe contre la contamination par les nitrates. L'objectif consiste à garder la concentration nitrique des eaux à un niveau inférieur à 50 mg/l ou de garantir un taux d'accroissement annuel nul dans le cas où la concentration nitrique actuelle dépasse 50 mg/l.

La concentration en **phosphore** dans les eaux usées urbaines ayant subi un traitement biologique secondaire varie de 6 à 15 mg/l (25-70 mg/l P_2O_5). L'évaluation de P dans l'eau usée doit être conjointe à l'analyse de sol réalisée pour le conseil de fumure.

La concentration en **potassium** dans les eaux usées épurées n'a pas d'effet néfaste sur les plantes ou l'environnement. C'est un macronutriment qui affecte positivement la fertilité du sol et est essentiel à la croissance et à la qualité des cultures. La concentration en K dans les eaux épurées secondaires est 10 à 30 mg/l (12-36 mg/l K_2O). Ces apports doivent être pris en considération dans le programme de fertilisation établi en fonction des besoins des cultures.

Les eaux usées épurées contiennent habituellement des concentrations suffisantes en soufre, zinc, cuivre et autres micronutriments. Comme il a été souligné auparavant, une attention particulière doit être portée au bore. Les eaux épurées d'origine urbaine contiennent suffisamment de bore pour corriger toutes déficiences. Toutefois, de fortes concentrations en bore peuvent créer des problèmes de phyto - toxicité. Pour résoudre le problème d'excès de bore, les mêmes mesures utilisées pour combattre les fortes teneurs en sels solubles sont

recommandées (sélection des cultures, lessivage, programmation des irrigations et choix d'un système d'irrigation adéquat).

3.2.2. Calcul des quantités d'éléments nutritifs et bilan de masse

Dans le cadre de bonnes pratiques agricoles permettant une valorisation des éléments nutritifs apportés par les EUT et une minimisation des risques de pollution des eaux, l'évaluation des quantités disponibles et mobilisables par les cultures doit tenir compte de :

- La teneur initiale des éléments nutritifs dans le sol ou sa fertilité naturelle.
- La fourniture des éléments nutritifs par le sol au cours de la saison de croissance de la culture
- Le besoin de la culture pour un rendement optimal économique (voir ordres de grandeur en **Annexe 8**).
- Les apports des éléments nutritifs par les eaux usées épurées selon les besoins en eau de la culture
- L'efficacité d'utilisation des éléments nutritifs en relation avec celle de l'eau qui, elle-même, dépend du système d'irrigation (FAO, 2003).

On se propose d'illustrer dans l'**Encadré 14** la méthode de calcul pour le cas des éléments nutritifs majeurs (azote, phosphore et potassium).

Encadré 14 : Illustration de la méthode de calcul des quantités d'éléments nutritifs mobilisables par les cultures

Exemple de composition des EUT issues du projet pilote de lagunage à Ouarzazate

Paramètres	Valeur
pH	8.3
CE (mS/cm)	2.6
P-PO ₄ (mg/l)	12.5
P tot. (mg/l)	48.5
NTK (mg/l)	35
N-NH ₄ (mg/l)	20
N-NO ₃ (mg/l)	1.4

Données de base :

- Culture de tomate en plein champ
- On suppose un besoin en eau de 5 000 m³/ha (BE)
- **Besoins en éléments majeurs N, P et K et richesse du sol:**
 - o N : 200 kg/ha
 - o P₂O₅ : 120 kg/ha (2.29 est le facteur de conversion de P en P₂O₅ (unité fertilisante conventionnelle))
 - o K₂O : 100 kg/ha (1.2 est le facteur de conversion de K en K₂O (unité fertilisante conventionnelle))
- Richesse du sol et fourniture du sol :
 - o N: 100 kg/ha (N minéral initial + N minéral provenant de la minéralisation d'azote organique natif du sol)
 - o P₂O₅ : 21 Kg/de phosphore assimilable
 - o K₂O : 96 kg/ha sous forme de potassium échangeable

Quantités d'éléments nutritifs apportées par l'EUT :

Formule générale de calcul : (Cen (mg/l) x BE) / 1000

- o Cp : concentration en élément nutritif dans l'EUE (mg/l)
- o BE (besoin en eau en m³/ha)

Quantités apportées :

N minéral : 107 kg/ha sous forme minérale (N-NH₄ et N-NO₃) et 47 kg/ha provient de la minéralisation de N organique (NTK – N minéral) en supposant un taux de minéralisation de l'ordre de 45%.

N minéral total apporté par les EUE : 153 kg/ha

P₂O₅ : P-PO₄ assimilable converti en P₂O₅ : 143 kg/ha et 55 kg/ha provenant de la minéralisation de Organique (le taux de minéralisation considéré est de 10%)

P₂O₅ total apporté par les EUE : 198 kg/ha

K₂O (négligeable pour ce cas)

Bilan récapitulatif :

Eléments	Apports	Total	Besoins (exportation par la culture)	Excès
N	Sol (100) + EUE (47 + 107)	253	200	+ 53 (azote potentiellement lixiviable)
P ₂ O ₅	Sol (21) + EUE (198)	198	120	+ 78
K ₂ O	Sol (96) + EUE (0)	96	100	- 4

Nous constatons, pour ce cas, que l'apport de 5000 m³/ha d'eau fournit plus que le besoin de la culture en azote et en phosphore. Ceci requiert une optimisation comme il sera développé ci-après.

Mémo :

- Si on applique des produits d'amendement organique (fumier, composts, boues etc.), il est nécessaire de comptabiliser la fourniture des éléments nutritifs de ces produits pour l'estimation des quantités d'éléments nutritifs disponibles. Un exemple pour le cas des boues sera donné plus loin.

Dans un but de rationalisation de la fertilisation des cultures, le Ministère de l'agriculture prépare en collaboration avec l'Officie Chérifien des Phosphates un programme de mise en place d'une carte de fertilité des sols au niveau national. L'objectif de cartes de fertilité des sols consiste à déterminer la déficience ou la richesse des sols marocains en éléments fertilisants pour les principales cultures pratiquées au niveau des différentes zones agro - écologiques définies plus haut (Tableau 3 et **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) et par conséquent de contribuer à la rationalisation de l'utilisation des engrais et leur bonne formulation. Ces cartes et les bases de données qui leur sont associées représentent une excellente opportunité pour les projets de réutilisation.

3.2.3. Estimation des excédents d'éléments nutritifs (autres méthodes)

Si l'irrigation peut être optimisée sur la base d'une évaluation adéquate des besoins en eau et d'un bon choix du système d'irrigation, il est aussi important que le volume d'eau appliqué véhicule une quantité d'éléments nutritifs qui, additionnée à la richesse du sol et à sa capacité naturelle de fournir l'azote et le phosphore par voie de minéralisation, ne génère pas un excès par rapport au potentiel de mobilisation par les cultures. En effet, comme déjà mentionné, l'excès d'azote par exemple constitue un risque certain de migration de l'ion nitrate vers la nappe. Pour cela, deux approches peuvent être adoptées pour l'évaluation du risque de lixiviation des nitrates vers la nappe :

- Une approche basée sur le bilan de masse par culture (**Encadré 14** et **Encadré 15**)
- Une approche basée sur un bilan de masse globale d'azote (apports – exports) dans le périmètre de réutilisation (**Encadré 16**).

Encadré 15 : Méthode de bilan de masse pour l'estimation de la lixiviation des nitrates pour une culture donnée

Ce bilan à la fois simple dans sa formulation et sévère dans le sens où toutes les voies de pertes (sorties d'azote du système sol - plante) sont négligées à l'exception d'azote mobilisé par la culture. Le bilan s'écrit comme suit :

$$Ndl = N_{app} + N_m - N_{pv}$$

Où :

- Ndl : Azote disponible pour la lixiviation (Kg/ha)
- Napp : Azote appliqué avec les EUT (Kg/ha)
- Nm : Azote minéralisé à partir de l'azote organique apporté par les EUT et l'azote organique natif du sol (Kg/ha)
- Npv : Azote prélevé par la culture (Kg/ha)

Le bilan azoté doit être mis en relation avec le bilan hydrique pour calculer le volume d'eau disponible pour la dilution.

$$Vdd = V_i + V_p - V_{et}$$

Où :

- Vdd est le volume d'eau disponible pour la dilution
- Vi est la hauteur d'eau d'irrigation ;
- Vp est la hauteur d'eau de pluie ; et
- Vet est la hauteur d'eau évapo – transpirée (besoin en eau de la culture)

Ainsi, la quantité de nitrates potentiellement lixiviation (pour une culture c) dans les eaux de lessivage

(eaux infiltrées au delà de la zone racinaire) est évaluée par la formule suivante :

$$(\text{NO}_3) \text{ PLc} = (\text{Ndl} / \text{Vdd}) \times 4.43$$

Le coefficient 4.43 permet de convertir N-NO₃ en ion nitrate

Cette quantité ((NO₃) PLc) peut être estimée pour les différentes cultures pour les classer selon le risque de génération d'un excès d'azote potentiellement lixiviable.

Encadré 16 : Bilan global d'azote à l'échelle du périmètre de réutilisation

Ce bilan consiste à comparer les apports totaux des éléments nutritifs (en particulier l'azote) ou charge totale (CT) avec les quantités exportées (Qexp) par toutes les cultures du périmètre de réutilisation.

$$\text{CT} = (\text{Da} * \text{Cen}) / 1000$$

CT: Charge totale des éléments nutritifs (Kg/ha.an)

Da: Dose d'eau appliquée (litres/ha.an)

Cen: Concentration en élément nutritif (mg/l)

Si CT >> Qexp il faut revoir les cultures pratiquées et l'assolement adopté.

3.3. Optimisation de l'eau et des éléments nutritifs

Il arrive que malgré toutes les recettes pratiques exposées plus haut, il est parfois difficile d'optimiser l'eau et les éléments nutritifs en particulier l'azote sans avoir recours à des dilutions des eaux chargées en azote et aussi en sels. Pour cela, il est recommandé d'élaborer, sur la base des données disponibles à l'échelle nationale et dans la région considérée des fiches culturales dont un modèle est présenté dans l'**Encadré 17**.

Encadré 17 : Fiche culturale du maïs (Zea mays L.)

Sol

Le maïs convient à tous les types de sol, toutefois il préfère les sols profonds riches en matières organiques à pH à tendance acide (≈6).

Semis

Après labour et façons superficielles normales, avec un écartement entre rangs de 70 et 90 cm. Le poids de semence à utiliser peut varier fortement (15 à 30 kg à l'ha), le nombre de plantes recherchées à l'hectare variant entre 50000 et 80000 plantes. Souvent en irrigation, on souhaite obtenir 70000 plantes.

Saison de croissance

La récolte intervient généralement en juillet, il est important, en maïs fourrager, de ne pas dépasser le stade pâteux du grain. Généralement, ce stade est atteint en 100 jours.

Encadré 17 (suite) : Fiche culturale du maïs (Zea mays L.)**Besoins en eau (exemple de la région d'Agadir)**

Les besoins bruts en eau du maïs dépendront du type d'irrigation. En irrigation gravitaire (efficacité de 50%) les besoins bruts seront de 929 mm en moyenne et en irrigation localisée (efficacité de 90%) les besoins bruts sont moins élevés à 516 mm se répartissant de la manière suivante :

Mois	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Total
Kc	0,30	0,55	1,20	0,96	0,60	
ETP (Agadir)	102,3	114,0	136,4	129,0	139,5	621,2
ETM - Besoins nets (mm)	30,7	62,7	163,7	123,8	83,7	464,6
Besoins bruts en irrigation gravitaire (efficacité 50%) (mm)	61,38	125,4	327,4	247,7	167,4	929,2
Besoins bruts en irrigation localisée (efficacité 90%) (mm)	34,1	69,67	181,9	137,6	93,0	516,2

Besoins en éléments nutritifs

Les besoins théoriques sont les suivants : N : 175 kg/ha - P₂O₅ : 85 kg/ha - K₂O : 100 kg/ha
L'azote du sol n'est pas pris en compte dans cet exemple. Il y a lieu, bien sûr, de tenir compte de la réserve en N, P et K pour ajuster au mieux la fertilisation.

Irrigation gravitaire (efficacité de 50%)**Apport d'éléments nutritifs par l'eau usée**

Exemple d'eau usée 40 mg/l N, 10 mg/l P (soit 22.9 mg/l P₂O₅) et 30 mg/l K (soit 36 g/l K₂O).

Mois	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Total	Besoins théoriques
kg ha ⁻¹ N	25	50	131	99	67	372	175
kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	14	29	75	57	38	213	85
kg ha ⁻¹ K ₂ O	22	45	118	89	60	335	100

Les besoins en éléments fertilisants sont évidemment dépassés en N, P₂O₅ et K₂O. Il est donc proposé d'arrêter l'irrigation avec eau usée au 20-25 mai. On aura donc les apports minima suivants :

Mois	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Total	Besoins théoriques
kg ha ⁻¹ N	25	50	98			173	175
kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	14	29	56			89	85
kg ha ⁻¹ K ₂ O	22	45	88			165	100

Les besoins en azote et en P₂O₅ sont équilibrés mais les apports en K₂O restent élevés. Toutefois, l'apport excessif en K₂O ne risque pas de polluer la nappe puisque ces éléments sont fixés par le sol.

Les irrigations suivantes – à partir du mois de fin mai, juin et juillet - interviennent avec de l'eau de nappe dont les teneurs en N, P₂O₅ et K₂O sont faibles (une analyse des teneurs est souhaitable).

Encadré 17 (suite) : Fiche culturale du maïs (Zea mays L.)**Irrigation localisée (efficience de 90%)**

Exemple d'eau usée 40 mg/l N, 10 mg/l P (soit 22,9 mg/l P_2O_5) et 30 mg/l K (soit 36 g/l K_2O).

Mois	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Total	Besoins théoriques
kg ha ⁻¹ N	14	28	73	55	37	206	175
kg ha ⁻¹ P_2O_5	8	16	42	32	21	118	85
kg ha ⁻¹ K_2O	12	25	65	50	33	186	100

Les besoins en éléments fertilisants sont dépassés en N, P_2O_5 et K_2O . Il est donc proposé d'arrêter l'irrigation avec eau usée à la fin du mois de juin. On aura donc les apports minima suivants :

Mois	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Total	Besoins théoriques
kg ha ⁻¹ N	14	28	73	55		169	175
kg ha ⁻¹ P_2O_5	8	16	42	32		97	85
kg ha ⁻¹ K_2O	12	25	65	50		152	100

Les besoins en azote et en P_2O_5 sont pratiquement équilibrés mais les apports en K_2O restent élevés. Toutefois, ces apports sont plus faibles par rapport à l'irrigation gravitaire mais restent excessifs en regard des besoins théoriques.

Les irrigations suivantes – à partir du mois de juillet - interviennent avec de l'eau de nappe dont les teneurs en N, P_2O_5 et K_2O sont faibles (une analyse des teneurs est souhaitable).

4.0. Valorisation des boues

4.1. Composition typique des boues

Pour avoir une idée de la composition des boues et sa variation avec le type de boue, il a été jugé utile de donner quelques exemples cités par Souidi et Bazza (2003) et qui sont rapportés dans les **Tableau 16, Tableau 17 et Tableau 18.**

Tableau 16 : Composition des principaux types de boues (ADEME, 2001)

Paramètre	Boue liquide	Boue pâteuse	Boue sèche	Boue chaulée	Boue composée
Matière sèche (% de matière brute)	2 à 7	16 à 22	90 à 95	25 à 40	40 à 60
Matière organique (% de MS)	65 à 70	50 à 70	50 à 70	30 à 50	80 à 90
Matière minérale (% de MS)	30 à 35	30 à 50	30 à 50	50 à 70	10 à 20
pH	6.5 à 7.0	7 à 8		9 à 12	6 à 7
C/N	4 à 5		4 à 6	8 à 11	15 à 25
N* (kg/tonne de matière brute)	2 à 4	8 à 12	3 à 5	6 à 9	5 à 9
P ₂ O ₅ kg/tonne de matière brute)	2 à 3	6 à 9	5 à 7	6 à 10	6 à 8
K ₂ O kg/tonne de matière brute)	0.9	0.8	5	1	1 à 2
CaO (kg /tonne de matière brute)	1 à 3	5 à 15	40 à 60	60 à 90	10 à 30
MgO kg/tonne de matière brute)	0.5	1 à 2	5	1 à 2	1 à 2

*N : 80 à 90 % sous forme organique et 10 à 20 % sous forme d'azote ammoniacal si la boue est liquide

Tableau 17 : Exemple de composition des boues séchées et chaulées en Algérie (Dridi et Zerrouk, 2000)

Paramètre	Valeur
pH	6.9
CE (dS/m à 25 °C)	4.01
Matière sèche (%)	88.7
Matière organique (%)	56.4
N total (%)	2.87
P (mg/kg)	355
K (mg/kg)	964

Tableau 18. Exemple de composition de boues en Tunisie (Gabteni et Gallali, 1988)

Paramètre	Valeur
pH	6.9
Carbone organique (%)	26.2
N total (%)	2.25
C/N	11.6

Tableau 19 : Exemple de composition de boues issues d'une station d'épuration des eaux usées par lagunage au Sud du Maroc (Soudi et Jemali, 1998)

Paramètre	Unité	Valeur
pH	-	6.7
Matière organique	(% de MS)	38.6
Azote total	(% de MS)	1.47
P ₂ O ₅	(% de MS)	0.76
K ₂ O	(% de MS)	0.28
MgO	(% de MS)	1.26
CaO	(% de MS)	6.71
Eléments traces		
Zn	(mg/kg de MS)	156
Cu	(mg/kg de MS)	93.8
Ni	(mg/kg de MS)	33.4
Co	(mg/kg de MS)	17.4
Mn	(mg/kg de MS)	224.9
Pb	(mg/kg de MS)	172.1
Cd	(mg/kg de MS)	2.6

4.2. Contraintes à gérer pour la valorisation des boues

Deux contraintes importantes à gérer pour une bonne valorisation des boues : la teneur en éléments traces métalliques et les pathogènes. Si les pathogènes peuvent être éliminés moyennant des traitements adéquats des boues, les éléments traces métalliques restent à maîtriser par une bonne connaissance de leurs teneurs dans les boues et par une rationalisation des doses à appliquer.

4.2.1. Les éléments traces métalliques (ETM)

Les ETM les plus rencontrés dans les boues résiduelles sont : Cd, Cu, Mo, Ni, Pb et Zn. Le problème lié à ces éléments s'exprime de manière plus ou bien marquée en fonction des propriétés du sol (pH, matière organique, Capacité d'Echange Cationique), de l'espèce de la plante, du stade phénologique et du type d'élément trace

Selon une synthèse réalisée par Soudi et Bazza (2003), plusieurs normes fixant les valeurs seuils dans les sols et les valeurs limites dans les boues sont disponibles à l'échelle internationale et régionale et se caractérisent par une très grande variabilité. Soulignons à ce niveau que le Maroc ne dispose pas encore de normes de boues.

Pour le cas des normes des éléments traces dans les sols, celles qui semblent les plus pertinentes sont les normes de EPA (1977) qui introduisent la notion de valeurs limites cumulatives (Tableau 20). Ces normes considèrent le paramètre CEC du sol (capacité d'Echange Cationique) qui renseigne sur la capacité d'adsorption et de chélation des métaux lourds dans les complexes organo - minéraux.

Tableau 20 : Valeurs cumulatives limites pour les principaux métaux lourds applicables aux sols cultivés en fonction de la CEC*(d'après US. EPA, 1977)

M é t a l	Teneur limite cumulative dans le sol en Kg/ha en fonction de la CEC		
	CEC < 5	5 < CEC < 15	CEC > 15
Pb	560	1120	2240
Zn	280	560	1120
Cu	140	280	560
Ni	140	280	560
Cd	5	10	20

**Capacité d'Echange Cationique exprimée en méq/100 g de sol et pour des valeurs de pH du sol maintenues supérieures à 6.5*

Il est déduit de ces normes que dans les sols de texture sableuse, ayant généralement une CEC faible, des valeurs cumulatives plus faibles sont tolérées que dans les sols plus argileux de CEC plus élevée et donc de capacité d'adsorption plus importante. Ces normes ne sont valables que dans les sols ayant un pH supérieur à 6.5. En effet, la plupart des métaux lourds sont solubles et donc toxiques à des pH acides. Lorsque le pH est basique, la plupart de ces métaux précipitent et deviennent faiblement réactionnels et donc très peu bio disponibles.

Des tentatives de propositions de normes d'éléments traces pour la région d'Afrique du Nord et du proche – orient ont été faites par Soudi et Bazza (2003) en adaptant les normes basées sur la notion de Teneur Limite Cumulative (TLC) dans le sol et en considérant les paramètres CEC et pH du sol.

La plupart des sols du proche orient et d'Afrique du nord, à l'exception de quelques zones isolées, le pH des sols est à dominance neutre à franchement basique. Dans ce contexte, les seuils tolérés peuvent être majorés par rapport à la plupart des valeurs limites des pays du nord de l'Europe où les sols sont plus acides.

Sur base du paramètre pH, les valeurs limites proposées en Espagne (annexe 7) peuvent être adoptées. Avec ces normes, une marge de sécurité peut être garantie, considérant la nature des sols de la région du proche orient.

Pour le cas des sols sableux, ces normes peuvent être retenues telles quelles et peuvent être majorées de 25 % à 50 % pour les sols de texture argileuse dotée d'une Capacité d'Echange Cationique (CEC) supérieure à 20 méq/100 g de sol. En effet, le **Tableau 20** TLC montre qu'un accroissement de la CEC d'environ 10 méq/100 g permet de doubler les teneurs cumulatives maximales. En effet, ce paramètre détermine l'intensité d'adsorption des cations métalliques.

Sur la base des normes exposées et des considérations développées plus haut, et compte tenues des lacunes en matière de recherche dans le contexte des régions considérées, les Teneurs Limites Cumulatives (TLC) guides, rapportées dans le **Tableau 21** sont proposées en attendant le processus de finalisation.

Tableau 21 : Teneurs limites cumulatives des principaux éléments traces dans les sols recevant les boues séchées et/ou compostées (propositions pour les pays du proche orient et d'Afrique du nord)

Élément trace métallique	TLC (mg/kg de sol) pour des sols à pH supérieurs à 7	
	CEC inférieure à 20 méq/100 g	CEC supérieure à 20 méq/100 g
Cd	3	6
Cr	150	300
Cu	210	410
Hg	1.5	3
Ni	112	224
Pb	300	600
Zn	450	900

Les valeurs de la première colonne correspondent aux normes espagnoles pour des sols à pH > 7.
Les valeurs de la seconde colonne sont le double de la première colonne selon une interpolation des normes rapportées par US. EPA (1977).

A titre de comparaison, le Tableau 22 rapporte les normes tunisiennes enregistrées NT 106.20 (2002), exprimées en termes de concentration totale maximale admissible (CMA) et terme de flux maximum cumulé (FMC) après 10 années.

Tableau 22 : Normes tunisiennes d'éléments traces métalliques

Éléments traces	CMA (mg/Kg de MS de boue)	FMC (g/m ²)
Cd	20	0.06
Cr	500	3.00
Cu	1000	3.00
Hg	10	0.03
Ni	200	0.60
Pb	800	3.00
Zn	2000	9.00

4.2.2. Les pathogènes

Les boues, véhiculent à l'état frais (non traitées), plusieurs types de pathogènes : des bactéries, des virus et des parasites. Ces organismes se concentrent en général dans les boues par sédimentation dans le bassin anaérobie. Le **Tableau 23** relate la liste de pathogènes généralement rencontrée dans les boues résiduaires non traitées.

Tableau 23 : Agents pathogènes communément rencontrés dans les boues résiduaires et les maladies qui leur sont associées (Selon différentes sources citées par Hunt (1984))

Type d'organisme	Pathogène
Bactérie	Salmonelle Mycobactérium Shigella Esherichia Coli Leptospire
Virus	Enterovirus Adénovirus Virus hépatique
Protozoaire	Toxoplasme Giardia
Nématodes ou helminthes	Ascaris Toxocara
Cestodes	Ténia

Selon la synthèse réalisée par Soudi et Bazza (2003), les bactéries et les virus n'ont pas une grande survie dans le sol à cause de leur faible compétitivité (Elliott and Ellis, 1977). Leur survie dépend également de plusieurs facteurs édaphiques et environnementaux : la température, l'ensoleillement, l'humidité, la matière organique du sol, le pH et la texture du sol (Watson, 1980; Pahren *et al.* 1979).

Le **Tableau 24** relate des ordres de grandeur de la durée de survie des pathogènes dans le sol et sur la plante.

Tableau 24 : Durée de survie des pathogènes dans le sol et sur la plante (Doran et al. 1976)

Organisme	Durée de survie (en jours)	
	Surface de la plante	Dans le sol
Bactéries		
Salmonelle	1-42	7-168
Shigella	1-7	
Mycobacterium	10-49	90-450
Leptospira		15-43
Erysipelothrix		21
Virus		
Entérovirus	4	27-170
Poliovirus		32
Parasites		
Entamoeba histolytica	3	8
Ascaris lumbricoides ova	27-35	2-6 <u>ans</u>

Une tentative de faire le point des travaux sur la survie des bactéries et des virus dans le sol, après application des boues résiduaires, permet d'émettre les principaux constats suivants :

- la période d'application conditionne de manière significative la survie des virus. Le temps de survie varie de quelques jours pour une application estivale, à trois mois pour une application hivernale ;
- les températures élevées au niveau de la surface du sol et la dessiccation sont des facteurs importants d'élimination des virus et des bactéries;
- La texture du sol, et par conséquent la surface spécifique ainsi que la CEC, favorisent l'adsorption des virus ce qui augmente leur survie tout en les gardant hors hôtes;
- La contamination des eaux souterraines par les virus est possible dans les sols de texture très grossière.

On peut déduire de ce qui précède que les conditions climatiques, notamment la température et l'ensoleillement, dans la région d'Afrique du Nord et du Moyen Orient sont très favorables à l'élimination des bactéries et des virus.

Comme il a été souligné auparavant, certains traitements des boues permettent une élimination quasi-totale des germes pathogènes. La synthèse réalisée par Soudi (2003) et selon le rapport stratégique de gestion des boues en Tunisie (Ghariani et al. 2006), les traitements les plus adaptées aux pays d'Afrique du nord sont : le séchage naturel, le séchage en lits plantés, le séchage sous serre ventilée avec retournement télécommandée des boues (Procédé Thermo-system) et le compostage ou co-compostage avec d'autres matières organiques. Certaines de ces options requièrent un prétraitement préalable (déshydratation mécanique, séchage partiel en lits de séchage, chaulage etc.). Toutefois, pour plus de prudence, il est jugé utile d'associer aux normes des éléments traces métalliques des normes de parasites.

Selon les directives françaises (Arrêté du 8 janvier 1998 relatif aux épandages de boues sur les sols agricoles), les seuils de références pour les teneurs en micro-organismes pathogènes dans les boues hygiénisées sont rapportés dans le **Tableau 25**.

Tableau 25 : Seuils de référence pour les teneurs en micro-organismes dans les boues (Directives françaises selon l'arrêté du 8 janvier 1998 relatif aux épandages de boues sur les sols agricoles)

Salmonelles	Entérovirus	œufs d'helminthes pathogènes viables
< 8 NPP/10 g MS	< 3 NPPUC/10 g MS	< 3/10 g MS

NPP : Nombre le Plus Probable

NPPUC : Nombre le Plus Probable d'Unités Cytopathiques

MS : Matière Sèche

Xanthoulis (données non publiées) propose de faire le rapprochement entre les normes en vigueur pour l'irrigation avec les eaux usées et l'épandage de boues sur les terres agricoles. La norme pour l'utilisation d'eaux usées en irrigation limite les parasites à une concentration inférieure à 1oeuf/l. L'application d'une lame d'irrigation de 1000mm pour le cas d'une culture annuelle, apporte dès lors une concentration en oeufs de parasites inférieure à 10 millions oeufs/ha ($10\,000\text{ m}^2/\text{ha} \times 1000\text{ l/m}^2 \times 1\text{ oeuf/l}$). Un apport de boue limité à cette même valeur impliquerait qu'un épandage de 10T de MS/ha garderait la concentration en œufs de parasites dans les boues inférieure à 1000 oeufs/kg, soit 1oeuf/g de MS.

Selon les normes microbiologiques tunisiennes, les boues doivent avoir une concentration en Coliformes Fécaux inférieur à 2×10^6 CF (en NPP/g de matière sèche). Cette norme est pratiquement le double de celle préconisée en Egypte.

Soulignons pour conclure qu'il est devenu nécessaire et urgent de faire une bonne caractérisation des différents types de boues au Maroc et d'instituer des normes marocaines pour les différentes options de valorisation.

4.2.3. Valeur fertilisante des boues

Cette partie est reprise de manière quasi-intégrale du manuel récemment réalisé par Soudi (2003) pour la FAO.

L'apport de boues constitue une source très appréciable d'éléments fertilisants et particulièrement azotés et phosphatés. Comme il sera constaté ultérieurement, les teneurs en azote varient en fonction du type de boues : les boues liquides sont généralement plus riches en cet élément que les boues séchées et/ou compostées. Le **Tableau 26** montre des ordres de grandeur de la composition des boues en éléments nutritifs majeurs.

Tableau 26 : Concentrations moyennes en éléments majeurs (N, P₂O₅ et K₂O) dans les boues résiduaires (valeurs moyennes d'après plusieurs références)

Type de boue	Humidité (%)	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)
Boue brute séchée à l'air	5 - 40	1.0	0.6 – 0.8	0.2 – 0.4
Boue ayant subi une digestion anaérobique et séchée à l'air	5 - 30	1.1	1.0 – 1.2	0.1 – 0.2
Boue liquide ayant subi une digestion anaérobique	95	0.25	0.5 - 0.7	0.01 – 0.02

Azote

La valeur fertilisante azotée des boues résiduaires, par rapport à un engrais minéral, pour l'année de l'épandage, varie en fonction de plusieurs facteurs. Ces derniers sont : la nature des boues, les conditions climatiques et culturales, la fraction d'azote organique facilement minéralisable et leur teneur initiale en azote minéral. Le taux annuel de minéralisation des principaux types de boues est rapporté dans le **Tableau 27**.

Tableau 27 : Taux de minéralisation de l'azote durant la première année d'épandage

Type de boues	Taux de minéralisation annuel de l'azote	Référence
Boue liquide	40 à 60 %	ADEME (2001)
Boue pâteuse	30 à 35 %	ADEME (2001)
Boue sèche	25 à 40 % 40 à 60 %	ADEME (2001) Soudi et Jemali (1998)
Boue chaulée	30 à 40 %	ADEME (2001)
Boue compostée	10 %	ADEME (2001)

La fraction d'azote organique minéralisable et donc bio-disponible durant la première année qui suit l'incorporation des boues dans le sol est estimée pour les différents types de boues comme le montre le **Tableau 28**.

Tableau 28 : Fraction estimée (en %) d'azote susceptible d'être disponible pour la culture après différents temps d'application et pour différents types de boues (Evanylo, 1999).

Période après application (années)	Boue stabilisée à la chaux	Boue de digestion aérobie	Boue de digestion anaérobique	Boue compostée
0 - 1	30	30	20	10
1 - 2	15	15	10	5
2 - 3	7	8	5	3

La méthode de calcul de la valeur fertilisante équivalente en azote est rapportée dans l'Encadré 18.

Encadré 18 : Valeur fertilisante azotée (VFN) des boues résiduaires
$VFN = N_{org}(\text{boues en } \%) \times TMa + N \text{ minéral}$ TMa : Taux de Minéralisation annuel (%). Des ordres de grandeur de TMa sont rapportés dans le tableau 24. Année 1. $VFN = N_{org}(\%) \times 40 \% + N \text{ minéral total}$ Année 2. $VFN = N_{org}(\%) \times 40 \% + 20 \% \text{ de Norg appliqué la première année} + N \text{ minéral total}$ Année 3. $VFN = N_{org}(\%) \times 40 \% + 20 \% \text{ de Norg appliqué la deuxième année} + 5\% \text{ de Norg appliqué la première année} + N \text{ minéral total}$ Années 4 et 5. $VFN = N_{org}(\%) \times 40 \% + 20 \% \text{ de Norg appliqué la troisième année} + 3 \% \text{ de Norg appliqué la première année} + N \text{ minéral total}$

Phosphore

La concentration en phosphates dans les boues a tendance à augmenter à cause du développement et de la diversification d'usage des détergents synthétiques assez pourvus en phosphates. Comme il a été mentionné auparavant, la concentration en phosphore varie en fonction du type de boue et de la composition des eaux usées brutes. Contrairement à l'azote, le phosphore se trouve dans les boues sous forme minérale (70 à 90 % de phosphore total).

Si la teneur en azote des boues est de 1 à 1.5 fois celle du phosphore, les teneurs des plantes cultivées en azote sont presque de 10 fois celles du phosphore. Ainsi, si la dose des boues appliquée est déterminée sur la base des besoins en azote, la quantité de phosphore peut être excessive par rapport aux besoins des cultures usuelles.

La quantité de phosphore assimilable apportée par les boues est calculée en adoptant un taux de 50 % du phosphore total présent dans la boue. Ainsi, une tonne de boue contenant 2 % de phosphore sur base de matière sèche, apporterait la première année l'équivalent de 23 kg de P_2O_5 /ha ($1\,000 \text{ kg} \times 0.02 \times 0.5 \times 2.29$). Le facteur 2.29 permet de convertir le phosphore (P) en unités fertilisantes conventionnelles exprimées en P_2O_5 .

Potassium

Les concentrations en potassium sont généralement faibles à cause des pertes dans les effluents liquides. Il est en général considéré qu'une proportion de 90% du potassium présent dans la boue est disponible la première année d'épandage. Un facteur multiplicatif de 1.2 est utilisé pour convertir le potassium (K) en unité fertilisante conventionnelle (K_2O).

Valeur fertilisante du compost des boues

La valeur fertilisante totale du compost des boues englobe la valeur minérale, exprimée en termes de fourniture d'éléments nutritifs, et la valeur organique qui se traduit par l'amélioration des propriétés physiques et physico-chimiques du sol (Tableau 29).

La valeur minérale du compost varie en fonction de sa qualité qui dépend de la nature du mélange de matières premières (boues et autres déchets) et de la composition initiale des boues. Les analyses du compost permettent de faire une évaluation exacte des éléments nutritifs qu'il contient. A titre indicatif, les ordres de grandeur des concentrations en quelques éléments nutritifs dans le compost des boues sont les suivants :

- N : 1 à 2 %
- P : 0.6 à 1.5 %
- K : 0.5 à 1 %
- Mg : 1 à 1.5 %
- Ca : 3 à 7 %

Etant difficile de quantifier la valeur organique, elle est usuellement équivalente à au moins à 2 fois la valeur minérale.

Tableau 29 : Principales actions du compost sur les paramètres de la qualité des sols

Paramètre	Action du compost et conséquences
Stabilité structurale	• Augmentation de la stabilité structurale : amélioration de l'aération du sol, de l'activité biologique et racinaire • Atténuation de l'érodibilité des sols • Amélioration de la circulation de l'eau
Rétention d'eau	• Augmentation de la rétention d'eau, en particulier dans les sols sableux
Capacité d'Echange Cationique	• Augmentation de la teneur en substances humiques, colloïdes chargés négativement qui augmentent la rétention de cations. Cette action est significative dans les sols sableux
Activité biologique	• Augmentation de la résistance des plantes à certaines maladies par le développement des saprophytes, concurrençant les agents phytopathogènes

Doses d'application

Les étapes de calcul de la dose de boues à appliquer sont illustrées par l'exemple rapporté dans l'**Encadré 19**. Il est toutefois important d'avertir le lecteur sur le fait que les valeurs indiquées dans cet exemple ne constituent pas des recettes. En effet, elles peuvent changer en fonction du niveau de production agricole, du type de sol, du climat et de la qualité des boues. Aussi, comme il a été mentionné plus haut, des considérations liées aux concentrations métalliques doivent être prises en compte pour éviter un dépassement des teneurs limites cumulatives (TLC). L'exemple montre seulement la démarche de calcul basée sur la composition des boues et les besoins de la culture.

Encadré 19 : Exemple de calcul de dose de boues pour une culture de maïs (exemple repris intégralement de Fiche technique 2.1., ADEME (2001))

Etape 1. Calcul des besoins totaux pour un rendement objectif de 90 quintaux/ha

N : 180 Kg/ha (l'azote minéral résiduel dans le sol est pris en compte)

P2O5 : 90 kg/ha

K2O : 60 kg/ha

Etape 2. Connaissance et caractérisation de la boue (cas d'une boue liquide à 6 % de matière sèche)

N : 7 % avec une biodisponibilité de 40 %

P2O5 : 5.8 % de la matière sèche avec une biodisponibilité de 70 %

K2O : 0.9 % avec une biodisponibilité de 100 %

Etape 3. Choix de la dose

Dose satisfaisant le besoins en azote : 107 m³/ha

Dose satisfaisant le besoin en phosphore : 37 m³/ha

Dose satisfaisant le besoin en potassium : 111 m³/ha

Conclusion : la dose la plus faible est retenue soit 37 m³/ha. Cet exemple illustre le rôle de phosphore comme facteur limitant de la dose à appliquer. (37 m³ /ha correspond à 2.2 tonnes de Matière Sèche/ha)

Etape 4. Calcul de la fumure minérale complémentaire

– Azote : 120 kg/ha

– Phosphore : 0

– Potasse : 40 kg

Remarque : Pour les cultures suivantes, il est nécessaire de tenir compte des reliquats d'azote et de phosphore apportés par les boues

Le **Tableau 30** donne quelques ordres de grandeurs de doses de boues permettant de satisfaire les besoins en azote et en phosphore pour un certain nombre de cultures.

Tableau 30 : Doses d'application de boues permettant de satisfaire les besoins en azote et en phosphore pour quelques cultures (Di Pinto et Minnini, 1985)

Culture	Dose de boues pour équilibrage (Tonnes/ha)	
	Azote	Phosphore
Maïs	6.67	4.44
Blé	4.85	3.56
Céleri	7.77	7.32
Luzerne	12.5	3.56
Moyenne pour diverses cultures	5.27	2.80

Mode d'application des boues

Le compost doit être enfoui à 10 ou 15 cm de profondeur pour éviter son dessèchement en conditions chaudes, garantir une minéralisation optimale et une libération d'éléments nutritifs.

Les méthodes adoptées pour le traitement des boues peuvent influencer significativement la modalité d'application. Le facteur important réside dans le niveau d'élimination de l'eau. Ainsi deux modes d'application sont communément connus :

- L'épandage des boues liquides à la surface des sols et/ou l'injection dans le sol des boues transportées dans des camions - citernes.
- L'incorporation et l'enfouissement des boues séchées (thermiquement ou à l'air libre) ou compostées dans le sol à une profondeur d'environ 10 cm à 15 cm pour minimiser les pertes d'azote. Dans ce cas, il est recommandé de bien mélanger le compost au sol pour éviter d'avoir une couche de compost isolée, qui risque de déclencher une production de gaz nocifs en conditions anaérobiques.

Chacun de ces modes d'application, dicté par le traitement préalable des boues, a des avantages et des inconvénients comme il est indiqué dans l'**Encadré 20**.

Encadré 20 : Modes d'application des boues : avantages et inconvénients
<i>Application de boues liquides :</i> - Apport d'eau au site d'épandage - Coût de manipulation et de transport élevé - Conservation des éléments nutritifs - Risque élevé de pollution nitrrique des eaux souterraines et particulièrement lorsque les sols sont sableux et le niveau piézométrique de la nappe est élevé <i>Application de boues séchées et/ou compostées</i> - Réduction du pool d'éléments nutritifs - Commodité de manipulation - Coût de transport faible <u>Remarques supplémentaires :</u> - L'application de boues doit être effectuée environ 14 jours avant la plantation - La minimisation du coût de manipulation et de transport compense, en général, largement les frais inhérents d'élimination de l'eau - Les boues séchées ou compostées jouent plus un rôle de conditionneur du sol améliorant ses propriétés physiques que fertilisant minéral

5.0. Evaluation des gains agronomiques de la réutilisation des EUT et de valorisation des boues

5.1. Bases de calcul des gains

Cas des EUT

L'évaluation des gains agronomiques générés par la réutilisation des EUT se base sur deux composantes :

- La valeur des unités fertilisantes apportées par l'eau traitée en considérant les prix des unités fertilisantes apportés par les engrais chimiques commercialisés.
- La valeur du mètre cube d'eau dans le contexte de réutilisation. Rappelons que celle-ci est variable selon que les coûts de l'eau conventionnelle.

Cas des boues

Pour les boues, le gain agronomique est évalué sur la base des deux composantes :

- La valeur minérale des boues qui correspond aux quantités d'éléments nutritifs potentiellement disponibles après incorporation des boues
- La valeur organique qui correspond à l'amélioration des propriétés physiques et physico-chimiques des sols. Comme il a été mentionné plus haut, celle-ci est au moins équivalente à deux fois la valeur minérale.

En plus de ces gains directs, le passage d'une agriculture pluviale (bour) ou à faible irrigation à une irrigation preenne avec les EUT génère inéluctablement un gain en terme d'accroissement des rendements des cultures.

5.2. Etude de cas réalisée pour la commune de Drarga (Soudi, 1999)

Cas des eaux usées épurées

Données de base :

- Les coûts estimatifs de l'eau d'irrigation et de la fertilisation des principales cultures pratiquées (Tableau 31)
- Prix de vente des eaux épurées de 0.5 DH/m³
-

Tableau 31 : Coûts estimatifs de l'eau d'irrigation et de fertilisation de quelques cultures irriguées dans le périmètre de Souss Massa (D'après le Service de Production Végétale de l'ORMVA - SM).

Culture	Coût de l'eau en Dh/ha	Coût fertilisation en Dhs/ha
Blé tendre	1190	1160
Maïs Grain	3290	3790
Maïs fourrager	4000	3990
Tomate en plein champ	4700	8730

- Prix des unités fertilisantes équivalentes apportées par les doses d'irrigation correspondant aux deux systèmes d'irrigation préconisés (gravitaire et localisé) en supposant une valorisation totale des éléments fertilisants véhiculés par les eaux épurées.

Gains en eau et éléments fertilisants

Ainsi, on calcule un gain total représentant la somme du gain net sur l'eau d'irrigation et du gain généré par l'apport d'éléments nutritifs (Tableau 32). Il ressort des résultats de calcul rapporté que le gain total varie de 2000 à 6000 Dirhams par hectare selon les cultures pratiquées. La différence entre les gains générés par les deux systèmes d'irrigation réside uniquement dans la différence entre les efficacités des deux systèmes et par conséquent dans les volumes d'eau et les quantités de fertilisants appliquées.

Un autre avantage d'ordre qualitatif lié à l'irrigation avec les eaux usées épurées et que nous n'avons pas comptabilisé réside dans l'efficacité d'apport d'éléments fertilisants solubles dans l'eau d'irrigation de la même manière que la technique de fertigation (irrigation fertilisante).

Tableau 32 : Gain économique de l'irrigation avec les eaux usées épurées

Culture	Irrigation gravitaire			Irrigation localisée		
	GN ¹ (Dh/ha)	GF ² (Dh/ha)	GT (Dh/ha)	GN ¹ (Dh/ha)	GF ² (Dh/ha)	GT (Dh/ha)
Blé tendre	750	1492	2242	Cultures irriguées par le système d'irrigation gravitaire		
Maïs grain	1588	3614	5140			
Maïs fourrager	1568	3572	5140			
Bersim	774	1539	2313			
Courgette	Cultures irriguées par le système d'irrigation localisée			677	1545	2222
Courge				611	1216	1827
Tomate				1553	3542	5095
Pomme de terre				940	2140	3080

GN : Gain Net sur l'eau ; GF : Gain en Fertilisants équivalents ; GT : Gains totaux (en Dirhams)

1 : Calculée sur base du prix de l'eau de pompage dans le Souss-Massa (0.70 DH/m³) et du prix de vente des eaux épurées (0.5 DH/m³)

2. Calcul effectué sur la base d'une valorisation totale des éléments fertilisants véhiculés par les eaux épurées

Gains en accroissement des rendements des cultures

Si on considère les faibles rendements de cultures pratiquées actuellement à cause du manque d'eau, du coût élevé des eaux de pompages et du faible taux d'encadrement technique des agriculteurs, on peut déduire que le projet de réutilisation des eaux épurées couplé à un soutien technique des techniciens de l'ORMVA du Souss Massa permettra aux agriculteurs d'atteindre des rendements beaucoup plus élevés que ceux obtenus actuellement. Le Tableau 33 donne une idée sur l'augmentation significative des rendements suite à l'irrigation avec les eaux usées épurées et à l'encadrement technique des agriculteurs.

Tableau 33 : Rendements actuels et escomptés pour les principales cultures à promouvoir dans le projet de réutilisation des eaux usées épurées

Culture	Rendement moyen actuel ⁽¹⁾	Rendement escompté ⁽²⁾
Blé tendre	8 à 16 Qx/ha	40 Qx/ha
Maïs grain	10 à 15 Qx/ha	50 Qx/ha
Maïs fourrager	10 Qx/ha	20 Qx/ha
Bersim	Non pratiqué	30 Qx/ha
Courgette	Peu pratiquée	35 T/ha
Courge	5 à 10 T/ha	25 T/ha
Tomate	10 à 25 T/ha	55 T/ha
Pomme de terre	Très peu pratiquée	35 T/ha

(1) valeurs moyennes de rendements issues des enquêtes auprès des agriculteurs concernés

(2) valeurs moyennes des rendements obtenus par les agriculteurs de performance moyenne en irrigué ; pour les cultures maraîchères, seules les cultures en plein champ sont considérées.

Qx : Quintaux, T : Tonne ; ha : hectare

Les augmentations des rendements s'accompagneront automatiquement d'une augmentation du revenu des agriculteurs.

Cas des boues co-composées avec les déchets verts agricoles

Pour la valorisation agricole de ces boues résiduelles sans risque sanitaire, leur compostage a été recommandé dans le contexte de l'étude. En effet, le processus de compostage permet une élévation de température à 65 – 70 °C pendant au moins 7 jours et donc une suppression totale de tous les germes pathogènes.

Etant donné le faible rapport C/N des boues, leur co - compostage avec les déchets ménagers ou avec les déchets verts agricoles produits par la zone des serres de bananier avoisinante a été recommandé pour optimiser le processus de compostage

Le compost obtenu peut être valorisée de deux manières différentes :

- Amendement organique des sols : les sols de la région dont la texture est dominée par la fraction sableuse sont relativement pauvres en matière organique. Ainsi, l'utilisation du compost comme produit d'amendement organique des sols permettra d'améliorer la fertilité physique (structure et rétention en eau) et chimique (pouvoir nutritionnel) des sols. Cette pratique d'amendement peut concerner aussi bien les sols de cultures que les sols d'arganeraie. ces derniers sont également pauvres en matière organique et méritent un amendement organique qui permettra en plus de l'amélioration de la fertilité chimique, de préserver les entités structurales du sol et l'augmentation et par conséquent l'atténuation de l'érosion éolienne. Les doses moyennes de compost varieront de 10 à 30 tonnes/ha. Ces doses dépendront également des teneurs en métaux lourds du compost produit conformément aux normes requises.
- Utilisation du compost dans les substrats de pépinières de cultures maraîchères et/ou forestières.

Le prix du compost peut être évalué à environ 200 Dh/tonne en moyenne. Ce prix peut varier de manière significative selon la qualité du compost.

6.0. Organisation et gestion d'un projet de réutilisation

6.1. Considérations générales

Quelle que soit les avantages et la rentabilité du projet de réutilisation des EUT, la gestion du périmètre irrigué doit être adéquate pour assurer sa durabilité. Pour cela, deux aspects sont importants à considérer :

- i. L'organisation de la distribution de l'eau et l'optimisation du réseau d'irrigation ; et
- ii. L'organisation des usagers de l'eau.

Deux principes directeurs permettent de mieux asseoir ces deux types d'organisation :

- La prise en compte de la tradition des agriculteurs de la région et de l'améliorer et l'adapter pour une bonne maîtrise de la distribution de l'eau en fonction de l'assolement adopté. *[En effet, on connaît au Maroc une tradition ancestrale de l'organisation de la distribution et du partage de l'eau. On connaît par exemple que les irrigants désignent un Gouadier ou Amazal qui gère la distribution de l'eau selon le principe amont aval si l'eau suffit à tous les usagers de l'aval du périmètre et qui peut prioriser le mois suivant ou l'année suivante les usagers n'ayant pas bénéficié de l'eau selon ce principe amont – aval.]* Dans certains cas, il est plus judicieux de tenir compte de ces pratiques tout en les rénovant. Comme il sera développé plus loin, la capitalisation de l'expérience des AUEA (Association des Usagers de l'Eau Agricole) adopté dans les zones de PMH mérité d'être capitalisée.
- Le choix d'un assolement sur la base des cultures à promouvoir mais aussi de manière à faciliter la distribution de l'eau.

6.2. Mode de distribution de l'eau

Le mode de distribution de l'eau varie selon que l'eau est régularisée ou non dans des bassins de stockage.

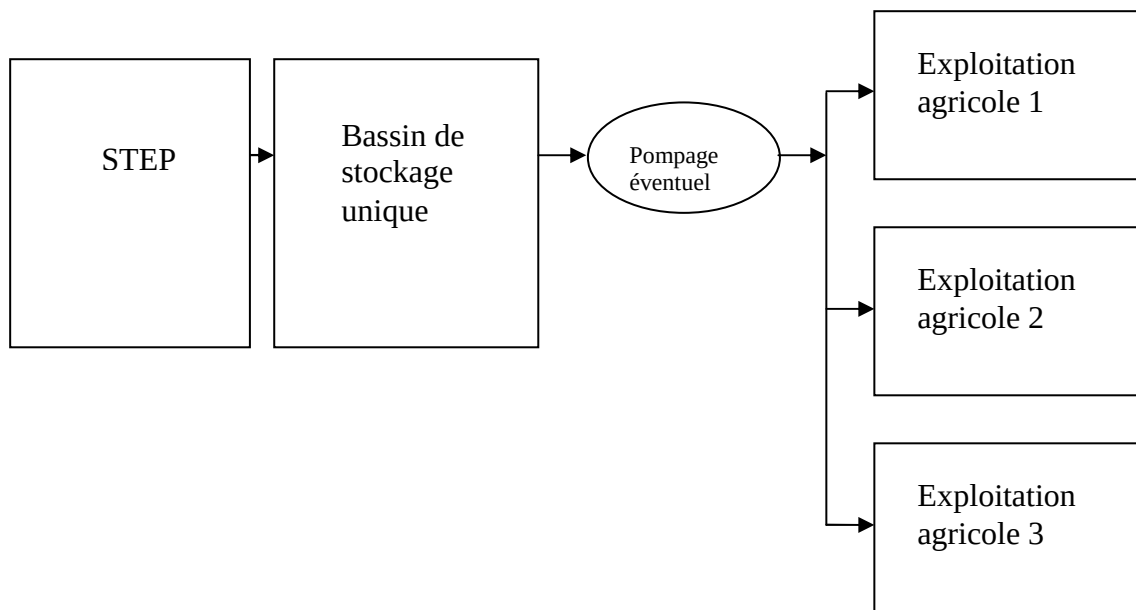
En absence de bassins de stockage

Les EUT sont acheminées, selon le calendrier des besoins des cultures, aux différentes exploitations agricoles avec à la tête de chaque exploitation un compteur permettant d'évaluer le volume débité. L'excédent des EUT est déversé dans le milieu récepteur en cas de présence d'un exutoire.

Cas de stockage de régularisation

Dans le cas où il est décidé un stockage des eaux épurées, celui-ci peut-être conçu en collectif au niveau de la station d'épuration ou en individuel au niveau de chaque exploitation agricole. Le stockage collectif (option 1) est bien adapté au système d'irrigation gravitaire mais est peu compatible avec des systèmes d'irrigation goutte à goutte qui demande une disponibilité en eau quotidienne. Le stockage au niveau de l'exploitation (option 2) permet une grande liberté d'accès à l'eau puisque chaque exploitation dispose de son stockage individuel. La disponibilité en eau étant quotidienne, il est possible d'utiliser tout système d'irrigation que ce soit le gravitaire ou le goutte à goutte.

Option 1 : un bassin de stockage collectif



Option 2 : Des bassins de stockage individuels au niveau de chaque exploitation

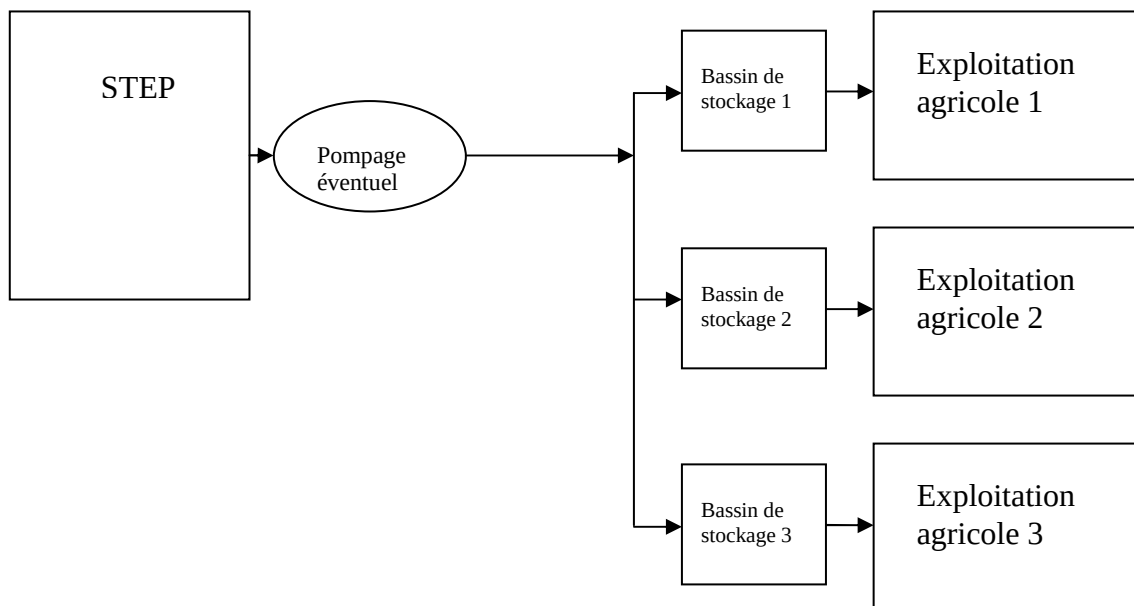


Figure 12 : Options de distribution d'eau dans le cas d'un stockage

Un autre aspect important à considérer réside dans le cas où les propriétés terriennes des exploitants sont assez dispersées suite au partage de l'héritage foncier conformément au régime successoral musulman. Ceci rend difficile l'optimisation du réseau de distribution de l'eau et complique l'assolement. Dans ce cette de situation, il est important dès la phase de conception du projet de réutilisation, de procéder à l'opération dite de remembrement. Celle-ci permet de regrouper les petites propriétés en une exploitation viable qui permettra d'appliquer des assolements organisés en soles (sole maraîchère, sole céréalière etc.) et d'alléger les contraintes liées à la distribution de l'eau entre les usagers. Toutefois, l'adoption de cette option est tributaire d'un certain nombre de procédures réglementaires pouvant dépasser une période de deux années.

6.3. Mode d'organisation des usagers des EUT

Etant donnée la quasi-inexistence des projets de réutilisation des eaux usées épurées à une échelle réelle au Maroc, aucun mode de gestion de ces eaux n'est encore expérimenté ou clairement institué. Toutefois, le Maroc dispose d'une grande expérience en matière de gestion participative de l'eau en petite et moyenne hydraulique (PMH) par les AUEA (Associations des Usagers de des Eaux Agricoles). Cette expérience peut être capitalisée et étendue aux eaux usées épurées.

Sur la base des acquis historiques en matière de gestion des tours d'eau dans les réseaux d'irrigation traditionnels, ces AUEA ont été instituées et réglementées en 1990 par la loi 02-84. L'objectif initial de cette création consistait à promouvoir la participation des usagers à l'investissement et à la gestion des infrastructures hydrauliques pour garantir leur durabilité. Les grands principes de ce type d'organisation sont : l'organisation des agriculteurs dans des structures de gestion, l'attribution des tâches courantes aux agriculteurs irrigants, la participation des bénéficiaires aux équipements collectifs et la prise en charge par les usagers des dépenses d'entretien et d'exploitation des équipements.

Les ressources financières proviennent essentiellement des cotisations obligatoires de membres de l'association. Soulignons que ces associations ont le privilège d'être des impôts et taxes quelle que soit sa nature. Les AUEA peuvent aussi bénéficier d'un certain nombre d'autres appuis.

Le Décret n° 2.84.106 du 13 mai 1992 a précisé les modalités d'accord entre l'Administration et l'association sur le programme des travaux.

Pour inspiration, l'Encadré 21 relate des extraits d'arrêtés et décrets en relation avec l'usage de l'eau conventionnelle et sa gestion en agriculture.

Encadré 21 : Arrêtés et décrets en relation avec l'usage de l'eau conventionnelle et sa gestion en agriculture.

Décret n° 2-84-106 adopté le 13 mai 1992 et publié le 20 mai 1992, B.O. n° 4151 du 20 mai 1992, p 240

Résumé du texte sur les modalités d'accord entre l'administration et les associations des usagers des eaux agricoles et approuvant les statuts-types desdites associations :

Le texte habilite le Ministre de l'Agriculture et l'Association des Usagers des Eaux Agricoles (AUEA) à établir un accord pour la réalisation du programme des travaux d'aménagement du périmètre en vue de l'utilisation des eaux agricoles (article 2). Cet accord doit préciser la délimitation du périmètre de l'association, les travaux à réaliser dans ce périmètre, les investissements nécessaires, le mode de financement, les participations de chacune des parties, l'engagement de l'association d'engager les crédits nécessaires et l'obligation de réaliser les travaux et la maintenance des ouvrages (article 3). Le statut-type de ces associations est approuvé et annexé au présent décret (article 5).

Décret n° 2-69-37, adopté le 25 juillet 1969, publié le 29 juillet 1969, BO du 29 Janvier 1969, amendé le 30 Juin 1996 (BO 4391)

Résumé des conditions de distribution et d'utilisation de l'eau dans les périmètres d'irrigation

L'usage de l'eau d'irrigation est soumis au paiement d'une redevance (article 2). L'article 4 fixe la progression à suivre pour atteindre le taux d'équilibre et les dispositions de l'article 7 fixent les prix du m3 d'eau d'irrigation. Le texte énumère également les différents assujettis au paiement de la redevance supplémentaire (article 8) et précise que les prix de l'eau seront révisés en fonction de l'évolution du niveau des prix et des salaires (article 9)

Dans le cadre de l'élaboration de la démarche institutionnelle initiée par l'ONEP avec le concours de la FAO pour la pérennisation des projets de réutilisation des eaux usées épurées, il est recommandé d'examiner, de manière concertée avec les parties concernées, les possibilités et les modalités d'adaptation de cette expérience des AUEA au cas de l'irrigation avec les EUT. En effet, des éléments nouveaux devront être apportés et concerneront les aspects de formation, de financement des traitements complémentaires et d'autres aspects en relation avec :

- Le caractère d'écoulement continu des eaux usées épurées contrairement aux eaux conventionnelles ;
- les restrictions de réutilisation ;
- les directives environnementales ; et
- la qualité et la destination des produits agricoles.

6.4. Ebauches d'une démarche institutionnelle pour les projets de traitement – réutilisation des eaux usées en agriculture

L'atelier sur le dispositif organisationnel, institutionnel et de gestion organisé par l'ONEP/FAO en 2003 et qui a réuni tous les départements concernés par le traitement et la réutilisation des eaux usées a permis de proposer une ébauche d'une démarche institutionnelle pour la gestion des projets intégrés de collecte, de traitement et de réutilisation des eaux usées. Les rôles et les responsabilités des différents intervenants ont été définis. On se contente de relater dans le **Tableau 34** la nature des interventions des institutions les plus directement concernées. Il est clair que d'autres institutions interviennent dans la stratégie générale, le contrôle et l'élaboration des normes à l'échelle nationale comme le Ministère de l'Intérieur, le MATTE à travers le Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau, les Agences des bassins et le Département de l'environnement. Pour le détail des différentes interventions, il est recommandé de se référer au rapport publié par la FAO/ONEP en 2003 [*Schéma*

organisationnelle, institutionnel et de gestion des projets intégrés de réutilisation des eaux usées].

Tableau 34 : Nature des interventions des principales institutions concernées par la réutilisation des eaux usées en agriculture

Intervenants	Nature de l'intervention
Opérateurs/producteurs des EUE	- Production des eaux usées traitées qui répondent aux normes de rejets - Suivi et surveillance continue de la qualité des effluents - Intervention rapide pour remédier aux dysfonctionnements des STEP - Diffusion aux autres départements concernés et en particulier le Ministère de l'Agriculture le plan d'action en matière d'assainissement ainsi que le programme d'exécution
Ministère de l'Agriculture	- Participer à la planification des études de réutilisation des eaux usées en irrigation - Classer des centres potentiels selon l'opportunité de réutilisation des eaux traitées - Intégrer les projets de réutilisation dans ses programmes - Prévoir des enveloppes budgétaires pour le co-financement du traitement additionnel - Prévoir l'aménagement de base du périmètre de réutilisation - Assurer la sensibilisation, l'information et l'encadrement technique des agriculteurs ainsi leur organisation en AUEA à travers les structures régionales (les Offices Régionaux de Mise en Valeur Agricole et les DPA) - Assurer le suivi de la qualité des sols, des eaux conventionnelles et des produits agricoles - Subvention des analyses des sols et des systèmes d'irrigation localisée (motivation des usagers)
Les Agences des bassins hydrauliques	- Autorisation de la réutilisation des eaux usées - Contrôle et protection des ressources en eau - Intégration des eaux conventionnelles en l'occurrence les eaux usées épurées dans la planification et la gestion des ressources en eau - Possibilité de contribuer au financement du traitement complémentaire
Ministère de la Santé	- Organiser des campagnes d'information, d'éducation et de communication sur les aspects sanitaires liés à la réutilisation des eaux usées et des boues résiduelles. - Contrôler la qualité biologique et hygiénique des produits destinés à la consommation - Formation des agents de vulgarisation agricole dans le domaine de l'hygiène du milieu

Soulignons à ce niveau qu'il est devenu urgent de valider la démarche institutionnelle et tout particulièrement en ce qui concerne la réutilisation des eaux usées épurées pour pouvoir suivre le rythme du secteur d'assainissement qui est actuellement en développement.

Aussi, étant donné que le traitement se limitera, sauf dans des situations particulières, au respect des normes de rejet, il est important de définir des mécanismes de financement de toute action d'amélioration du niveau de traitement.

7. 0. Suivi, surveillance et contrôle

7.1. Points de contrôles

Dans le but d'assurer une durabilité du projet de réutilisation et d'en tirer les avantages en anéantissant ses impacts négatifs possibles aussi bien sur la santé que sur l'environnement, un certain nombre de mesures doit être entreprise. Ces mesures concernent tous les maillons du système : les effluents traités, les boues, le bassin de stockage, le système d'irrigation, le sol et les cultures. Les différents points de contrôle sont schématiquement illustrés par la Figure 13.

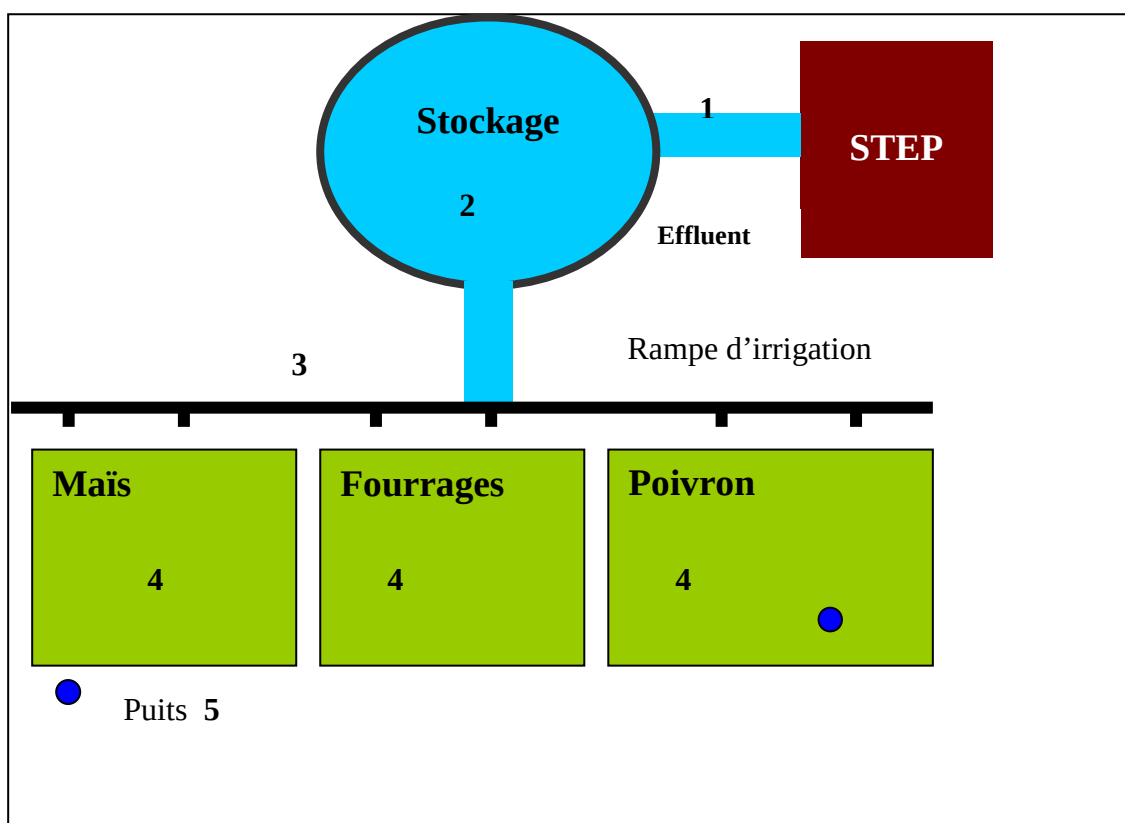


Figure 13 : Points de contrôle et de surveillance du système de réutilisation des EUE

7.2. Paramètres et fréquence de suivi

Les paramètres de qualité et les fréquences de suivi sont rapportés dans le [Tableau 35](#). Rappelons que ce suivi concerne uniquement la REUE et la valorisation agricole des boues. Il est clair que les exploitants de la STEP disposent d'un suivi plus étoffé avec parfois une fréquence en tant réel pour certains paramètres permettant le contrôle de fonctionnement de la STEP.

Tableau 35 : Paramètres et fréquences de suivi et de contrôle du système de réutilisation

Paramètres	Fréquence	Observations/références
<u>EAUX USEES EPUREES</u>		
Paramètres physico-chimiques : - Salinité totale (CE et TDS) - SAR - Ions toxiques (Na ⁺ , Cl ⁻ , B) - Autres paramètres : pH, température, NO3 ⁻ , HCO3 ⁻ , SO4 ⁻)	24 fois par an (à raison de tous les 15 jours)	[D'après les dispositions réglementaires marocaines relatives au rythme de suivi et aux normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation/ BO. 30 ramadan 1423/ 5-12-2002]
MES	3 fois par mois	[D'après EPA NSW, 1995.The Utilisation of Treated Effluent by Irrigation]
Eléments traces métalliques	4 fois par an (1 fois par trimestre)	[D'après les dispositions réglementaires marocaines relatives au rythme de suivi et aux normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation/ BO. 30 ramadan 1423/ 5-12-2002]
Paramètres bactériologiques (CF, salmonelle, vibrion cholérique)	24 fois par an (à raison de un de tous les 15 jours)	
Paramètres parasitologiques (Parasites pathogènes, œufs, kystes de parasites, larves d'Ankylostomides, fluococercaires de Schistosoma hoematobium)	24 fois par an (à raison de tous les 15 jours)	
<u>PRODUITS AGRICOLES</u>		
Qualité microbiologique	à la récolte et pour chaque coupe pour le cas des cultures fourragères à cycles répétés. Le contrôle concerne toutes les parties consommables par l'Homme et l'animal à la récolte	Ce paramètre concerne aussi les bassins de stockage [Adapté et modifié de Xanthoulis et al. (2002)]
Eléments traces si nécessaire (selon les analyses de l'eau et du compost de déchets appliqué comme amendement du sol)	1 fois tous les deux ans	
Boues : pathogènes et éléments traces métalliques	Analyse des boues avant application Analyse des sols tous les deux ans	Normes nationales inexistantes (voir normes étrangères cités dans le présent guide)
<u>SOLS</u>		
Salinité (CEps)	2 fois par an (avant l'installation des cultures et en début d'été)	- Trois profondeurs du sol doivent être échantillonnées. - Effectuer un suivi parallèle dans un sol avoisinant non irrigué avec les EUT et n'ayant pas reçu d'amendement à base de boue. [Adapté et modifié de Xanthoulis et al. (2002)]
pH	Une fois par an	
Sodicité (ESP)	1 fois tous les deux ans	
Bore	1 fois tous les deux ans	
Eléments nutritifs (N, P, K, ...)	1 fois par an à l'installation de la culture	
Matière organique	1 fois tous les deux ans	
Eléments traces si nécessaire (selon les analyses de l'eau et du compost de déchets appliqué comme amendement du sol)	1 fois tous les deux ans	
<u>EAU SOUTERRAINE</u>		
Tous les paramètres normalisés (voir tableau des normes de qualité de l'eau destinée à l'irrigation).	2 fois par an en période d'irrigation	[D'après les dispositions réglementaires marocaines relatives au rythme de suivi et aux normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation/ BO. 30 ramadan 1423/ 5-12-2002] Remarque : prioriser les paramètres suivants : (Salinité (CE), NO3 ⁻ , B, SAR)

Les fréquences de suivi des paramètres de qualité des eaux destinées à l'irrigation proposées par la norme marocaine semble être très élevée et rend le système de suivi assez lourd et coûteux ce qui risque de porter préjudice à sa durabilité. En effet, le coût sera tellement élevé que la réutilisation ne puisse le couvrir et particulièrement dans les petits périmètres irrigués. Ainsi, on propose de réduire les fréquences de suivi comme suit :

- Paramètres biologiques (parasitologiques et bactériologiques) : 12 fois par an au lieu de 24
- Paramètres physico-chimiques : 6 fois par an au lieu de 24
- Métaux lourds : 1 fois par an au lieu de 4 fois (pour les boues adopter plutôt 2 fois par an).

Selon le contexte, ce dispositif de suivi peut être allégé ou renforcé. Les techniciens spécialistes dans le domaine peuvent procéder à son optimisation sur base des rapports annuels d'exploitation de la STEP, des périodes intensives d'irrigation et des types des cultures pratiquées. Aussi, des suivis plus rapprochés de ces paramètres ou d'autres paramètres additionnels peuvent être effectués à titre expérimental. Par exemple des suivis superposés au calendrier d'irrigation et aux stades végétatifs peuvent être envisagés à titre expérimental.

Ce système de suivi doit se solder par un rapport annuel diffusé à toutes les parties concernées. Ce même rapport doit relater les propositions d'amélioration des différentes composantes du système de réutilisation des EUE et de valorisation agricole des boues.

7.3. Directives sanitaires et environnementales

Directives liées à la pratique de l'irrigation

L'irrigation gravitaire nécessite deux types de mesures de protection majeures :

- Bien maîtriser la dose appliquée pour éviter une percolation des eaux en profondeur qui entraînerait des nitrates vers la nappe.
- Les ouvriers opérateurs de l'irrigation doivent être protégés et sensibilisés.

L'irrigation au goutte à goutte, à part son coût relativement plus élevé mais compensé par l'efficacité élevée, ne posera à priori aucun risque sanitaire étant donné le très faible contact possible entre les organes des plantes cultivées et l'eau d'irrigation. Toutefois, les précautions suivantes doivent être prises :

- Choisir des goûteurs évitant l'obstruction des goûteurs.
- manipuler avec soins les fruits et particulièrement ceux qui peuvent être consommés à l'état frais
- Bien laver les produits avant livraison à domicile ou sur le marché.

Post-traitement et réduction des risques sanitaires

L'OMS recommande ce qu'on appelle le *post-traitement* qui correspond à des mesures prises tout à fait à l'aval du traitement des eaux usées et à leur réutilisation (OMS, 2006) pour assurer la protection sanitaire. Le

Tableau 36 montre les mesures de protection et les réductions de pathogènes en termes d'unité logarithmique.

Tableau 36 : Mesures post-traitement et réduction des pathogènes

Mesure de contrôle	Réduction de pathogènes (unité log)	Observations
Irrigation localisée (goutte à goutte)	2-4	Réduction par 2 unités log pour les plantes à croissance lente et ' unités log
Mort de pathogènes	0.5-2 /jour	Mort après la dernière irrigation avant la récolte (cela dépend du climat, de la culture etc.)
Lavage des produits agricoles	1	Cette réduction est assurée avec le lavage des salades, légumes et fruits avec de l'eau claire et propre
Désinfection	2	Cette réduction est assurée avec le lavage des salades, légumes avec une solution désinfectante et le rinçage avec de l'eau propre
Epulchage , décorticage	2	Fruits et légumes des plantes à tubercules (exemple : pomme de terre, oignons, carottes etc.)

7.4. Mesures d'accompagnement

7.4.1. Information, Education, Communication (IEC)

Pour assurer la durabilité du projet de réutilisation des EUT et des boues résiduelles, il est important de mettre en place un programme d'éducation, d'information et de communication en relation avec les avantages de la réutilisation et des précautions à prendre aux différents maillons de la filière : depuis l'effluent jusqu'au consommateur. Ceci permet de tirer les avantages de valorisation des sous produits de traitement et de minimiser les facteurs de risques de transmission des maladies.

Ce programme ne peut réussir sans la mise en place d'un partenariat entre l'opérateur, qui est l'organisme en charge de traitement, et les usagers de l'eau.

La durabilité des actions IEC repose, comme mentionné tout à fait en introduction de ce manuel, sur l'approche participative de la communauté. Pour cela, nous proposons un ensemble de mesures pouvant faire réussir le programme. Il est évident que toute mesure pourrait être adaptée à chaque type de situation dans la communauté.

L'éducation sanitaire constitue la clé de voûte des actions de prévention. L'atténuation des risques de contamination suppose, au préalable, la connaissance des maladies et les facteurs régissant leur transmission. De ce fait, l'information et la communication au sein de la communauté jouent un rôle primordial dans les programmes de sensibilisation. Les actions qui doivent être menées concernent l'information en matière d'hygiène domestique, d'hygiène alimentaire et de la salubrité de l'environnement.

Des visites guidées à des périmètres de réutilisation pourrait être envisagées en vue d'assurer un contact direct entre les nouveaux usagers des EUT et les bénéficiaires de l'expérience et d'en tirer les leçons.

7.4.2. Formation

Le volet formation reste un ingrédient essentiel à la réussite de tout type de projet. En effet, la vulgarisation des bonnes pratiques agricoles et des bonnes pratiques d'hygiène du milieu ne peut se faire sans que les agents et techniciens bénéficient d'une formation adéquate leur permettant de transmettre des messages ciblés aux populations concernées. De ce fait, la

réussite d'un projet de réutilisation requiert la mise en place d'un programme budgétisé de formation des formateurs et des vulgarisateurs dans les domaines suivants :

- Impact des eaux usées sur la santé et l'environnement.
- Education sanitaire.
- Bonnes pratiques agricoles de réutilisation des EUT et de valorisation des boues.
- Hygiène domestique
- Mesures d'urgences face à un problème
- Analyses des eaux, des boues, des végétaux et des sols et normes d'interprétation
- Lois et normes en relation avec la protection sanitaire et de l'environnement

La formation sera animée par des professionnels expérimentés en matière de santé publique, traitement des eaux usées, valorisation des sous produits de traitement des eaux usées, environnement, communication, sociologie, législation, etc.

7.5. Moyens humains et matériel

7.5.1. Moyens humains

Toutes les bonnes pratiques exposées dans ce manuel demeurent l'œuvre des ressources humaines. Pour cela, des profils adéquats et bénéficiant de formation continue sont indispensables pour assurer la supervision de toutes les opérations techniques, d'information et de surveillance.

Etant donnée la pluridisciplinarité et la multi- sectorielle des actions envisagées, la démarche institutionnelle de pérennisation des projets de réutilisation en cours d'élaboration permettra un partage des tâches et une bonne définition des domaines d'intervention des différentes parties concernées (Ministère de l'Intérieur, Ministère de l'Agriculture, Ministère de la santé, département de l'Environnement, ministère de l'éducation nationale etc.).

7.5.2. Moyens matériels et financiers

La réussite du système de suivi et de surveillance requiert un budget annuel pour couvrir les frais de personnel chargé de suivi et de contrôle et les frais d'analyses.

Références et documents consultés

ADEME. (2001). Les boues d'épuration municipales et leur utilisation en agriculture : Fiche technique 3832 élaborée par le Comité Technique Permanent sur l'épandage des boues d'épuration.

AFNOR, 1973. - Essais des eaux, détermination du pouvoir colmatant T90-30

Badraoui, M. et Stitou, M. Status of soil survey and soil information systems in Morocco. Options Méditerranéennes, Série B, n. 34. <http://ressources.ciheam.org/om/pdf/b34/01002094.pdf>

Di Pinto A.C. and Mininni G. (1985). Optimization of processing, managing and disposing of swage sludge Part II : disposal options. 86 – 93; In Processing and use of Organic Sludge and liquid Agricultural Wastes. In: Proceedings of the fourth International Symposium held in Rome, Italy. P. L'hermite (ed) for the Commission of the EU.

DJEDIDI, N. N. et A. HASSEN (1991) Propriétés physiques des sols et pouvoir colmatant des eaux usées en fonction de leur degré de traitement Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXVI, n "1, 1991 : 3-103.

Doran J.W., Ellis J.R. and McCalla T.M. (1976). Microbial concerns when wastes are applied to land. In : Land as waste management alternatives. R.C. Loehr (ed.). Ann. Arbor Sci. Publ., Inc., Ann Arbor, MI. p. 343-361

Doorenbos J. et Pruitt W.O., - Les besoins en eau des cultures. FAO - *Bulletin d'irrigation et de drainage* n° 24.

Dridi B. et Zerrouk F. (2000). Apport de boues d'épuration et propriétés d'un sol en Algérie Cahiers d'Etudes et de Recherches francophones/agricultures ; Vol 9, N° 1, p. 68-71.

Elliot H.A. (1984). Sludges : Generation, Treatment and Characteristics. In Criteria and recommendations for land application of sludges in the Northeast. Bulletin of the agricultural Experiment Station in Pennsylvania.

Elliot L.F. and Ellis J.R. (1977). "Bacterial and Viral Pathogens Associated with Land Application of Organic Wastes." *Journal of Environmental Quality* 6:245-51.

Evanylo G.K. (1999). Land Application of Biosolids for Agricultural Purposes in Virginia. Publication 452-300. Virginia Cooperative Extension, Virginia Tech.

FAO/ Service de la gestion des terres et de la nutrition des plantes/Division de la mise en valeur des terres et des eaux. 2006. Utilisation des engrais par culture au Maroc

FAO (1992). CROPWAT, Un logiciel pour la planification et la gestion des systèmes d'irrigation. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage. 133 pages.

FAO (1983) L'irrigation localisée. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage.

FAO. 2006. Utilisation des engrais par culture au Maroc

Gabteni N. et Gallali T. (1988). Étude expérimentale des interactions entre éléments métalliques et la minéralisation de la matière organique d'une boue résiduaire ajoutée à un sol. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXIV, no 3, 1988 : 255-261*

Grela R., Xanthoulis D., Marcoen J.M. , Lemineur M., Wauthélet M. L'infiltration des eaux usées épurées. Guide pratique. Convention d'étude entre la FUSAG, l'INASEP et la DGRNE «Etude de méthodes et d'outils d'aide à la décision pour la planification et la mise en œuvre de systèmes d'épuration individuelle ou groupée », *Février 2004. 29 pages.*

Ghariani, F ;, B. soudi, HC. Baumgart, S. Gredigk-Hoffman. 2006. Plan d'action pour la gestion des boues des stations d'épuration en Tunisie ; rapport final préparé pour le compte de Kfw/ONEP/ Exécution du bureau d'étude FiW.

Jemali A. et Soudi B. (1998). Valorisation agricole des boues résiduelles : Valeur fertilisante et efficacité d'utilisation de l'azote par le Ray gras d'Italie. In. *Proceedings of International Workshop on « Sewage Treatment and Reuse for small communities» Mediterranean and European Experiences »* Edited by R. Choukr Allah.

Mara, D. and S. Cairncross, 1989. Guidelines for the safe use of wastewater and excreta in agriculture and aquaculture: Methods of public health protection. *IRCWD News. 24/25: 4-12.*

Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural, des Eaux et des Forêts. 2000. Données de base, Rabat, 2000.

Norme Tunisienne Enregistrée NT 106.20 (2002). Matières fertilisantes – Boues des ouvrages d'épuration des eaux usées. Editée par l'Institut National de Normalisation et de la Propriété Industrielle.

OMS. 2006. A Guide to the Guidelines' *WHO Guidelines on Wastewater Use in Agriculture and Practical Advice on how to Transpose them into National Standards* Duncan Mara School of Civil Engineering, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK *E-mail: d.d.mara@leeds.ac.uk* November 2006

OTV. 1997. Traiter et valoriser les boues. Collection. Ouvrage collectif OTV. Paris 86240 Ligugé

Richard G. Allen, Luis S. Pereira, Dirk Raes, Martin Smith. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1998

Richard G. Allen, Luis S. Pereira, Dirk Raes, Martin Smith. Crop evapotranspiration -Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1998

Soudi B. (2000). Eléments méthodologiques de mise en place d'un Système de Suivi et d'Evaluation de la qualité des sols sous irrigation : études de cas de Tadla et des Doukkala. Rapport préparé pour la FAO-AGLL.

Soudi B. (2001). Compostage des déchets ménagers et valorisation du compost: Cas des petites et moyennes communes au Maroc. Actes Editions, Série agriculture & Environnement. Ouvrage préparé pour l'UNIDO et ENDA Maghreb.

Soudi B. et Jemali A. (1998). Valorisation agricole des boues résiduelles : Impact des amendements sur la dynamique de l'azote des sols. In. *Proceedings of International Workshop on « Sewage Treatment and Reuse for Small Communities : Mediteranean and European Experiences »* Edited by R. Choukr Allah.

Soudi, B. 2003. Guide de mise en place de projets de traitement et de réutilisation des eaux usées domestiques. Préparé pour le projet WPM/USAID/Secrétariat d'Etat chargé de l'Environnement

Trad Rais M. (INRGREF, Tunisie) et D. Xanthoulis (FUSAG, Belgique) - Amélioration de la qualité microbiologique des effluents secondaires par stockage en bassins, 1998. 22 pages.

Trad M. et Xanthoulis D., " Seasonal storage of reclaimed wastewater in Tunisia: a mean of upgrading microbiological quality". EPMR-2002. International Conference, Environmental Problems of the Mediterranean Region. 12-15 April 2002, Nicosia-Northern Cyprus.

Watson D.C.(1980). "The Survival of Salmonellae in Sewage Sludge Applied to Arable Land."*Water Pollution Control* 79:11 - 18.

Xanthoulis D., Rejeb S., Chenini F., Khelil MN., Chaabouni Z., Frankinet M., Destain J.P., Optimisation de la réutilisation des eaux usées épurées en irrigation. Avril 2002, 81 pages.

Xanthoulis D., Soudi B., Khallaayoune K., Amélioration des connaissances dans le domaine de la réutilisation des eaux usées en irrigation. FAO, ONEP (Maroc). Doc. 12DI/FAO/2002. 2002, 134 pages.

ANNEXES

Annexe 1 : Table des matières de l'étude d'impact des projets d'AEP, de traitement et de réutilisation des eaux usées traitées et des boues résiduelles à Sidi Taïbi (ONEP)

Paragraphe 1 ; 2 et 3 réservés à l'introduction et la méthodologie.

4. SITUATION DU PROJET

- 4.1 Situation géographique
- 4.2 Situation administrative
- 4.3 Aire de l'étude

5 ASPECTS JURIDIQUES ET INSTITUTIONNELS

- 5.1 Historique
- 5.2 Cadre institutionnel
- 5.3 Cadre législatif et réglementaire
- 5.4 Exigences des bailleurs des fonds et institutions internationales
 - 5.4.1 Banque africaine de développement (BAD)
 - 5.4.2 Banque mondiale
 - 5.4.3 Agence canadienne de développement international (ACDI)
 - 5.4.4 Union européenne
 - 5.4.5 Japon

6 JUSTIFICATION DU PROJET

- 6.1 Présentation générale
- 6.2 Systèmes d'AEP
 - 6.2.1 Situation actuelle
 - 6.2.2 Besoins en eau
 - 6.2.2.1 Dotations
 - 6.2.2.2 Taux de branchement au réseau
 - 6.2.2.3 Consommation en eau
 - 6.2.3 Ressources en eau disponibles
 - 6.2.3.1 Champ captant de Sidi Taïbi
 - 6.2.3.2 Forage de Taïcha
 - 6.2.3.3 Adduction principale de Fouarat
 - 6.2.3.4 Etat des ouvrages et équipements
 - 6.2.4 Projet d'AEP
 - 6.2.4.1 Production
 - 6.2.4.2 Réseaux de distribution
 - 6.2.4.3 Stockage
 - 6.2.4.4 Evaluation des coûts
 - 6.2.4.5 Choix de la variante
- 6.3 Projet d'assainissement
 - 6.3.1 Situation actuelle
 - 6.3.2 Ratio de pollution
 - 6.3.3 Situation projetée
 - 6.3.3.1 Système d'assainissement retenu
 - 6.3.3.2 Descriptif du réseau des eaux usées
 - 6.3.3.3 Description du réseau des eaux pluviales
 - 6.3.3.4 Exutoire final des eaux pluviales
 - 6.3.3.5 Description du réseau des eaux pluviales
- 6.4 STEP
 - 6.4.1 Contexte du projet
 - 6.4.2 Présentation et description des variantes
 - 6.4.3 Consistance des variantes
 - 6.4.3.1 Station d'épuration
 - 6.4.3.2 Interception et amenée
 - 6.4.3.3 Evacuation des eaux épurées
 - 6.4.3.4 Objectifs de qualité et exutoire pour l'évacuation des eaux usées épurées
 - 6.4.4 Estimation des coûts
 - 6.4.5 Choix du site

7 Description du milieu récepteur

- 7.1 Milieu physique
 - 7.1.1 Climatologie
 - 7.1.2 Hydrologie
 - 7.1.3 Hydrogéologie
 - 7.1.4 Géologie, géomorphologie et nature du sol
 - 7.1.5 Sismicité de la région
 - 7.1.6 Air
- 7.2 Milieu naturel
 - 7.2.1 Forêt de Mamora

- 7.2.2 Zones humides de Sidi Boughaba et de merja Zerga
- 7.3 Patrimoine culturel et paysage
 - 7.3.1 Patrimoine culturel
 - 7.3.2 Paysage
- 7.4 Milieu humain
 - 7.4.1 Données générales
 - 7.4.2 Démographie
 - 7.4.2.1 Données démographiques
 - 7.4.2.2 Prévisions démographiques
 - 7.4.3 Occupation du sol
 - 7.4.3.1 Situation actuelle
 - 7.4.3.2 Plan d'aménagement
 - 7.4.3.3 Données socioéconomiques
 - 7.4.3.4 Equipement socioéconomiques
 - 7.4.3.5 Infrastructures de base
 - 7.4.3.6 Voirie
 - 7.4.3.7 Tourisme
- 7.5 Santé des populations
 - 7.5.1 Paludisme
 - 7.5.2 Bilharziose
 - 7.5.3 Choléra
 - 7.5.4 Typhoïde
 - 7.5.5 Hépatite
- 8 IMPACTS POTENTIELS DU PROJET SUR L'ENVIRONNEMENT
 - 8.1 Impacts induits par la conception
 - 8.2 Impacts en phase chantier
 - 8.2.1 Impacts potentiels du chantier sur l'environnement naturel
 - 8.2.2 Impacts potentiels du chantier sur l'environnement humain
 - 8.2.2.1 Impacts potentiels de la phase chantier sur les perceptions humaines
 - 8.2.2.1.1 Impacts visuels et paysagers
 - 8.2.2.1.2 Impacts par les émissions de gaz et de poussières
 - 8.2.2.1.3 Impacts par le bruit et les vibrations
 - 8.2.2.1.4 Impacts des eaux usées, des ordures ménagères et des rebuts du chantier
 - 8.2.2.2 Impacts potentiels de la phase chantier sur la sécurité humaine
 - 8.2.2.3 Impacts des travaux sur les infrastructures et les ouvrages existants
 - 8.2.2.4 Impacts socio-économiques de la phase chantier
 - 8.3 Impacts en phase exploitation
 - 8.3.1 Impacts relatifs au transport et circulation
 - 8.3.2 Impacts relatifs à l'occupation du sol et au paysage
 - 8.3.3 Impacts relatifs aux bruits
 - 8.3.4 Impacts relatifs à la sécurité et aux interventions d'urgence
 - 8.3.5 Impacts relatifs à l'entretien et à la réparation
 - 8.3.6 Impact sur le cadre biologique et le paysage
 - 8.3.7 Impact sur la qualité des ressources en eau
 - 8.3.8 Amélioration de la santé de la population
 - 8.3.9 Impacts socio-économiques de la phase exploitation
 - 8.3.10 Amélioration du cadre de vie de la population
 - 8.3.11 Amélioration de la qualité de l'air
 - 8.3.12 Impacts relatifs à l'occupation du sol et au paysage
 - 8.3.13 Impacts relatifs aux odeurs, moustiques et bruits
 - 8.3.14 Impacts relatifs à la gestion des EUT
 - 8.3.14.1 Impacts relatifs au rejet des EUT dans le milieu récepteur
 - 8.3.14.2 Impacts relatifs à la réutilisation des EUT à des fins agricoles
 - 8.3.14.3 Impacts relatifs à la réutilisation des EUT à la recharge du lac
 - 8.3.14.4 Impacts relatifs à la gestion des boues d'épuration
 - 8.3.15 Impacts sur le valorisation des eaux traitées
 - 8.3.16 Impact sur les capacités financières de la population
- 9 Evaluation des impacts
- 10 MESURES D'ATTENUATION
- 11 Surveillance et suivi environnemental
 - 11.1 PROGRAMME DE SURVEILLANCE
 - 11.1.1 Identification et délimitation de l'emprise du chantier
 - 11.1.2 Mouvements de terres
 - 11.1.3 Circulation dans le chantier
 - 11.1.4 Temps de travail et information des populations riveraines
 - 11.1.5 Démobilisation et réaménagement des aires de travail
 - 11.2 Suivi environnemental

Annexe 2 : Normes marocaines de qualité des eaux destinées à l'irrigation (BO du 5-12-2002)

	Paramètres	Valeurs limites
PARAMETRES BACTERIOLOGIQUES		
1	Coliformes fécaux	5000/100 ml*
2	Salmonelle	Absence dans 5 l
3	Vibron Cholérique	Absence dans 450 ml
PARAMETRES PARASITOLOGIQUES		
4	Parasites pathogènes	Absence
5	Œufs, Kystes de parasites	Absence
6	Larves d'Ankylostomides	Absence
7	Fluococercaires de Schistosoma hoematobium	Absence
PARAMETRES TOXIQUES		
8	Mercure (Hg) en mg/l	0,001
9	Cadmium (Cd) en mg/l	0,01
10	Arsenic (As)) en mg/l	0,1
11	Chrome total en mg/l	0,1
12	Plomb (Pb) en mg/l	5
13	Cuivre (Cu) en mg/l	0,2
14	Zinc (Zn) en mg/l	2
15	Sélénium (Se) en mg/l	0,02
16	Fluor (F) en mg/l	1
17	Cyanures (Cn) en mg/l	1
18	Phénols en mg/l	3
19	Aluminium (Al) en mg/l	5
20	Baryum (Be) en mg/l	0,1
21	Cobalt (Co) en mg/l	0,05
22	Fer (Fe) en mg/l	5
23	Lithium en mg/l	2,5
24	Manganèse (Mn) en mg/l	0,2
25	Molybdène (Mo) en mg/l	0,01
26	Nickel (Ni) en mg/l	0,2
27	Vanadium (V) en mg/l	0,1

*1000/100 ml pour les cultures consommées crues.

Annexe 2 (suite) : Normes marocaines de qualité des eaux destinées à l'irrigation (BO du 5-12-2002)

Critères de réutilisation des EUE au Maroc			
Catégorie	A	B	C
Conditions de réutilisation	Irrigation des cultures consommées à l'état cru, des terrains de sport et des parcs ⁱⁱⁱ⁽⁺⁾	Irrigation des cultures céréalières, industrielles fourragères, cultures pastorales et arbres fruitiers	Irrigation des cultures de la catégorie B si les agriculteurs, le public et les consommateurs n'y sont pas exposés.
Groupes exposés	Agriculteurs Public Consommateurs	Agriculteurs	Néant
Nématodes intestinaux Moyenne logarithmique du nombre d'œufs par 100 ml i(*)	Absence	Absence	Sans objet
Coliformes fécaux Moyenne géométrique du nombre par 100ml ⁱⁱ⁽⁺⁾	≤1000 (d)	Pas de standards recommandés	Sans objet
Procédé de traitement des EU pour assurer la qualité microbiologique requise	Série de bassins de stabilisation permettant de garantir une bonne qualité microbiologique des effluents ou tout autre système de traitement équivalent; catégorie A	rétenion dans un bassin de stabilisation pendant 8 – 10 jours ou tout autre système permettant une élimination équivalente des helminthes et des coliformes fécaux	Traitement préliminaire en conformité avec les techniques d'irrigation avec au moins une décantation primaire

^{i(*)} *Ascaris*, *Trichuris*(whipworm) et *Ankylostoma*

ⁱⁱ⁽⁺⁾ *Durant la période d'irrigation*

ⁱⁱⁱ⁽⁺⁾ *A Directive stricte (<200 CF/100ml) est justifiée pour le gazon avec lequel le public peut avoir un contact direct.*

Annexe 3 : Normes marocaine, tunisienne, syrienne et jordanienne pour la réutilisation des eaux usées (mg/l)

	Syrie			Jordanie					Maroc	Tunisie
Paramètres	Irrigation			Irrigation			Rejet en eau de surface et wadi	Recharge de nappe	Irrigation	Irrigation
	A	B	C	A	B	C				
BOD ₅	30	100	150	30	200	300	60	15		30
COD	75	200	300	100	500	500	150	50		90
DO	4	-	-	>2	-	-	>1	>2		
TDS	1500	1500	-	1500	1500	1500	1500	1500		
TSS	50	150	150	50	150	150	60	50		30
SAR	9	9	9	9	9	9	6	6		
pH	6 – 9	6 – 9	6 – 9	6 – 9	6 – 9	6 – 9	6 – 9	6 – 9	6,5-8,5	6,5-8,5
Turbidité	-	-	-	10	-	-	-	2		
Phénol	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002		
MBAS	50	50	50	100	100	100	25	25		
Cl ₂ résiduel	0.5	-	-	-	-	-	-	-		
N-NO ₃	20	25	25	30	45	45	45	30	50	
NH ₄	3	5	-	-	-	-	-	5		
TN	-	-	-	45	70	70	70	45		
T-PO ₄	20	20	20	30	30	30	15	15		
SO ₄	300	500	500	500	500	500	300	400	250	
HCO ₃	520	520	520	400	400	400	400	400		
Cl	350	350	350	400	400	400	350	350	105-350	
Na	230	230	230	230	230	230	200	200	69 ⁽²⁾	
Mg	60	60	60	100	100	100	60	60		
Ca	400	400	400	230	230	230	200	200		
Coliformes ⁽¹⁾	<1000	<100,000	<10,000	100	1000	-	1000	<2.2	5000/100 ml	
Salmonella									Absence in 5 l	
Vibron Cholérique									Absence in 450 ml	
Œufs d'Helminthe (dans 1 litre)	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	Absence	<1
Parasites pathogènes									Absence	
Larves Ankylostomes									Absence	
Schistosoma haematobium									Absence	

Note: Classe d'Irrigation : A – Légumes cuits, parcs, plaines de jeu et de sport, abords de routes en zone urbaine (Pour la Syrie : B – Arbres, abords des routes hors zone urbaine, espaces verts, céréales et fourrage ; et Jordanie) C – Cultures industrielles, forêt

⁽¹⁾ Coliformes fécaux dans les normes syriennes et marocaines, E. Coli dans les normes jordanienes

Annexe 3 (suite) :

**Normes marocaine, tunisienne, syrienne et jordanienne pour la réutilisation des eaux usées (mg/l) –
Métaux lourds (mg/l)**

Paramètre	Syrie		Jordanie			Maroc	Tunisie
	Irrigation		Irrigation	Rejet en eau de surface et wadi	Recharge de nappe	Irrigation	Irrigation
	Long Terme	Court Terme (Plus de 20 ans)					
Aluminium (Al)	5	20	5	2	2	5	
Arsenic (As)	0.1	2	0.1	0.02	0.05	0.1	0,1
Béryllium (Be)	0.1	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	
Bore (B)	0.75	2	1	1	1	3	3
Cadmium (Cd)	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0,01
Chrome (Cr)	0.1	1	0.1	0.02	0.02	0.1	0,1
Cobalt (Co)	0.05	5	0.05	0.05	0.05	0.05	0,1
Cuivre (Cu)	0.2	5	0.2	0.2	0.2	0.2	0,5
Fluorine (F)	1	15	1.5	1.5	1.5	1	
Fer (Fe)	5	20	5	5	5	5	5
Plomb (Pb)							1
Lithium (Li)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	
Manganèse (Mn)	0.2	10	0.2	0.2	0.2	0.2	0,5
Molybdène (Mo)	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	
Nickel (Ni)	0.2	2	0.2	0.2	0.2	0.2	0,2
Sélénium (Se)	0.02	0.02	0.02	0.05	0.05	0.02	0,05
Vanadium (V)	0.1	1	0.1	0.1	0.1	0.1	
Zinc (Zn)	2	10	5	5	5	2	5
Mercure (Hg)			0.002	0.002	0.002	0.001	0,001
Cyanure (CN)			0.1	0.1	0.1	1	

Annexe 4 : Données astronomiques : p, N et Ra

Tableau A4.1 : pourcentage journalier moyen (p) des heures annuelles de lumière diurne pour le mois envisagé sous différentes latitudes (tiré de Dorenbos et al.).

Latitude Nord	Jan	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Dec
Latitude Sud	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
60°	0,15	0,2	0,26	0,32	0,38	0,41	0,4	0,34	0,28	0,22	0,17	0,13
58	0,16	0,21	0,26	0,32	0,37	0,4	0,39	0,34	0,28	0,23	0,18	0,15
56	0,17	0,21	0,26	0,32	0,36	0,39	0,38	0,33	0,28	0,23	0,18	0,16
54	0,18	0,22	0,26	0,31	0,36	0,38	0,37	0,33	0,28	0,23	0,19	0,17
52	0,19	0,22	0,27	0,31	0,35	0,37	0,36	0,33	0,28	0,24	0,2	0,17
50	0,19	0,23	0,27	0,31	0,34	0,36	0,35	0,32	0,28	0,24	0,2	0,18
48	0,2	0,23	0,27	0,31	0,34	0,36	0,35	0,32	0,28	0,24	0,21	0,19
46	0,2	0,23	0,27	0,3	0,34	0,35	0,34	0,32	0,28	0,24	0,21	0,2
44	0,21	0,24	0,27	0,3	0,33	0,35	0,34	0,31	0,28	0,25	0,22	0,2
42	0,21	0,24	0,27	0,3	0,33	0,34	0,33	0,31	0,28	0,25	0,22	0,21
40	0,22	0,24	0,27	0,3	0,32	0,34	0,33	0,31	0,28	0,25	0,22	0,21
35	0,23	0,25	0,27	0,29	0,31	0,32	0,32	0,3	0,28	0,25	0,23	0,22
30	0,24	0,25	0,27	0,29	0,31	0,32	0,31	0,3	0,28	0,26	0,24	0,23
25	0,24	0,26	0,27	0,29	0,3	0,31	0,31	0,29	0,28	0,26	0,25	0,24
20	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,3	0,3	0,29	0,28	0,26	0,25	0,25
15	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,29	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26	0,25
10	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,29	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26	0,26
5	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,27
0	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27

Tableau A4.2 : nombre possible d'heures d'insolation (N) d'après le mois de l'année et la latitude du lieu (durée astronomique du jour).

Latitude Nord	Jan	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Dec
Latitude Sud	Juillet	Août	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
50°	8,5	10,1	11,8	13,8	15,4	16,3	15,9	14,5	12,7	10,8	9,1	8,1
48°	8,8	10,2	11,8	13,6	15,2	16	15,6	14,3	12,6	10,9	9,3	8,3
46°	9,1	10,4	11,9	13,5	14,9	15,7	15,4	14,2	12,6	10,9	9,5	8,7
44°	9,3	10,5	11,9	13,4	14,7	15,4	15,2	14	12,6	11	9,7	8,9
42°	9,4	10,6	11,9	13,4	14,6	15,2	14,9	13,9	12,9	11,1	9,8	9,1
40°	9,6	10,7	11,9	13,3	14,4	15	14,7	13,7	12,5	11,2	10	9,3
35°	10,1	11	11,9	13,1	14	14,5	14,3	13,5	12,4	11,3	10,3	9,8
30°	10,4	11,1	12	12,9	13,6	14	13,9	13,2	12,4	11,5	10,6	10,2
25°	10,7	11,3	12	12,7	13,3	13,7	13,5	13	12,3	11,6	10,9	10,6
20°	11	11,5	12	12,6	13,1	13,3	13,2	12,8	12,3	11,7	11,2	10,9
15°	11,3	11,6	12	12,5	12,8	13	12,9	12,6	12,2	11,8	11,4	11,2
10°	11,6	11,8	12	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,1	11,8	11,6	11,5
5°	11,8	11,9	12	12,2	12,3	12,4	12,3	12,3	12,1	12	11,9	11,8
0°	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1

Tableau A4.3 : Rayonnement extra terrestre (Ra), exprimé en cal.cm⁻² de surface horizontale et par jour

LATITUDE NORD

	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
Janvier	858	759	612	508	364	222	87,5	0	0
Février	888	821	732	624	495	360	215	82	2,9
Mars	890	873	834	764	673	562	432	269	146
Avril	862	894	902	880	833	764	676	577	508
Mai	816	885	930	950	944	920	880	860	889
Juin	790	873	934	972	985	983	970	992	1042
Juillet	804	879	950	955	958	938	908	905	945
Août	833	880	902	891	858	800	728	651	610
Septembre	875	872	843	788	710	607	487	341	215
Octobre	880	830	755	658	536	404	262	119	17,5
Novembre	860	767	656	528	390	246	111	17	0
Décembre	842	735	610	469	323	180	55,5	0	0

LATITUDE SUD

Latitude Sud	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Janvier	858	893	986	1009	1010	990	964
Février	888	888	937	923	887	820	738
Mars	890	872	845	783	697	590	466
Avril	862	820	726	629	507	376	235
Mai	816	754	616	495	364	226	96
Juin	790	724	571	439	303	167	49,5
Juillet	804	748	597	473	338	205	78,5
Août	833	804	691	586	460	330	189
Septembre	875	871	808	734	639	527	397
Octobre	880	896	905	880	830	753	657
Novembre	860	900	971	987	977	949	905
Décembre	842	891	992	1031	1045	1040	1025

Annexe 5 : Evapotranspiration (ETP), pluie (P) et déficit climatique (P-ETP) mensuels sur 13 sites au Maroc (Adapté de FAO)

	Agadir		
Mois	ETP mm/mois	Pluies P mm/mois	Déficit climatique P-ETP mm/mois
Janvier	65,1	48	-17,1
Février	78,4	32	-46,4
Mars	102,3	24	-78,3
Avril	114	16	-98
Mai	136,4	5	-131
Juin	129	1	-128
Juillet	139,5	0	-140
Août	133,3	0	-133
Septembre	117	6	-111
Octobre	99,2	22	-77,2
Novembre	69	29	-40
Décembre	52,7	41	-11,7
Total	1235,9	224	-1012

	Cabo Jubi		
Mois	ETP mm/mois	Pluies P mm/mois	Déficit climatique P-ETP mm/mois
Janvier	89,9	6	-83,9
Février	72,8	5	-67,8
Mars	93	3	-90
Avril	108	1	-107
Mai	117,8	0	-118
Juin	108	0	-108
Juillet	102,3	0	-102
Août	102,3	0	-102
Septembre	93	5	-88
Octobre	86,8	3	-83,8
Novembre	72	11	-61
Décembre	71,3	8	-63,3
Total	1117	42	-1075

	Casablanca		
Mois	ETP mm/mois	Pluies P mm/mois	Déficit climatique P-ETP mm/mois
Janvier	37,2	62	24,8
Février	50,4	53	2,6
Mars	80,6	53	-27,6
Avril	102	37	-65
Mai	124	18	-106
Juin	132	5	-127
Juillet	139,5	0	-140
Août	130,2	0	-130
Septembre	108	6	-102
Octobre	80,6	39	-41,6
Novembre	51	65	14
Décembre	40,3	88	47,7
Total	1076	426	-650

	Ifrane		
Mois	ETP mm/mois	Pluies P mm/mois	Déficit climatique P-ETP mm/mois
Janvier	46,5	112	65,5
Février	56	127	71
Mars	86,8	125	38,2
Avril	108	117	9
Mai	127,1	82	-45,1
Juin	150	38	-112
Juillet	195,3	8	-187
Août	179,8	11	-169
Septembre	147	40	-107
Octobre	96,1	137	40,9
Novembre	66	152	86
Décembre	49,6	163	113,4
Total	1308	1112	-196

	Kasba-Tadla		
Mois	ETP mm/mois	Pluies P mm/mois	Déficit climatique P-ETP mm/mois
Janvier	62	42	-20
Février	64,4	48	-16,4
Mars	96,1	53	-43,1
Avril	123	51	-72
Mai	161,2	26	-135
Juin	183	14	-169
Juillet	217	5	-212
Août	207,7	2	-206
Septembre	162	12	-150
Octobre	120,9	36	-84,9
Novembre	75	61	-14
Décembre	58,9	59	0,1
Total	1531	409	-1122

	Marrakech		
Mois	ETP mm/mois	Pluies P mm/mois	Déficit climatique P-ETP mm/mois
Janvier	62	28	-34
Février	78,4	29	-49,4
Mars	117,8	32	-85,8
Avril	135	31	-104
Mai	164,3	17	-147
Juin	177	7	-170
Juillet	217	2	-215
Août	210,8	3	-208
Septembre	159	10	-149
Octobre	117,8	21	-96,8
Novembre	72	28	-44
Décembre	58,9	33	-25,9
Total	1570	241	-1329

	Meknes		
Mois	ETP mm/mois	Pluies P mm/mois	Déficit climatique P-ETP mm/mois
Janvier	43,4	82	38,6
Février	50,4	67	16,6
Mars	80,6	79	-1,6
Avril	102	63	-39
Mai	136,4	33	-103,4
Juin	156	9	-147
Juillet	186	3	-183
Août	176,7	2	-174,7
Septembre	132	19	-113
Octobre	96,1	54	-42,1
Novembre	57	69	12
Décembre	40,3	105	64,7
Total	1256,9	585	-671,9

	Ouarzazate		
Mois	ETP mm/mois	Pluies P mm/mois	Déficit climatique P-ETP mm/mois
Janvier	65,1	6	-59,1
Février	75,6	6	-69,6
Mars	117,8	12	-106
Avril	147	9	-138
Mai	176,7	5	-172
Juin	192	4	-188
Juillet	204,6	2	-203
Août	192,2	9	-183
Septembre	159	20	-139
Octobre	117,8	18	-99,8
Novembre	81	17	-64
Décembre	62	15	-47
Total	1590,8	123	-1468

	Oujda		
Mois	ETP mm/mois	Pluies P mm/mois	Déficit climatique P-ETP mm/mois
Janvier	65,1	43	-22,1
Février	75,6	31	-44,6
Mars	105,4	52	-53,4
Avril	129	45	-84
Mai	155	31	-124
Juin	174	15	-159
Juillet	213,9	4	-210
Août	198,4	1	-197
Septembre	156	13	-143
Octobre	108,5	15	-93,5
Novembre	69	29	-40
Décembre	68,2	58	-10,2
Total	1518	337	-1181

	Rabat		
Mois	ETP mm/mois	Pluies P mm/mois	Déficit climatique P-ETP mm/mois
Janvier	49,6	66	16,4
Février	64,4	64	-0,4
Mars	93	66	-27
Avril	111	43	-68
Mai	136,4	28	-108
Juin	150	8	-142
Juillet	155	1	-154
Août	148,8	1	-148
Septembre	120	1	-119
Octobre	102,3	49	-53,3
Novembre	69	84	15
Décembre	55,8	86	30,2
Total	1255	497	-758

	Sidi-Ifni		
Mois	ETP mm/mois	Pluies P mm/mois	Déficit climatique P-ETP mm/mois
Janvier	65,1	24	-41,1
Février	72,8	21	-51,8
Mars	96,1	15	-81,1
Avril	102	14	-88
Mai	111,6	2	-110
Juin	99	3	-96
Juillet	105,4	1	-104
Août	102,3	2	-100
Septembre	93	8	-85
Octobre	86,8	11	-75,8
Novembre	69	30	-39
Décembre	62	37	-25
Total	1065	168	-897

	Tanger		
Mois	ETP mm/mois	Pluies P mm/mois	Déficit climatique P-ETP mm/mois
Janvier	62	114	52
Février	70	106	36
Mars	93	120	27
Avril	117	90	-27
Mai	151,9	42	-110
Juin	165	15	-150
Juillet	186	1	-185
Août	186	1	-185
Septembre	141	23	-118
Octobre	114,7	99	-15,7
Novembre	81	147	66
Décembre	68,2	137	68,8
Total	1436	895	-541

	Tan-Tan		
Mois	ETP mm/mois	Pluies P mm/mois	Déficit climatique P-ETP mm/mois
Janvier	80,6	11	-69,6
Février	100,8	16	-84,8
Mars	133,3	7	-126
Avril	138	4	-134
Mai	148,8	1	-148
Juin	141	0	-141
Juillet	145,7	1	-145
Août	142,6	0	-143
Septembre	129	2	-127
Octobre	120,9	11	-110
Novembre	96	23	-73
Décembre	77,5	36	-41,5
Total	1454	112	-1342

Annexe 6 : Coefficient Kc (tiré de Dorenbos et al.).

La méthode FAO propose quatre stades de développement d'une culture annuelle pour fixer les valeurs de Kc (Figure A6.1):

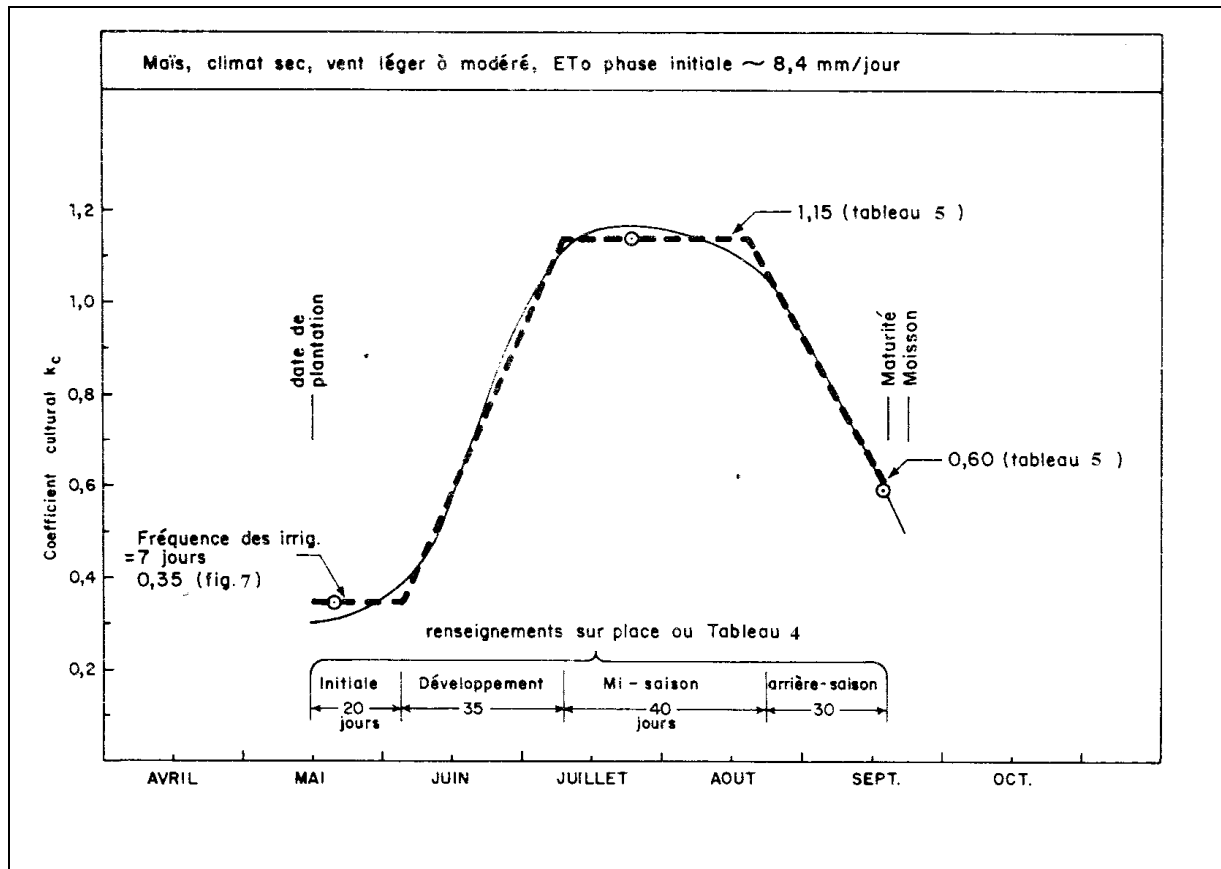


Figure A6.1 Evolution du coefficient Kc

Courbe Kc schématisée - Exemple de courbe du coefficient Kc pour le maïs (tiré de Dorenbos et al.).

- 1) Stade initial: germination et première croissance; le sol est peu ou pas couvert (couverture < à 10% de la superficie).
- 2) Stade de développement: depuis la fin du stade initial jusqu'à atteindre une couverture effective du sol (couverture de 70 à 80% de la superficie).
- 3) Stade de mi-saison: de la fin du stade (2) au début de la maturation décelée par décoloration des feuilles; se situe normalement bien au-delà du stade floraison.
- 4) Stade de fin de saison: de la fin du stade (3) à la pleine maturité de la récolte.

Les étapes suivantes sont à définir:

- (1) Établir la date du semis ou de la plantation suivant les informations locales ou suivant les pratiques dans les zones climatiques similaires.
- (2) Déterminer la saison totale de culture et la longueur de chaque stade définit ci-dessus (pour approximation voir tableau A3.1, ou sur base d'informations locales).
- (3) Stade initial: prédire la fréquence approximative des pluies et/ou des irrigations (en fonction du climat, du sol, de la culture), et déterminer Kc du stade initial à partir de la figure A3.2 (fréquence approximative égale à ETP/RFU, avec RFU=Réserve Facilement Utilisable).
- (4) Mi-saison: pour un climat donné, choisir Kc à partir du tableau A3.2

- (5) Reporter en graphique, comme montré en figure A6.1, par deux droites, les K_c pour le stade initial et le stade mi-saison.
- (6) Stade développement: joindre par une droite l'extrémité du stade initial et le début du stade mi-saison sur la figure A6.1.
- (7) Stade fin saison: déterminer le K_c à partir du tableau A6.2. Cette valeur correspond à la fin de la saison de végétation; la reporter par un point sur le graphe et tracer une droite joignant ce point à la fin de la mi-saison (figure A6.1).

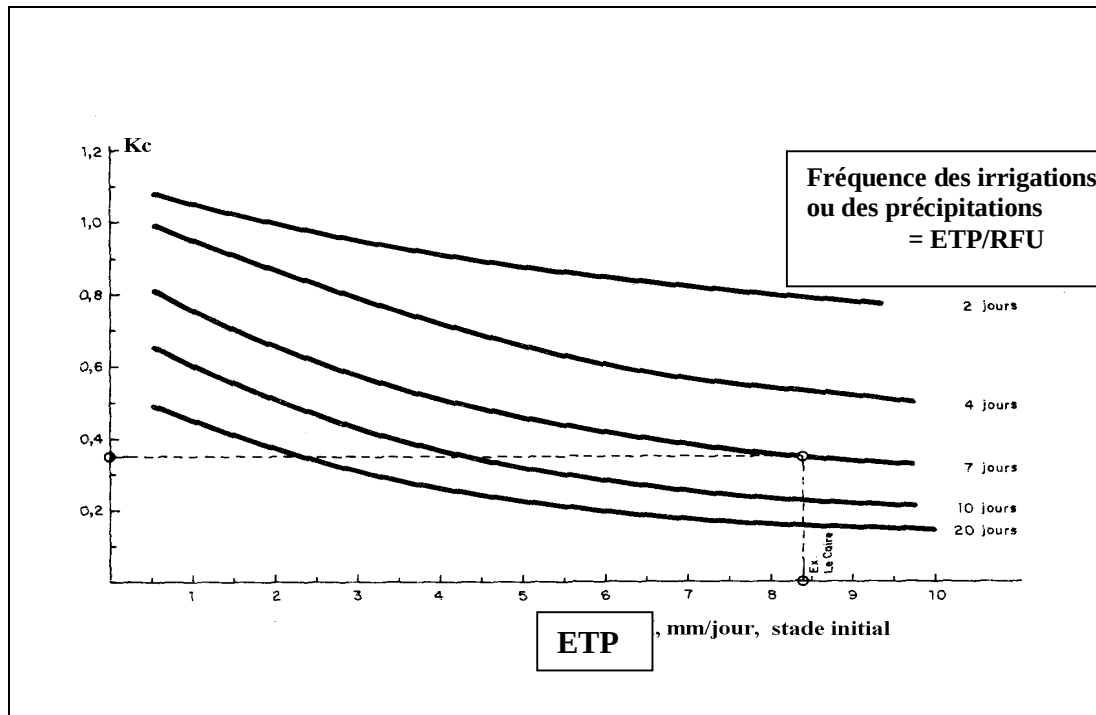


Figure A6.2 K_c moyen pour le stade initial par rapport à ETP - (tiré de Dorenbos et al.).

Annexe 7 : Durée de la saison végétative et des phases de développement de cultures de plein champ et Coefficient cultural Kc pour les différentes phases de croissance

Tableau A7.1. Durée de la saison végétative et des phases de développement d'un certain nombre de cultures de plein champ; quelques indications (tiré de Dorenbos et *al.*).

<u>Artichauts</u>	Culture pérenne, replantée tous les 4 à 7 ans; exemple: Côte de Californie plantation en avril, 40/40/250/30 et (360)*; les années suivantes, les plants sont coupés au ras du sol à la fin du printemps, après la récolte, et les chiffres correspondants sont : 20/40/220/30 et (310).
Orge	Ainsi que le blé et l'avoine ; tout dépend beaucoup de la variété ; pour un blé cultivé au centre de l'Inde : plantation en novembre, 15/25/50/30 et (120) ; latitudes 35° - 45°, climats semi-arides ; semis au début du printemps, et en Corée du sud, plantation en novembre : 20/25/60/30 et (135), pour un blé cultivé sur les hautes terres d'Afrique orientale à 2.500 m d'altitude : semis en juillet et en Corée du sud 15/30/65/40 et (150).
Haricots (verts)	Désert de Californie et Bassin méditerranéen, plantation en février et mars, 20/30/30/10 et (90) ; Désert de Californie, Egypte, Liban côtier plantation août/septembre, 15/25/25/10 et (75).
Haricots (secs) Légumineuses	Climats continentaux, plantation en fin de printemps, 20/30/40/20 et (110) ; Californie centrale et Pakistan occidental plantation en juin, 15/25/35/20 et (95) ; variétés à croissance prolongée 15/25/50/20 et (110).
Betteraves (de table)	Bassin méditerranéen, plantation au printemps, 15/25/20/10 et (70) ; climats méditerranéens, plantation au début du printemps et plantation avant la saison fraîche, climats désertiques, 25/30/25/10 et (90).
Carottes	Sous les climats semi-arides à arides, en saison chaude : 20/30/30/20 et (100) ; pour la saison fraîche, il faut compter jusqu'à 20/30/80/20 et (160) ; climats méditerranéens, plantation au début du printemps, 25/35/40/20 et (120) pouvant aller jusqu'à 30/40/60/20 et (150) pour une plantation à la fin de l'hiver.
Graines de ricin	Climats semi-arides et arides, plantation au printemps, 25/40/65/50 et (180).
Céleri	En climat semi-aride, plantation avant la saison fraîche, 25/40/95/20 et (180), saison fraîche, 30/55/105/20 et (210); climat méditerranéen humide, mi-saison, 30/40/45/15 et (125).
Maïs (doux)	Philippines, plantation début mars (fin de saison sèche) 20/20/30/10 et (90) ; climats méditerranéens, plantation en fin de printemps 20/25/25/10 et (80) ; climats désertiques, plantation en fin de saison fraîche 20/30/30/10 et (90) ; climats désertiques, plantation en début de saison fraîche 20/30/50/10 et (110).
Maïs (grains)	Sur les hautes terres d'Afrique orientale, plantation au printemps, 30/50/60/40 et (180) ; climats désertiques chauds, plantation en fin de saison fraîche, 25/40/45/30 et (140) ; Nigéria sub-humide, plantation en juin ; Inde, plantation début octobre, 20/35/40/30 et (125) ; Séville Espagne, plantation début avril, 30/40/50/30 et (150).
Coton	Egypte, plantation en mars ; Pakistan, plantation en avril-mai ; Arabie du sud, plantation en septembre, 30/50/60/55 et (195) ; Texas, plantation en mars, récolte mécanisée, 30/50/55/45 et (180).
Crucifères	La longueur de la saison varie considérablement pour les différentes variétés ; climats méditerranéens et continentaux, plantation en mars, 20/30/20/10 et (80) ; climats méditerranéens, plantation à la fin de l'hiver, 25/35/25/10 et (95) ; côtes méditerranéennes, plantation en automne, 30/35/90/40 et (195).
Concombre	Egypte, plantation en juin ; Désert de Californie, plantation en août-octobre, 20/30/40/15 et (105) ; climats semi-arides et climats arides à saisons fraîches, déserts de basse altitude, plantation au printemps, 25/35/50/20 et (130).
Aubergines	Climats désertiques à hivers chauds, 30/40/40/20 et (130) ; climats méditerranéens, plantation en fin de printemps début été, 30/45/40/25 et (140).
Lin	Climats à hivers froids, plantation de printemps, 25/35/50/40 et (150) ; Désert d'Arizona, (basse altitude), 30/40/100/50 et (220).
Céréales	Climats méditerranéens, plantation au printemps, 20/30/60/40 et (150) ; climats à hivers doux, plantation octobre-novembre ; Pakistan et déserts de basse altitude, 25/35/65/40 et (165).
Lentilles	Climats à hivers froids, plantation au printemps, 20/30/60/40 et (150) ; climats à hivers doux, plantation avant la saison fraîche, 25/35/70/40 et (170).
Laitue	Climats méditerranéens, plantation au printemps, 20/30/15/10/ et (75), plantation à la fin de l'hiver, 30/40/25/10 et (105) ; climats désertiques de basse altitude, plantation en début de saison fraîche, 25/35/30/10 et (100) ; déserts de basse altitude, plantation en fin de saison fraîche, 35/50/45/10 et (140).
Melons	Climats méditerranéens, plantation à la fin du printemps, 25/35/40/20 et (110) ; climats désertiques de basse

	altitude, plantation au milieu de l'hiver, 30/45/65/20 et (160).
Avoine	Voir orge.
Oignons (secs)	Climats méditerranéens, plantations au printemps, 15/25/70/40 et (150) ; climats semi-arides et arides désertiques, plantation avant hiver doux 20/35/110/45 et (210).
Oignons (verts)	Respectivement, 25/30/10/5 et (70) et 20/45/20/10 et (95).
Arachides (cacahuètes)	Afrique occidentale, plantation en saison sèche, 25/35/45/25 et (130) ; plaines côtières du Liban et d'Israël, plantation en fin de printemps ; 35/45/35/25 et (140).
Pois	Climats maritimes frais, plantation au début de l'été 15/25/35/15 et (90) ; climats méditerranéens, plantation au début de printemps, et climats désertiques à hiver doux, 20/25/35/15 et (95), climats méditerranéens, plantation à la fin de l'hiver, 25/30/30/15 et (100).
Poivrons	Frais – climats méditerranéens, plantation au début du printemps et climats continentaux, plantation au début de l'été, 30/35/40/20 et (125) ; climats continentaux, côtiers frais, plantation à la mi-printemps 25/35/40/20 et (120) ; climats désertiques, plantation avant hiver doux, 30/40/110/30 et (210).
Pommes de terre (irlandaises)	Climats désertiques à hiver doux, plantation complète, 25/30/30/20 et (105) ; climats arides et semi-arides, plantation à la fin de l'hiver ; et climats continentaux, plantation fin printemps début été, 25/30/45/30 et (130) ; Europe centrale, plantation début-milieu de printemps ; 30/35/50/30 et (145) ; une levée lente peut rallonger de 15 jours la période initiale si le printemps est froid.
Radis	Climats méditerranéens, plantation début de printemps et climats continentaux, plantation en été, 5/10/15/5 et (35) ; littoral méditerranéen, climats désertiques à hiver doux, plantation à la fin de l'hiver ; 10/10/15/5 et (40).
Carthame	Californie centrale, plantation début-mi-printemps, 20/35/45/25 et (125) plantation à la fin de l'hiver, 25/35/55/30 et (145) ; climats désertiques à étés doux, 35/55/60/40 et (190).
Sorgho	Climats désertiques, saison chaude, 20/30/40/30 et (120) ; Pakistan, plantation mi-juin ; Middle-West des Etats-Unis et climat méditerranéen, plantation en juin, 20/35/40/30 et (125) ; climats arides chauds, plantation au début du printemps, 20/35/45/30 et (130).
Fèves de soja	Centre des Etats-Unis, plantation en mai, 20/35/60/25 et (140) ; Désert de Californie, plantation mai-juin, 20/30/60/25 et (135) ; Philippines, plantation fin décembre, début saison sèche – fèves sèches, 15/15/40/15 et (85), à consommer frais, 15/15/30 et (60).
Epinards	Climats méditerranéens, plantation au printemps, 20/20/15/5 et (60) ; climats méditerranéens, plantation de septembre-octobre et à la fin de l'hiver, 20/20/25/5 et (70) ; climats désertiques à hivers doux 20/30/40/10 et (100).
Courge (hiver citrouille)	Climats méditerranéens et climats désertiques à hivers doux, plantation à la fin de l'hiver, 20/30/30/15 et (95) ; Désert de Californie, plantation en août, 20/35/30/25 et (110) ; Europe maritime, plantation début juin, 25/35/35/25 et (120).
Courge (courgette) calebasse	Climats méditerranéens, plantation au printemps, 25/35/25/15 et (100) ; climat méditerranéen et Europe maritime, plantation début de l'été, 20/30/25/15 et (90 ⁺) ; déserts chauds, plantation en hiver, 25/35/25/15 et (110).
Betterave sucrière	Côtes du Liban, plantation mi-novembre 45/75/80/30 et (230) ; ou plantation au début de l'été, 25/35/50/50 et (160) ; Uruguay, plantation au début de printemps, 30/45/60/45 et (180) ; désert à hivers doux, plantation à la fin de l'hiver, 35/60/70/40 et (205).
Tournesol	Climats méditerranéens, plantation au printemps, 25/35/45/25 et (130) ; Désert de Californie, plantation au début de l'été, 20/35/45/25 et (125).
Tomate	Climats désertiques à hivers doux, 30/40/40/25 et (135), fin automne 35/45/70/30 et (150) ; climats méditerranéens ; plantation au printemps, 30/40/45/30 et (145).
Blé	Voir orge.

* 40/40/250/30 et (360) sont des chiffres qui correspondent respectivement à la durée de la phase initiale, de la phase de développement de la culture, de la phase de mi-saison et de la phase d'arrière-saison (en jours), et (360) correspond à la durée totale de la croissance (en jours), depuis la plantation jusqu'à la récolte.

Tableau A7.2 : Coefficient cultural Kc pour les différentes phases de croissance.

Culture	Humidité		Hrmin > 70 %		Hrmin < 20 %	
	Vent m/s		0 - 5	5 - 8	0 - 5	5 - 8
	Phase		Exploiter la fig. A6.1 par interpolation			
Toutes les cultures de plein champ	Initiale	1				
	développement	2				
Artichauts (culture pérenne-sarclée)	mi-saison	3	0,95	0,95	1,0	1,05
	à la récolte	4	0,9	0,9	0,95	0,10
Orge		3	1,05	1,1	1,15	1,2
		4	0,25	0,25	0,2	0,2
Haricots (verts)		3	0,95	0,95	1,0	1,05
		4	0,85	0,85	0,9	0,9
Haricots (secs)		3	1,05	1,1	1,15	1,2
Légumineuses		4	0,3	0,3	0,25	0,25
Betteraves (de table)		3	1,0	1,0	1,05	1,1
		4	0,9	0,9	0,95	1,0
Carottes		3	1,0	1,05	1,1	1,15
		4	0,7	0,75	0,8	0,85
Graines de ricin		3	1,05	1,1	1,15	1,2
		4	0,5	0,5	0,5	0,5
Céleri		3	1,0	1,05	1,1	1,15
		4	0,9	0,95	1,0	1,05
Maïs (doux)		3	1,05	1,1	1,15	1,2
		4	0,95	1,0	1,05	1,1
Maïs (grains)		3	1,05	1,1	1,15	1,2
		4	0,55	0,55	0,6	0,6
Coton		3	1,05	1,15	1,2	1,25
		4	0,65	0,65	0,65	0,7
Crucifères (choux, choux-fleurs, brocolis, choux de Bruxelles)		3	0,95	1,0	1,05	1,1
		4	0,80	0,85	0,9	0,95
Concombre		3	0,9	0,9	0,95	1,0
Culture potagère		4	0,7	0,7	0,75	0,8
Culture mécanisée		4	0,85	0,85	0,95	1,0
Aubergines		3	0,95	1,0	1,05	1,1
		4	0,8	0,85	0,85	0,9
Lin		3	1,0	1,05	1,1	1,15
		4	0,25	0,25	0,2	0,2
Céréales		3	1,05	1,1	1,15	1,2
		4	0,3	0,3	0,25	0,25
Lentilles		3	1,05	1,1	1,15	1,2
		4	0,3	0,3	0,25	0,25
Laitues		3	0,95	0,95	1,0	1,0
		4	0,9	0,9	0,9	1,0
Melons		3	0,95	0,95	1,0	1,05
		4	0,65	0,65	0,75	0,75
Mils		3	1,0	1,05	1,1	1,15
		4	0,3	0,3	0,25	0,25
Culture	Humidité	Hrmin	> 70 %	Hrmin	< 20 %	
	Vent m/s	0 - 5	5 - 8	0 - 5	5 - 8	
Avoine		3	1,05	1,1	1,15	1,2
		4	0,25	0,25	0,2	0,2

Tableau A7.2 : (suite)

Oignons (secs)	3	0,95	0,95	1,05	1,1
	4	0,75	0,75	0,8	0,85
Oignons (verts)	3	0,95	0,95	1,0	1,05
	4	0,95	0,95	1,0	1,05
Arachides (cacahuètes)	3	0,95	1,0	1,05	1,1
	4	0,55	0,55	0,6	0,6
Pois	3	1,05	1,1	1,15	1,2
	4	0,95	1,0	1,05	1,1
Poivrons (frais)	3	0,95	1,0	1,05	1,1
	4	0,8	0,85	0,85	0,9
Pomme de terre	3	1,05	1,1	1,15	1,2
	4	0,7	0,7	0,75	0,75
Radis	3	0,8	0,8	0,85	0,9
	4	0,75	0,75	0,8	0,85
Carthame	3	1,05	1,1	1,15	1,2
	4	0,25	0,25	0,2	0,2
Sorgho	3	1,0	1,05	1,1	1,15
	4	0,5	0,5	0,55	0,55
Fèves de soja	3	1,0	1,05	1,1	1,15
	4	0,45	0,45	0,45	0,45
Epinards	3	0,95	0,95	1,0	1,05
	4	0,9	0,9	0,95	1,0
Courges	3	0,9	0,9	0,95	1,0
	4	0,7	0,7	0,75	0,8
Betterave sucrière	3	1,05	1,1	1,15	1,2
	4	0,9	0,95	1,0	1,0
	4	0,6	0,6	0,6	0,6
Tournesol	3	1,05	1,1	1,15	1,2
	4	0,4	0,4	0,35	0,35
Tomates	3	1,05	1,1	1,2	1,25
	4	0,6	0,6	0,65	0,65
Blé	3	1,05	1,1	1,15	1,2
	4	0,25	0,25	0,2	0,2

**Annexe 8 : Ordres de grandeur des doses d'engrais utilisées pour les principales cultures au Maroc
(FAO, 2006)**

Culture	N (Kg/ha)	P2O5(Kg/ha)	K2O (Kg/ha)
Céréales	60	40	20
Légumineuses	30	40	20
Fourrages	50	60	30
Agrumes	160 à 180	50	150 à 180
Rosacées	70	45	60
Olivier	80	20	30
Vigne	150	100	120
Maraîchage sous serre	120	100	140
Maraîchage plein champ	70	60	80
Palmier dattier	60	80	50
Tournesol	60	60	100
Betterave à sucre	160	100	200
Pomme de terre	30	150	180

NB. Ces doses correspondent à des valeurs de doses pratiquées. Il ne s'agit ni de doses recommandées ni de doses optimales. En outre, la dose dépend, en plus des facteurs agronomiques connus, du niveau de production. Exemple, un rendement en céréales de 30 quintaux/ha requiert environ 90 kg/ha et un rendement de 90 quintaux/ha, requiert près de 270 kg/ha.

**Annexe 9 : Teneurs limites en éléments -traces métalliques dans les sols agricoles (mg/kg sol sec), selon les différents pays de l'Union Européenne (UE) et la Suisse.
D'après, OTV (1997)**

ETATS	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Zn	As	Mo	F	Co	Ti
UE pH 6 à 7	1 à 3	100 à 200	50 à 140 (a)	1 à 1.5	30 75 (a)	50 à 300	150 à 300(a)	-	-	-	-	-	-
France pH > 6	2	150	100	1	50	100	-	300	-	-	-	-	-
Allemagne	1-1.5 (b)	100	60	1	50	100	10	150 à 200 (b)	-	-	-	-	-
Belgique													
– Wallonie pH > 6	1	100	50	1	50	100	-	150 à 200 (c)	-	-	-	-	-
– Flandre, sols sableux	1	100	50-75 (d)	1	60-45(d)	50	-	150 à 225(d)	-	-	-	-	-
– Flandre autres sols	3	150	140	1.5	75	300	-	300	-	-	-	-	-
Danemark		30	40	0.5	15	40	-	100	-	-	-	-	-
Espagne													
- pH < 7	1	100	50	1	30	50	-	150	-	-	-	-	-
- pH > 7	3	150	210	1.5	112	300	-	450	-	-	-	-	-
Grèce	1 à 3	-	50 à 140	1 à 1.5	30-75	50 à 300	-	150 à 300	-	-	-	-	-
Irlande													
– pH < 7	1	-	50	1	30	50	-	150	-	-	-	-	-
– pH > 7	1.5	-	175	1.5	45	75	-	225	-	-	-	-	-
Italie	1.5	(e)	100	1	75	100	-	300	-	-	-	-	-
Luxembourg (f)	1 à 3	100 à 200	50 à 140 (a)	1 à 1.5	30 à 75(a)	50 à 300	-	150 à 300 (a)	-	-	-	-	-
Pays - Bas	0.8	100	36	0.3	35	85	-	140	29	-	-	-	-
Portugal	Les teneurs - limites ne figurent pas dans l'arrêté: celles proposées par l'UE sont à l'étude et devraient être retenues												
Royaume Uni													
- Terres labourées (25 cm)													
pH 5 à 5.5	3(h)	40	80(h)	1(h)	50(h)	300(h)	3	200(h)	50	4	500	-	-
pH 5.5 à 6	3(h)	400	100(h)	1(h)	60(h)	300(h)	3	250(h)	50	4	500	-	-
pH 6 à 7	3(h)	400	135(h)	1(h)	75(h)	300(h)	3	300(h)	50	4	500	-	-
pH > 7	3(h)	400	200(h)	1(h)	110(h)	300(h)	3	450(h)	50	4	500	-	-
Sous pâture (7.5 cm)													
pH 5 à 5.5	3.5(i)	600	130	1.5	80	300	5	300	50	4	500	-	-
pH 5.5 à 6	3.5(i)	600	170	1.5	100	300	5	420	50	4	500	-	-
pH 6 à 7	3.5(i)	600	225	1.5	125	300	5	500	50	4	500	-	-
pH > 7	3.5(i)	600	300	1.5	180	300	5	750	50	4	500	-	-