MANUEL TECHNIQUE



FERTIGATION ASSOCIEE AUX RÉSEAUX GOUTTE-À-GOUTTE ALIMENTÉS PAR DES SYSTÈMES DE POMPAGE SOLAIRE



Sommaire

Introduction générale

I.	Le volet économie d'eau d'irrigation : un secteur en développement soutenu	06
II.	La fertigation : levier de performance et de rendement	08
III.	L'énergie solaire dans l'agriculture : un domaine en croissance soutenue	08
IV.	Objectifs du manuel	08

Chapitre 1 : Irrigation localisée ; bases théoriques, notes sur le dimensionnement d'un réseau G à G, maintenance du système, méthodes et technologies de pilotage d'irrigation 09

V.	Présentation d'un système d'irrigation goutte à goutte	09
1.1.1	Principe de l'irrigation goutte à goutte	09
1.1.2	Avantages et inconvénients :	09
1.1.3	Composantes d'un système d'irrigation goutte à goutte	10
1.1.4	Maintenance et Entretien des équipements	11
VI.	Notes sur la conception et le dimensionnement hydraulique d'un réseau d'irrigation GàG	11
1.1.5	Données de base pour le dimensionnement du réseau d'irrigation localisée	11
1.1.6	Le dimensionnement d'une station de pompage	17
1.1.7	Cas d'étude pour la conception d'un réseau d'irrigation GAG	18
VII.	Bases théoriques de gestion d'irrigation au goutte-à-goutte : relations Eau sol plante atmosphère	20
1.1.8	Détermination des besoins en eau des cultures	20
1.1.9	Evapotranspiration de références ETP ou ET0	20
1.1.10	Evapotranspiration culturale ou Maximale ETM ou Etc	21
1.1.11	Notion de base du comportement de l'eau dans le sol	21
1.1.12	Bonnes pratiques de l'irrigation	22
VIII.	Nouvelles technologies de pilotage d'irrigation	27
1.1.13	Suivi de l'état de l'eau dans l'atmosphère : Station agro-météorologique	27
1.1.14	Suivi de l'humidité du sol	27
IX.	SMART Irrigation	28
1.1.15	Irrigation digitale	28
1.1.16	Nouvelles générations de systèmes d'irrigation au goutte-à-goutte	28

Liste des figures

Chapitre 2 : La fertigation : bases techniques de calcul des besoins et méthodes de contrôle 30

I. Introduction 30
II. Stratégies de diagnostique nutritionnel et de gestion de la fertigation des plantes 31
2.2.1 Introduction : la fertilisation raisonnée 31
2.2.2 Etablissement d'un programme de fertigation 31
2.2.3 Engrais pour fertilisation 32
2.2.4 Méthodes et technologies de contrôle de la fertilisation en goutte-à-goutte 32
2.2.5 station de fertigation 32
2.2.6 Réservoir d'engrais 34
2.2.7 Critères de choix d'un appareil d'injection 34
2.2.8 Raisonnement de la fertigation 34
2.2.9 Eléments de gestion de la fertigation 36

Chapitre 3 : Etude de cas de projets de conversion du pompage conventionnel vers le pompage solaire avec système de fertigation : Cas d'irrigation directe (absence du bassin) 42

I- Introduction 42
II- Situation de base : pompage conventionnel 43
III- Projet de conversion vers le pompage solaire 44
1. Dimensionnement du champs photovoltaique 44
IV- Analyse des caracteristiques techniques, financieres et environnementales lies a la conversion. 48
V- Etude comparative avec le cas d'existence du bassin et analyse de la situation 49
VI- Recommandations 50

Figure 1: Composante d'un système 'irrigation Goutte à goutte' 10
Figure 2 : Efficacité de pompe (rendement) suivant le débit en m3/heure 17
Figure 3 : schéma des stratégies a suive pour le pilotage d'irrigation 22
Figure 4 : Etapes à suivre pour préparer un programme d'irrigation 24
Figure 5 : différents types de tensiomètre 27
Figure 6 : Concept de la nano irrigation 28
Figure 7 : comparaison entre la nano-irrigation et l'irrigation en surface 29
Figure 8 : Diagramme d'assimilation des éléments minéraux en fonction du Ph du sol (d'après Triog et Bachelier). 31
Figure 9 : Photo d'un programmateur des irrigations avec un kit injection automatique 32
Figure 10. Principe de fonctionnement du venturi 33
Figure 11 : Schéma d'injection de la solution mère dans le réseau 35
Figure 12 : Point d'injection de la solution mère dans le réseau 35
Figure 13 : schéma qui illustre l'effet d'un facteur limitant sur la production 37
Figure 14 : Schéma de l'outil de contrôle et de pilotage de la fertigation 38
Figure 15 : outils de suivi de la fertigation 40
Figure 16 : Hauteur manométrique total 45
Figure 17 : Séquence typique de débits de pompage (Q) et le comportement du niveau d'eau. 46
Figure 18 : Besoin en eau journaliers pour la parcelle concernée 46
Figure 19 : Bilan : besoin/productible 48



INTRODUCTION GÉNÉRALE

I. Le volet économie d'eau d'irrigation : un secteur en développement soutenu

Au Maroc, en 2018, les terres agricoles représentaient près de 67,4 % du territoire national "1", toutes fois une grande partie de cette surface est dédiée aux parcours (53 millions d'ha dont un tiers environ est sur-pâturé) et les forêts s'étendent sur 9 millions ha. Les terres cultivables ne couvrent ainsi que 8,8 millions d'ha (soit 18 % de la superficie totale du pays). Environ 1,4 million d'ha, soit 17 % de cette surface sont irriguées, le reste est constitué de terres Bour, avec 55 % de la surface agricole utile (SAU) de Bour défavorable et 27 % en Bour favorable. La répartition de l'irrigation pluviale s'est élevée en 2017 à 81 % alors que l'irrigation de la petite et moyenne hydraulique (PMH) était de 4 %, l'irrigation privée est de 6% et la grande hydraulique de 9% "2". L'agriculture marocaine représente en moyenne 14 % du PIB malgré le climat aride à semi-aride de la majorité de son territoire. L'irrigation est considérée comme le principal consommateur d'eau avec 85% des eaux mobilisées, malgré qu'elle ne concerne que 17% de la surface agricole utile. Ce secteur consomme quelque 4 milliards de m3 par an, pour une demande exprimée de 5 milliards de m^3) "3". Les changements dans les régimes de température et de précipitations peuvent affecter les processus hydrologiques et la disponibilité des ressources en eau pour l'agriculture, la population, les mines, l'industrie, la vie aquatique et l'hydro-électricité.

Le Maroc s'est investi dans une volonté de promouvoir des techniques d'irrigation économes et efficientes en eau, telles que l'irrigation localisée, en particulier le système « goutte à goutte », en vue d'une meilleure valorisation de l'eau (produire plus avec moins d'eau). Le goutte-à-goutte n'est pas seulement un système d'économie de l'eau, mais aussi un outil qui contribue à l'économie d'énergie, à l'efficience d'utilisation des engrais, et à l'optimisation de la main d'œuvre. Il est donc un facteur d'amélioration de la productivité et de la rentabilité ainsi qu'un facteur de préservation des ressources et de l'environnement.

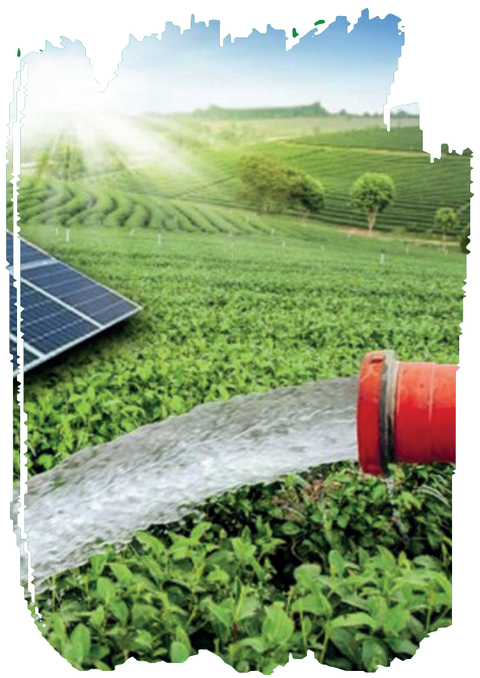
Dans le cadre du Plan Maroc Vert, plusieurs programmes ont été lancés par le ministère d'agriculture marocain en particulier le Programme National d'Economie d'Eau en Irrigation (PNEEI), le Programme d'Extension de l'Irrigation (PEI) à l'aval des barrages, le Programme de la Réhabilitation et de Sauvegarde des Périmètres de Petite et Moyenne Hydraulique (PMH) ou encore le Programme de Promotion du Partenariat Public-Privé (PPP), qui ont permis à fin 2019, d'équiper près de 800 000 ha en irrigation, soit environ 50% de la superficie irriguée au niveau national, avec un investissement de 36,1 milliards de DH au profit de 235 000 exploitations(MAPMDREF, 2020). Ces initiatives ont permis d'économiser et de valoriser annuellement plus de 2 milliards de m3 d'eau d'irrigation, dont 1,6 milliard de m3 au titre du PNEEI et la superficie irriguée en goutte à goutte dans la superficie irriguée totale s'est améliorée pour passer de 9% en 2008 à 37% en 2019. Dans ce sens, le ministère d'agriculture poursuit ses efforts pour la rationalisation de l'utilisation de l'eau d'irrigation et sa valorisation dans le cadre de la nouvelle stratégie Génération Green et du « Programme National d'Approvisionnement en Eau Potable et en Eau d'Irrigation 2020-2027 ». Comme mentionné précédemment, le PNEEI a visé une reconversion massive des exploitations agricoles à l'irrigation localisée.

Les modernisations collectives correspondent, d'une part, à un ajustement par l'Etat, des réseaux d'irrigation collectifs pour leur permettre d'assurer une distribution de l'eau telle qu'elle est exigée par l'irrigation localisée et, d'autre part à l'équipement des parcelles dominées par ces réseaux en matériel.

Les modernisations individuelles correspondent à la reconversion à l'irrigation localisée au niveau d'une exploitation, elles sont laissées à l'initiative des agriculteurs et bénéficient des aides de l'Etat dans le cadre du FDA. La valorisation agricole est aussi une condition nécessaire pour la réussite du programme. Elle est réalisée à travers la promotion de cultures à forte valeur ajoutée et de pratiques culturales moins consommatrices en eau, d'une part, et la transformation et la commercialisation des productions agricoles, d'autre part. L'appui technique effectué par les agents des CCA et qui consiste à encadrer les agriculteurs pour maitriser les techniques d'irrigation modernes.

Les principaux effets attendus du PNEEI portent sur :
L'économie d'eau de 20 à 50% par réduction des pertes d'eau tant au niveau des réseaux de distribution qu'au niveau de son allocation à la parcelle ;
Doublement de la valeur ajoutée par m3 (2,6 Dh/m3 à 5,6 Dh/m3) ; L'augmentation de la productivité de l'eau de 10 à 100% selon les cultures.

Vise le doublement de la valorisation de l'eau d'irrigation et l'économie de 85 Mm3 d'eaux supplémentaires annuellement à l'horizon 2030.Le plan national d'économie d'eau et plus particulièrement destinée à couvrir 72% de la superficie totale programmée. S'agissant de la conversion individuelle vers l'irrigation goutte-à-goutte, le programme 2021 permettra de couvrir près de 50.000 hectares supplémentaires pour atteindre une superficie totale de 693.000 hectares.



II. La fertigation : levier de performance et de rendement

La répartition de la consommation des engrais selon les cultures montre qu'environ 32 pour cent des engrais sont utilisés sur les agrumes, les cultures sucrières et maraîchères, qui n'occupent que cinq pour cent de la superficie cultivée. Les cultures céréalières occupent 63 pour cent des superficies cultivées mais ne mobilisent qu'environ 43 pour cent des tonnages globaux. Avec le recours à l'irrigation fertilisante, l'alimentation hydrominérale de la plante devrait permettre une meilleure efficience d'utilisation des engrais. En pratiquant la fertigation les apports d'engrais peuvent être réduits dans les cultures les plus consommatrices d'engrais (cultures maraîchères, arboricoles et sucrières) de plus de 30% en moyenne, et participerait à l'amélioration de la fertilisation chez les autres cultures.

III. L'énergie solaire dans l'agriculture : un domaine en croissance soutenue

L'énergie solaire photovoltaïque constitue une alternative avantageuse par rapport aux autres sources d'énergie. Le Maroc, dans le cadre de sa stratégie de transition énergétique s'est donné pour objectif de porter à 52% la part des énergies renouvelables dans le mix électrique national d'ici 2030. Il s'est également engagé à atteindre l'objectif de 20% d'économie d'énergie en 2030 et à diminuer les rejets de gaz à effet de serre de plus de 32% d'ici 2030. La consommation totale finale en KTEP pour le secteur de l'agriculture (agriculture et pêche) présente 7,5%. (Bilan énergétique 2017)[5].

En effet, le pompage agricole fait appel essentiellement à l'énergie d'origine thermique (le gasoil et le gaz butane), les pompes électriques alimentées par le réseau BT occupent une part du parc de pompes d'eau installé au niveau des exploitations disposant d'un raccordement électrique, alors que le Maroc dispose d'un grand potentiel en énergie solaire, avec une bonne répartition sur l'ensemble de l'année.

5. Data and statistics - Morocco : Balances 2018 [archive], Agence internationale de l'énergie, 12 septembre 2020.

Le passage de l'irrigation par aspersion ou gravitaire à une irrigation localisée associée à un pompage solaire apporte des avantages économiques substantiels, allant de revenus et de rendements plus élevés à la réduction des besoins en travail et des factures d'énergie.

IV. Objectifs du manuel

Ce manuel se veut un outil de sensibilisation et vulgarisation sur les trois domaines aujourd'hui fortement associés et qui convergent vers les objectifs d'une économie verte, de technologie bas carbone et d'une agriculture durable. Il traite les éléments de base, les bonnes pratiques et les exigences liées aux projets d'irrigation goutte à goutte et de fertigation.

Ce manuel apporte une analyse de situation de conversion d'un pompage conventionnel vers un pompage solaire et des éléments de réponse pour permettre cette conversion dans les meilleures conditions techniques et économiques possibles



Chapitre 1:

Irrigation localisée ; bases théoriques, notes sur le dimensionnement d'un réseau G à G, maintenance du système, méthodes et technologies de pilotage d'irrigation

V. Présentation d'un système d'irrigation goutte à goutte

1.1.1 Principe de l'irrigation goutte à goutte :

Le goutte-à-goutte fait partie des techniques d'irrigation sous pression, dans lesquelles la force motrice du mouvement de l'eau provient d'une source d'énergie extérieure. L'eau est distribuée par un réseau de canalisations fermées. L'irrigation au goutte-à goutte se caractérise principalement par l'humidification partielle du sol. L'eau est appliquée par plusieurs émetteurs minuscules, 5000 à 30000 par hectare. Dans les installations en surface, chaque émetteur mouille la surface du sol qui lui est adjacente. Le pourcentage de la zone humectée et le volume de sol mouillé dépendent des propriétés du sol, de son degré d'humidité initiale, du volume d'eau appliqué et du débit de l'émetteur.

1.1.2 Avantages et inconvénients :

a- Avantages

L'irrigation au goutte-à-goutte possède de nombreux avantages sur les autres systèmes d'irrigation. Elle augmente de façon significative l'efficacité de l'utilisation de l'eau et améliore les conditions de développement des cultures irriguées ;

- Précision de l'apport en eau
- Réduction des pertes par évaporation
- Elimination du gaspillage d'eau sur l'entourage des parcelles irriguées
- Diminution de risque des mauvaises herbes
- Equilibrage du rapport air-eau dans le sol
- Application intégrée de l'eau, d'engrais et des produits phytosanitaires
- Ajustement à la variabilité des besoins des cultures au cours de leurs cycles
- Automatisation
- Adaptation à la topographie et aux conditions difficiles des sols

b- Inconvénients

En raison de l'importance d'équipement demandé, du volume relativement limité du sol humecté, et du passage étroit de l'eau dans les émetteurs, l'irrigation au goutte-à-goutte présente cependant certains inconvénients.

- Risques de colmatage
- Coûts initiaux d'investissement élevés
- Accumulation de sel sur la surface du sol
- Diminution du volume racinaire

Pour tirer profit des avantages de ce système d'irrigation localisée et pour éviter les inconvénients cités, il est impératif d'une part de bien concevoir et bien dimensionner le réseau d'irrigation en choisissant le matériel adéquat et adapté aux conditions environnantes et d'autre part de bien réussir son installation, en plus d'un raisonnement correct des arrosages. De plus l'entretien du réseau, et le nettoyage des filtres sont des opérations importantes pour réussir le bon fonctionnement du réseau. Des indicateurs de performances indiquent l'état du système comme le coefficient d'uniformité



1.1.3 Composantes d'un système d'irrigation goutte à goutte

Le système se compose d'une station de tête et d'un réseau de distribution. La Figure 1 ci-dessous illustre les différentes composantes du système d'irrigation GAG. Le système de filtration schématisé ci-dessous est donné à titre indicatif. Dans d'autres conditions, on peut avoir un filtre à disques, un hydrocyclone ou un ensemble de filtres.

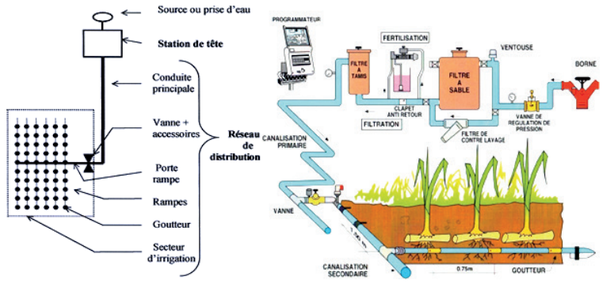


Figure 1 Composante d'un système 'irrigation Goutte à goutte'

1.1.3.1 Composantes d'une station de tête

a- Station de pompage

S'agissant d'une irrigation sous pression, l'installation doit prévoir un équipement qui fournit la pression nécessaire au fonctionnement de ce système. Cet équipement consiste en une station de pompage. Il existe plusieurs types de pompes dont celle à axe horizontal, à axe vertical ou le type immergé.

b- Matériel de filtration

En irrigation localisée, la propreté de l'eau est un élément essentiel pour le bon fonctionnement du réseau. En raison du faible diamètre de sortie des goutteurs généralement inférieurs au millimètre (0,5 à 0,8 mm) il est nécessaire d'utiliser une eau qui soit débarrassée de toutes ses impuretés, pour limiter les risques d'obstruction et conserver le débit nominal du goutteur. Les causes d'obstruction des goutteurs sont d'ordre physique, chimique ou biologique. Le choix des filtres et de leurs séquences dépend de la qualité et de l'origine de l'eau, ainsi que du débit de la source d'eau (tableau 1).

Tableau 1: Choix des filtres en fonction de l'origine et de la qualité de l'eau (adapté de cemagref, 1992)

Origine de l'eau	Impuretés	Système de filtration à utiliser
Eaux souterraines	Propre	Filtre à tamis ou à lamelles
	Sable	Filtre hydrocyclone + filtre à tamis ou à lamelles
Eau de surface	Sable, Limon et algues	Hydrocyclone + filtre à sable + filtre à tamis ou à lamelles
	Algues, éléments fins ou organiques en suspension	Filtre à sable + filtre à tamis ou à lamelles

N.B : Plus l'eau est de mauvaise qualité plus on recherchera à mettre en place des filtres à nettoyage automatique.

c- Matériel d'injection

Le matériel d'injection d'engrais est indispensable à la réalisation de la fertigation. Il sert également à l'injection dans l'eau d'irrigation, des produits de traitements de l'eau (des acides), des pesticides ou d'autres produits chimiques.
Parmi les injections utilisées, on peut citer :

- Les pompes doseuses
- Les Injecteurs venturi

1.1.3.2 Composantes d'un réseau de distribution

Le réseau de distribution est composé de canalisation, de distributeurs et d'un ensemble d'accessoires.

a- Les canalisations

Parmi les canalisations, on distingue la conduite d'amenée, les porte-rampes, les rampes.

b- Les goutteurs

Les goutteurs répartissent l'eau sur la parcelle au voisinage de la culture.

1.1.4 Maintenance et Entretien des équipements

1.1.4.1 Critères de performance d'une installation d'irrigation localisée

L'évaluation consiste en l'analyse basée sur des mesures prises au champ. Une formule est donc proposée pour calculer un coefficient d'uniformité (CU) d'application de l'eau. La formule simplifiée de ce coefficient est définie par l'équation suivante :

$$CU = 100 \cdot \frac{Qmin}{Q}$$

Avec

- CU : coefficient d'uniformité de distribution de l'eau.
- Qmin : la moyenne des 4 valeurs les plus faibles.
- Q : la moyenne des 16 valeurs mesurées.

Au niveau de la parcelle, le coefficient d'uniformité peut être déterminé en suivant la procédure décrite dans le bulletin FAO 36 en utilisant les mesures de débits de 16 goutteurs, pris sur quatre rampes différentes :

- Première rampe et dernière rampe,
- Puis rampe située au tiers et rampe située aux deux tiers.

Sur chaque rampe, on choisit pour la mesure, le premier et le dernier goutteur, puis celui situé au tiers et celui situé aux deux tiers de la rampe. Selon les valeurs prises par ce coefficient, trois cas sont à envisager :

- VALEUR DU CU (%) SUPÉRIEURE À 90% : L'installation fonctionne correctement ;
- VALEUR DU CU (%) COMPRISE ENTRE 80% ET 90% : Il faut vérifier les calculs et l'installation si le réseau est neuf, sinon il faut rapidement procéder à un nettoyage ;
- VALEUR DU CU (%) INFÉRIEURE À 80% : il faut refuser l'installation si le réseau est neuf, sinon il faut impérativement rechercher les causes probables de colmatage et de traiter.

VI. Notes sur la conception et le dimensionnement hydraulique d'un réseau d'irrigation GàG

1.1.5 Données de base pour le dimensionnement du réseau d'irrigation localisée

Un projet de dimensionnement d'un réseau d'irrigation localisée se fait en 3 étapes :

1ère étape : collecte de données :

Les renseignements portent sur les ressources en eau, le climat, la culture et le sol.

2ème étape : conception et étude technique du projet :

• Détermination des besoins d'irrigation de pointe.
Ils correspondent aux besoins nets les plus élevés enregistrés durant une période de l'année. Si on considère un assolement, la période de pointe est la période où le besoin net moyen pondéré sur la surface est maximal. Les besoins bruts de pointe (Bbp) utilisés pour le calcul du réseau d'irrigation localisée sont donnés par l'équation ci-dessous :

$$Bbp = Bnp / CU \times Ei$$

Avec :

- CU : Coefficient d'uniformité du réseau = 0,85 à 0,95.
- Ei: Efficience du système d'irrigation au niveau de la zone radiculaire = 0,90.
- Bnp : Besoins en eau nets en période de pointe de la culture en mm sont donnés par la formule suivante

$$Bnp = ETMp = Kc \times ET0p^{*}kr$$

Bnp = Etc –Pe ± ΔS (capillarité humidité du sol) avec Etc = Kc . Kr (occupation du sol). Et0

Avec :

- ETMp: Evapotranspiration maximale de pointe ;
- ET0p : Evapotranspiration de référence de pointe ;
- Kc : Coefficient cultural qui caractérise les stades de croissance d'une culture.
- Kr : Coefficient de réduction, appelé aussi de raisonnement. Il caractérise le Taux de couverture végétale (voir tableau ci-dessous).

Valeurs de kr résultant des diverses formules proposées (Bulletin de la FAO N° 36).

Taux de Couverture du sol (%)	Valeurs de Kr selon la formule de :		
	Keller et Karmeli	Freeman et garzoli	Decroix
10	0.12	0.10	0.20
20	0.24	0.20	0.30
30	0.35	0.30	0.40
40	0.47	0.40	0.50
50	0.59	0.75	0.60
60	0.70	0.80	0.70
70	0.82	0.85	0.80
80	0.94	0.90	0.90
90	1.00	0.95	1.00
100	1.00	1.00	1.00

- **Choix des distributeurs d'eau**

Le choix du distributeur se fait en fonction du type du sol et la culture. Les écartements entre gouteurs dépendent de la texture du sol. Le tableau 2 (keller et kameli) ci-dessous présente des recommandations pour la détermination des écartements entre gouteur afin d'avoir une bande humectée de 100 % tout au long la ligne de plantation.

- **Ecartement entre rampes**

Le choix des écartements entre les rampes est fonction des caractéristiques des distributeurs, du pourcentage d'humectation du sol à 30cm et de la texture du sol (Tableau 2). Par exemple pour un débit de gouteur de 4l/h, un sol de texture moyenne donnant un espacement de 1 m entre gouteurs sur la rampe, l'écartement E1 assurant 100% d'humidité du sol est de E1= 1 m (tableau 2).

Tableau2: Guide d'estimation de P (J.Keller&D.Karmelli)

(P=pourcentage de sol humidifié pour divers débits de distributeurs et divers espacements entre rampes et entre distributeurs, G : Grossière, M : moyenne, F : fine).

	Débit des distributeur														
Ecartement	> ou = de 1,5 i/h			2 i/h			4 i/h			8 i/h			> ou = de 1,5 i/h		
entre	Espacement recommandé des distributeurs sur la rampe, Sd														
rampes	en m en sol de texture grossiére (G), moyenne (M), fine (F)														
SL	G	M	F	G	M	F	G	M	F	G	M	F	G	M	F
en m	0,2	0,5	0,9	0,3	0,7	1	0,6	1	1,3	1	1,3	1,7	1,3	1,6	2
	Pourcentage en sol humidifié														
0,8	38	88	100	50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1	33	70	100	40	80	100	80	100	100	100	100	100	100	100	100
1,2	25	58	92	33	67	100	67	100	100	100	100	100	100	100	100
1,5	20	47	73	26	53	80	53	80	100	80	100	100	100	100	100
2	15	35	55	20	40	60	40	60	80	60	80	100	80	100	100
2,5	12	28	44	16	32	48	32	48	64	48	64	80	64	80	100
3	10	23	37	13	26	40	26	40	53	40	53	67	53	67	80
3,5	9	20	31	11	23	34	23	34	46	34	46	57	46	57	68
4	8	18	28	10	20	30	20	30	40	30	40	50	40	50	60
4,5	7	16	24	9	18	26	18	26	36	26	36	44	36	44	53
5	6	14	22	8	16	24	16	24	32	24	32	40	32	40	48
6	5	12	18	7	14	20	14	20	27	20	27	34	27	34	40

- **Détermination du nombre, de la taille de secteur d'irrigation**

Le choix de la taille et du nombre ainsi que de la disposition des secteurs d'irrigation est capitale pour le bon fonctionnement de l'irrigation localisée des cultures de l'exploitation. Il passe par les étapes suivantes :

a. Calcul de la pluviométrie horaire

$$Pf = \frac{Q}{Eg * Er}$$

Avec :

Pf : Pluviométrie horaire (mm/h) ;
Q : Débit du goutteur (l/h) ;
Eg : écartement entre goutteur sur la rampe ;
Er : écartement entre les rampes.

b. Calcul de la durée maximale de l'arrosage

La durée maximale d'arrosage (en h/j) d'un secteur d'irrigation en période de pointe :

$$T = \frac{Bbp}{Pf}$$

Bbp : Besoin brut de pointe en eau d'irrigation ;
Pf : Pluviométrie fictive (mm/h).

c. Calcul du nombre minimum de secteurs

$$Ns = \frac{df}{T}$$

Ns : Nombre minimum de secteurs d'irrigation ;
df : durée maximale de travail ou du fonctionnement du système (en h) ;
T : durée maximale d'arrosage (en h/j) d'un secteur d'irrigation en période de pointe.

d. Calcul de la taille maximale d'un secteur d'irrigation :

La superficie maximale irrigable (Smi) dans l'exploitation :

$$Smi = \frac{Vs}{Bbp}$$

Avec :

Vs : volume d'eau à la source par jour (m3/j), Vs = Qs *df
Qs : débit de la source (m3/j)
Bbp : besoin brut de pointe en eau.

e. La taille maximale d'un secteur d'irrigation :

$$Sms = \frac{Smi}{Ns}$$

Avec :

Sms : surface maximale d'un secteur d'irrigation (m2) ;
Ns : nombre de secteurs.

La taille de secteurs dépend de la perte de charge aussi, ainsi de la répartition de volume dédié à l'irrigation par l'agriculteur.

f. Disposition des secteurs d'irrigation :

La disposition des secteurs d'arrosage dans l'exploitation se fait selon plusieurs critères :

- La topographie,
- La configuration des parcelles,
- Le type de sol : choisir les parcelles à type de sol homogène,
- Le débit maximum disponible à la source d'eau,
- La culture,
- Les pertes de charges.

Selon la pente du terrain, on pourra placer le porte rampe à l'extrémité ou à l'intérieur du poste d'arrosage.

g. Longueur et diamètre des canalisations :

C'est d'abord un tracé du réseau qui va déterminer la longueur des tubes d'amenée et de distribution de l'eau. Généralement, il y a toujours plus d'une solution. La solution optimale consiste à faire un tracé qui respecte, à la fois, un bon fonctionnement hydraulique et un coût économique acceptable.

h. Équipement de la station de pompage et de filtration

Le dimensionnement de la station de pompage tient compte des pertes de charge totales calculées. Il doit aboutir à la quantification de la puissance à installer en fonction du débit à assurer. Le choix est assez large selon la source d'énergie disponible.

3ème étape : Le dimensionnement des réseaux d'irrigation GAG

La circulation de l'eau est soumise à des frottements contre la paroi de la conduite produisant des pertes de charge. Ces pertes de charge dépendent du débit d'eau, de sa vitesse et du diamètre de la conduite.

- Perte de charge tolérée ou admissible

Pour assurer une uniformité d'apport d'eau sur le poste d'arrosage (règle de Christiansen), on admet une variation de 10% du débit moyen entre le distributeur le plus favorisé et celui le moins favorisé.

$$(\Delta q / q = 10\% = 0,1)\ .$$

De la loi débit-Pression qui caractérise le goutteur

$$Q = kH^{x}$$

où : Q est le débit du goutteur (l/h),
K est une constante caractéristique du goutteur,
H est la pression de service en mCE, et l'exposant x est la valeur d'appréciation de la tolérance aux variations de pressions) on pourra écrire la formule suivante :

$$\frac{x.\Delta H}{H} = \frac{\Delta q}{q} = 10\% = 0,1$$

De cette formule on peut écrire les pertes de charge tolérées :

$$\Delta H = 0,10\frac{H}{x}$$

x : Coefficient du distributeur
H : Pression nominale du distributeur (en mCE),
ΔH : Perte de charge tolérée ou admissible (en mCE).

Dans chaque secteur d'irrigation, la perte de charge tolérée est répartie à raison de 2/3 pour la rampe et 1/3 pour le porte-rampe.

La perte de charge tolérée dans la rampe = ΔHr= 2/3ΔH, et la perte de charge tolérée dans le porte rampe = ΔHpr= 1/3ΔH

• Diamètre intérieur économique Di (mm) de la rampe

La perte de charge par mètre linéaire de la rampe est donnée par la formule de Pernes-Guyon:

$$J = 0,478\ (Di)^{-4,75}\ (Qr)^{1,75}$$

J : Perte de charge en mCE/m linéaire
Di : Diamètre intérieur de la rampe (en mm)
Qr : Débit de la rampe en l/h
ΔH = J x Lr x k
J : Perte de charge en mCE/m
Lr : Longueur de la rampe
k : Coefficient variant en fonction du nombre de distributeurs desservis par la rampe. En pratique, pour tenir compte du débit qui décroît le long de la rampe, on multiplie la perte de charge linéaire au niveau de la rampe par k=1/2,75 (Vaysse& al., 1990).

En remplaçant J par les termes de sa formule, ΔH devient :

$$\Delta Hr = 0,478\ (Di)^{-4,75}\ (Qr)^{1,75}\ Lr\frac{1}{2,75}$$

De cette formule ci-dessus, on pourra tirer la valeur du diamètre intérieur Di de la rampe :

$$Di = \left[0,174\frac{Lr\ (Qr)^{1,75}}{\Delta Hr}\right]^{1/4,75}$$

Lr : Longueur de la rampe (en m) ;
Qr : Débit de la rampe (en l/h) ;
ΔHr : Perte de charge tolérée ou admissible dans la rampe (en mCE).

On recherchera un tuyau en polyéthylène d'un diamètre intérieur proche de cette valeur de Di calculé qui est disponible sur le marché.

• Perte de charge réelle de la rampe

La perte de charge réelle J1 (en mCE) obtenue avec la rampe achetée sur le marché dont Di est son diamètre intérieur de cette rampe ; Lr est sa longueur en m et Qr est son débit en l/h est calculée à l'aide de la formule de pertes de charge suivante :

$$J1 = 0,478\ (Di)^{-4,75}(Qr)^{1,75}(Lr/\ 2,75)$$

$$J1 = 0,174\ (Di)^{-4,75}(Qr)^{1,75}Lr$$

On compare J1 à la perte de charge tolérable dans la rampe ΔHr :si J1<ΔHr donc le diamètre choisi est correct pour la longueur Lr et le débit de la rampe Qr.

• Dimensionnement du porte-rampe

Les pertes de charge tolérées (en mCE) dans le porte-rampe = ΔHpr = 0,45ΔH.
La perte de charge J2 dans le porte-rampe est calculée à partir de la formule suivante :

$$J2 = 0,478\ (Qpr)1,75Lpr.k.(Di)-4,75$$

J2 : perte de charge linéaire du porte rampe (en mCE) ;
Di : diamètre intérieur du porte rampe (en mm) ;
Qpr : débit du porte-rampe (l/h) ;
Lpr : Longueur du porte-rampe (en m) ;
k : coefficient fonction du nombre de sorties sur la conduite ;
k = 1/2,57 si le nombre de sorties est entre 10 et 50, k=1/2,67 lorsque le nombre de sorties est entre 50 et 100.

Si on compare J2 à la perte de charge tolérable dans le porte rampe ΔHpr :

si J2<ΔHpr donc le diamètre choisi est correct pour la longueur Lpr et le débit du porte rampe Qpr.

• Dimensionnement de la conduite d'amenée

Le tracé des différentes conduites : conduite d'amenée, porte-rampes et rampes permet de voir sur le plan le positionnement des différentes conduites, la longueur Lca (en m) de la conduite d'amenée la plus éloignée. Cette conduite d'amenée véhicule un débit (en m3/h) correspondant généralement au débit de la source d'eau.

Le diamètre économique intérieur Di (en m) de la conduite d'amenée est donné par la formule suivante :

A partir de la relation Q= S*V = π Di2*V/4, on pourra déterminer le diamètre intérieur : Di= 2 (Q / π * v)-2

Q pr : Le débit de porte rampe (en m3/s)
V : vitesse de l'eau en m/s
S : section de la canalisation en m²
Di : diamètre intérieur de la canalisation en m

On conseille de prendre V =1,5 m/s pour les Canalisations

$$Di = 0,92\sqrt{Q} \quad \text{avec} \quad Q = \text{Débit en } m^3/s.$$

On choisit sur le marché la conduite dont le diamètre intérieur est proche de Di calculé.

On calculera les pertes de charge J3 (mCE) dans la conduite d'amenée ayant un diamètre intérieur proche de Di, d'une longueur Lca (en m) de cette conduite et d'un débit (en l/h) de la conduite.

• Pertes de charge totales dans le système

Ces pertes de charge correspondent aux pertes de charge linéaires dans le réseau de distribution (J1 + J2 + J3 + pression goutteur) ajoutées aux pertes de charge singulières = 20% de (J1+J2+J3), additionnées aux pertes de charge pour les différents accessoires et matériels de l'unité de tête.

Les pertes de charges totales dans le système doivent être compensées par une pression à la source qui devrait être supérieure à la pression perdue par frottement.

Il existe également d'autres formules de calcul de perte de charge dans la conduite dont en cite quelques-unes :

- La formule de DARCY-WEISBACH
- La formule de HAZEN-WILLIAMS
- La formule de Jobling





1.1.6 Le dimensionnement d'une station de pompage

Le choix du moteur destiné à entraîner la pompe d'une station de pompage doit se faire en fonction de :

- La puissance absorbée par la pompe.
- La source d'énergie disponible (électrique ou thermique).
- Le type de pompage.

Ainsi, le choix de la pompe est dicté par plusieurs paramètres dont :

- La hauteur manométrique totale (HMT) ;
- Le rendement, et la puissance.

La hauteur manométrique totale (HMT)

C'est la différence de pression en mètre colonne d'eau entre le niveau d'aspiration et de refoulement, majorée de différentes pertes de charges (J) occasionnées par le mouvement de l'eau dans les canalisations.

$$HMT = H_{géométrique} + J_{aspiration} + J_{refoulement}$$

Le rendement

Chaque type de pompe présente une valeur maximale de rendement (figure 2), au voisinage de laquelle il faudra utiliser la pompe. Exemple de courbe de rendement de pompe donné en %.

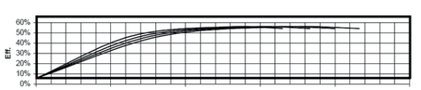


Figure2 : Efficacité de pompe (rendement) suivant le débit en m3/heure

Dans cet exemple le rendement maximum est 57%.

La puissance de la pompe

La puissance absorbée sur l'arbre de la pompe est donnée par la formule :

$$P = \frac{Q * HMT * \rho}{102{,}2 * \eta}$$

Avec :

P : La puissance absorbée en (KW),
Q : Débit en (l/s),
ρ : Masse volumique de l'eau (kg/dm3),
η : Rendement de la pompe,
HMT : hauteur manométrique totale en mètre colonne d'eau.

La puissance à fournir par le moteur est fonction de la puissance absorbée par la pompe et pour le point de fonctionnement considéré.

Toutefois, il sera prudent de majorer la puissance absorbée par la pompe des pourcentages suivants :

20% si la puissance absorbée est comprise entre 4KW et 20KW;
10% si la puissance absorbée est supérieure à 20KW.

1.1.7 Cas d'étude pour la conception d'un réseau d'irrigation GAG

Cas d'étude 1

On cherche à équiper une exploitation du fraisier avec un système d'irrigation localisée (goutte à goutte.)

- Le débit horaire continu de l'eau dans le puits est Qs= 35 m³/h.
- La Durée maximale de fonctionnement de la moto-pompe est ds = 8 heures par jour.
- On va utiliser une gaine (rampe) comprenant des gouteurs espacés de 0,20 m, qui débitent 1l/h.
- Chaque ligne de fraisier est irriguée à partir d'une gaine. Les gaines sont espacées de 1,5 m.
- Les besoins en eau bruts de pointe Bbp = 5 mm/j,

1- Calculer le volume d'eau, disponible pendant une journée (m3).

V = Qs*ds
Avec Qs débit horaire du puits
Ds durée de fonctionnement de la pompe
V = 35*8

Le volume d'eau, disponible pendant une journée est de 280m3/j

2- Calculer la superficie maximale irrigable (Smi) dans l'exploitation pendant la période de pointe

Superficie irrigable = V d'eau disponible / besoins bruts de pointe en m3/ha
Smi= 280/50
1 mm= 10m3/ha don (5mm= 50m3/ha)

Smi = 5,6 ha

3- Calculer le volume du bassin d'accumulation d'eau pour une autonomie de 7 jours

Volume du bassin = Besoins en eau bruts de pointe (m3/ha)* superficie (ha*)*nombre de jours d'autonomie
Vbassin = 50*5,6*7

Vbassin =1960m3

4- Calculer la pluviométrie fictive (Pf)

Pf = Qg/(eg*er)
Pf = 1/0,2*1,5

Pf= 3,33 mm/h

5- Calculer le nombre minimum de secteurs à irriguer

Nombre de secteur = temps alloué à l'irrigation/temps pour irriguer un secteur
Temps pour irriguer un secteur = besoin bruts de pointe/pluviométrie fictive
Temps pour irriguer un secteur = 5/3,33=1,15heures
Nombre de secteur = 8/1,15

Nombre de secteurs =6,95 donc 7 Secteurs

6- Calculer la taille maximale d'un secteur d'irrigation (1pt)

Taille maximale d'un secteur = taille de l'exploitation /nombre de secteurs
Taille maximale d'un secteur = 5,6/7

Taille maximale d'un secteur= 0,8 ha

Cas d'étude 2

On cherche à équiper une petite exploitation de 1.3 ha avec la luzerne irriguée en goutte à goutte.Le schéma montre les limites de l'exploitation ainsi que l'emplacement de la station de tête.



Données sur la région :

- Temps de fonctionnement d'irrigation : 7 heures
- Le Sol est de texture fine, terrain plat
- Gouteur non-autorégulant Débit = 2 l/h,
- Evapotranspiration potentiel en période de pointe ETP=5.11mm
- KC =0.95
- CU =Coefficient d'uniformité du réseau = 0.90
- Ei = Efficience du système d'irrigation au niveau de la zone radiculaire =0.9
- Ecartement entre les lignes de la luzerne = 0.6 m

1- Calculer les besoins bruts de pointe (Bbp en mm) de la luzerne en eau d'irrigation

Bbp= Bn/CU*Ei
Bbp= etp*kc/cu*ei
Bb=4,85/09*0,9

Bb= 6mm/j

2- Calculer la pluviométrie fictive (Pf)

- Pf= Dg/Sg
- Sg= 0,6*1= 0,6m2

L'écartement entre gouteur est déterminé à partir du tableau 2 de keller et kameli
Pf= 3,33 mm/h

3- Calculer la durée maximale de l'arrosage

T= BBp/Pf= 6/3,33=
T=1,8h

4- Calculer le nombre minimum de secteurs

Ns= Df/T
Ns= 7/1,8

Ns= 3,88…… 4 Secteurs

5- Calculer la taille maximale d'un secteur d'irrigation

Tmax= Sexpl/Ns
Tmax= 250*52/4

Ns= 3250 m2

Avec cette conception le terrain pourrait être divisé en 4 secteurs avec une superficie maximale de 3250m2
Si on fixe la longueur sur 50m, la largeur serait de 3250/50=65m
Il est à noter également que c'est préférable de laisser des pistes entre les secteurs. On laisse 1m de piste entre les secteurs. Le schéma ci-dessous illustre la disposition des secteurs, rampes et portes rampe.

6-Déterminer le débit des rampes, des portes rampes, du secteur et de la pompe

Le débit de la rampe = la somme des débits des gouteurs sur la rampe
Le débit de la rampe= nombre de gouteurs * débit du gouteur
Nombre des gouteurs sur la rampe= longueur de la rampe/ écartement entre gouteur

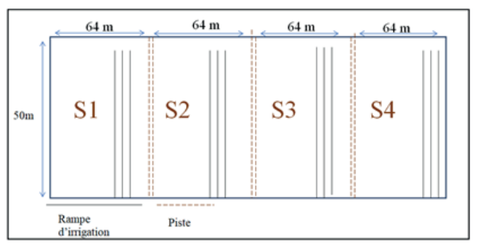
Le débit de la rampe = (50/1)*2= 100l/h

Débit du porte rampe = somme des débits des rampes
Débit du porte rampe = Nombre de rampe * débit de la rampe
Nombre de rampe = longueur du porte rampe/écartement entre rampe
Nombre de rampe= 63/0,6= 106 rampes

Débit du porte rampe = 106*100= 10600l/h

Débit du secteur = Débit du porte rampe =10600l/h

Débit de la pompe= débit du grand secteur= 10600l/h





VII. Bases théoriques de gestion d'irrigation au goutte-à-goutte : relations Eau sol plante atmosphère

1.1.8 Détermination des besoins en eau des cultures

1.1.8.1 Introduction

Dans un premier temps, la détermination des besoins en eau d'une culture nécessite la connaissance de divers paramètres concernant aussi bien la plante elle-même que les données climatiques ou pédologiques des parcelles. Dans la pratique, en se basant essentiellement sur le calcul de l'évapotranspiration et l'observation perpétuelle sur le terrain de la végétation et de l'état du sol, prenant en considération le stade végétatif. Les données climatiques donneront les indications nécessaires concernant les besoins en eau de la culture.

1.1.9 Evapotranspiration de références ETP ou ET0

La détermination des besoins en eau des cultures, est basée essentiellement sur la notion de l'évapotranspiration de référence (ET0 ou ETP), cette notion est la variable-clé qui représente le principal terme de perte par la culture.

a- Formules de calcul de l'ET0

L'utilisation de ces modèles nécessite la connaissance de certaines données climatiques telles que, la température maximale et minimale de l'air, l'humidité relative maximale et minimale, la radiation solaire globale et la vitesse du vent. Le tableau 3 ci-dessous résume les différentes formules de calcul d'ET0.

Tableau 3 : les différentes formules de calcul d'ET0

Formule	Forme mathématique	paramétres
BAKANEY-CRIDDLE	ETo=25.4*(1,8t+32)*P/100	Température durée d'insolation
THORNTHWAITE	ETo=1,6*Ld(10t/I)*	Température
HAUDE	KTo =(eei)*f	Température Humidité relative
TURC	ETo=(+50)*0,4*t/15t*((1+50-R)/70)	Radiation Température Humidité relative
MAKKING	ETo=Δ*Rs/Δ+y	Température Radiation solaire
PAPADAKIS	ETo=0,5625*(e-el)	Température Humidité relative
PENMAN	ETo=(Δ*R+y*Ea)(Δ+y)	Température Radiation solaire Humidité relative Vitesse du vent

1.1.10 Evapotranspiration culturale ou Maximale ETM ou Etc

a. Evapotranspiration culturale

L'évaporation en condition standard (ETc ou ETM) est un concept similaire à celui de l'évapotranspiration de référence, mais pour une culture donnée poussant dans des conditions agronomiques (hydriques) optimales.

Le tableau 4 ci-dessous présente les besoins en eau moyens théoriques (seulement a titre indicatif) de quelques cultures.

b. Coefficient cultural

- Importance du coefficient cultural

Les besoins en eau (BE) qui en découlent sont assimilés généralement à l'évapotranspiration maximale (ETM) donnée par la relation : ETM = Kc * ETo, où le coefficient cultural Kc représente la demande biologique de la couverture végétale.

- Facteurs de Variation du coefficient cultural Kc

Les valeurs de Kc sont données en fonction des stades phénologiques publiées au niveau du bulletin 56 de la FAO (Allen et al., 1998). Voir lien ci-dessous

D'autres études plus récentes conduites sur plusieurs cultures, publiées au niveau du bulletin 66 de la FAO (FAO, 2012), proposent des coefficients culturaux rectifiés et avec plus de précision. Voir lien ci-dessous

Tableau 4: besoins en eau moyens des cultures (source FAO)

Cultures	Besoins en eau en mm
Canne à sucre	1250
Agrume	1200
Bananes	1200
Dattes	1100
Riz	770
Betterave à sucre	650
Arachide	600
Mais	575
Blé	550
Patate douce	537
Pomme de terre	487
Oignons	475
Tomate plein champ	450
Haricot	375

1.1.11 Notion de base du comportement de l'eau dans le sol

- La texture du Sol

La texture (ou granulométrie) d'un sol est définie par le pourcentage d'éléments minéraux présents dans le sol. Cela concerne, par ordre de taille croissant, les argiles (moins de 2 microns de diamètre), les limons (de 2 à 20 microns), les sables (de 20 microns à 2 mm) et les graviers (de 2 à 20 mm), au-delà on parle d'éléments grossiers (cailloux, galets, roches, etc.). Afin de déterminer la texture du sol et d'estimer les paramètres physiques du sol qui seront à la base d'estimation de la teneur en eau du sol, vous pouvez utiliser le line ci-dessous.

- Humidité à la capacité au champ Hcc

La teneur en eau est fonction de la porosité et de la perméabilité du sol. Le volume maximal d'eau qu'un sol peut retenir est la "capacité au champ" ou capacité de rétention du sol qui dépend essentiellement de la granulométrie du sol.

- Humidité au point de flétrissement permanent HPFP

La transpiration des plantes extrait l'eau de la zone non saturée du sol, parfois même de la zone saturée. Cette extraction est possible jusqu'à une certaine valeur limite de la teneur en eau du sol ; les racines doivent vaincre le potentiel de matrice qui retient l'eau et qui augmente avec le départ de l'eau ; au-delà d'une certaine valeur, la plante ne peut plus vaincre la tension et satisfaire son besoin, elle flétrit. Le point de flétrissement d'une plante varie d'une espèce à l'autre. Le volume d'eau disponible pour les plantes, appelé "réserve utile" comprend la "réserve facilement utilisable" et la « réserve de survie » ; elle dépend de 2 paramètres : la profondeur du sol colonisée par le système racinaire et la texture du sol.

http://www.climasouth.eu/sites/default/files/FAO%2056.pdf
http://www.fao.org/docrep/016/i2800e/i2800e.pdf
http://www.dynsystem.com/netstorm/soilwater.html

En se basant sur la granulométrie du sol et le pourcentage de matière organique, les formules de Saxston ci-dessous pourraient être utilisées pour estimer les caractéristiques hydrauliques du sol à savoir la capacité au champ, le point de flétrissement ainsi que la réserve utilise :

Hcc : Capacité au champ en mm/m : W330 = 257,6 - (2 x Sa) + (3,6 x Ar) + (29,9 x MO)
HPFP : Point de flétrissement en mm/m : W15000 = 26 + (5 x Ar) + (15,8 x MO)
RU : La réserve utile (RU) en mm : RU = (W330 - W15000) x h
Avec Ar : teneur en argile (en %), Sa : teneur en sable (en %), MO : teneur en matière organique (en %)

1.1.12 Bonnes pratiques de l'irrigation

1.1.12.1 Importance du pilotage de l'irrigation

Le pilotage de l'irrigation est une stratégie intelligente pour la gestion de l'eau et qui repose sur trois questions essentielles : Quel système d'irrigation dois-je choisir ? Quand dois-je irriguer ? Quel volume d'eau dois-je apporter et combien de fois ?
Le schéma ci-dessous illustre les méthodes à suive pour répondre aux 3 questions citées (Figure 3)

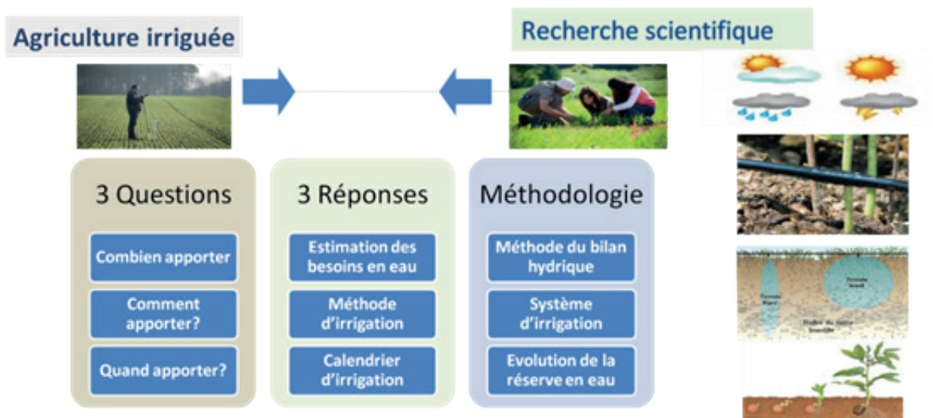


Figure 3 : schéma des stratégies à suivre pour le pilotage d'irrigation

1.1.12.2 Paramètres de pilotage

a- Détermination de la Dose d'arrosage

Par définition, la dose est la quantité d'eau à apporter en une seule intervention. Pour l'irrigation localisée, on définit la dose nette maximale (DNM) du sol par la formule :

DNM =f x (HCC -HPFP) x Z x PSH

Dans laquelle :

- DNM = dose nette maximale (mm) ;
- f = facteur dépendant de la culture ;
- HCC = humidité à la capacité au champ du sol (mm/m de profondeur) ;
- HPFP = humidité au point du flétrissement permanent (mm/m de profondeur) ;
- Z = profondeur d'enracinement du sol (m) ;
- PSH = pourcentage de la surface humectée ;

Concernant le pourcentage de sol humidifié (PSH), la surface mouillée du sol sous un goutteur augmente avec la finesse de la texture du sol, le débit du goutteur et le nombre d'applications d'eau. Keller et Karmeli (1974) ont établi un tableau donnant une estimation du volume mouillé pour différents écartements et débits des goutteurs et différents types de sols (tableau 2 ci-dessus). Les valeurs de f peuvent être déduites de la façon suivante :

- **f= 0.3 :** culture à enracinement profond et de faible valeur ajoutée
- **f= 0.2 :** culture de valeur moyenne avec enracinement moyen
- **f= 0.1 :** culture de haute valeur ajoutée avec enracinement superficiel

Des valeurs de f, aussi faibles que 0.10 peuvent être utilisées lorsqu'il s'agit de cultures très délicates. En réalité, la signification de f=0.10 veut dire que l'irrigation est déclenchée lorsque 10% à peine de la réserve en eau utile du sol sont entamés.

La profondeur d'enracinement (Z) est également liée au type de culture.

NB : Dans le cas où on ne dispose pas des analyses de sol pour déterminer le Hcc et le HPFP, on peut faire référence au tableau 5 ci-dessous pour estimer la réserve utile du sol (RU=HCC-HPFP)

Tableau 5 : estimation des paramètres physiques du sol selon la texture

Texture du sol	Perméabilité	Porosité	Masse Volumique	Capacité de rétention	Point de flétrissement	Réserve utile
	$Cm.h^{-1}$	%	kg.dm-3	% vol.	% vol.	Mm/m profondeur
Sablonneux	5	38	1,65	15	7	80
Sablo-limoneux	2,5	43	1,50	21	9	120
Limoneux	1,3	47	1,40	31	14	170
Argilo-limoneux	0,8	49	1,35	36	17	190
Limono-argileux	0,25	51	1,30	40	19	210
Argileux	0,05	53	1,25	44	21	230

b- Fréquence d'arrosage : nombre des irrigations par jour

Le système d'irrigation localisée est conçu pour apporter l'eau à des doses faibles mais à une fréquence élevée. Par définition, le nombre des irrigations par jour est calculé par l'équation suivante :

I = ETc (mm/J) / DNM (mm)

c- Durée d'arrosage journalière

Elle est comptée généralement en heures selon l'expression :

T (hr) = ETc (mm/j) /Pluviométrie horaire (mm/hr)

d- Durée d'irrigation pour chaque apport

Afin d'apporter la quantité d'eau relative à la DNM, il faut calculer la durée d'irrigation maximale pour la DNM

T1 (Durée d'irrigation) = DNM (mm)/Pf (mm /h).

1.1.12.3 Mode de gestion de l'irrigation

Le pilotage de l'irrigation au niveau de la parcelle peut être basé sur la théorie de dose fixe fréquence variable. Ce qui fait que le moment de déclencher l'irrigation est régi par le cumul des valeurs quotidiennes de l'ET0, corrigées par le Kc. Le Tableau 6 ci-dessous illustre un exemple d'apport d'une dose fixe : DNM= 1.53 mm pendant une période de 5 jours. Pluviométrie du système 5mm/h. Le nombre des irrigations par jour est calculé comme suit :

Nombre des irrigations= Besoin en eau /DNM

Le nombre des apports est un nombre entier, le reliquat en termes de quantité d'eau inferieure à la DNM est accumulé avec les besoins du jour qui suit.

Tableau 6 : Exemple pour 5 jours d'irrigation (DNM= 1.53mm)

Date	KC	DNM	ETc (mm/jr)	Cumul	Nombre d'appot théorique	Nombre d'apport
02/07/2018	1,05	1,53	4,33	5,73	3,74	3,00
03/07/2018	1,05	1,53	5,97	7,11	4,65	4,00
04/07/2018	1,05	1,53	5,04	6,03	3,94	3,00
05/07/2018	1,05	1,53	4,77	6,21	4,05	4,00
06/07/2018	1,05	1,53	6,10	6,18	4,04	4,00

La dose d'irrigation est toujours fixe est égale à la DNM (1.53mm équivalente à 18 min d'apport d'eau par le système installé d'une pluviométrie de 5mm/h).

Le temps d'irrigation pour apporter la dose nette maximale de 1,53mm est calculé comme suit :

Temps d'irrigation= DNM/Pf = 1,53/5= 0,3heures=18min

Avec : DNM : dose nette maximale = 1,53
Pf Pluviométrie fictive = 5mm/h

Plusieurs apports peuvent être appliqués par jour afin de satisfaire les besoins en eau de la culture (ETc=Kc*ET0), à condition de ne pas dépasser la durée d'irrigation maximale pour chaque apport qui est de 18min.L'irrigation n'est déclenchée que lorsque le cumul est supérieur ou égale à la dose nette maximale.

La figure 4 ci-dessous résume les étapes de préparation des paramètres du programme quotidien d'irrigation

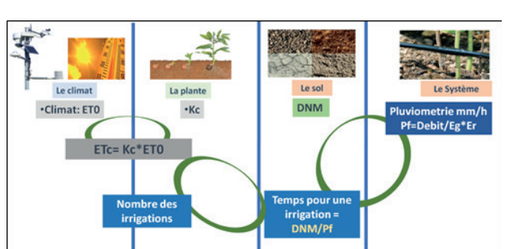


Figure 4: Etapes à suivre pour préparer un programme d'irrigation

1.1.12.4 Cas d'étude : conception et pilotage d'irrigation

On cherche à installer un système d'irrigation localisée (goutte à goutte) au niveau d'un verger de pommier d'une superficie plantée de 20 ha. Le tableau 1 suivant montre les valeurs moyennes des besoins en eau du pommier pour les mois de Mars jusqu'eu Aout au niveau de cette région.

Tableau 1	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout
ETc Besoins en eau bruts (mm/mois)	20	72	124	130	155	120

Le tableau 2 suivant résume les données collectées (mesurées et calculées) demandées pour la réalisation de la conception et le dimensionnement du réseau

Tableau 2	Ecartement entre arbres (m)	Ecartement entre lignes (m)	Nombre de rampe par ligne	Débit du gouteur (l/h)	Ecartement entre goutteurs (m)	Nombre de goutteurs par arbre	Durée d'irrigation par jour = durée de fonctionnement de la pompe (heures)
Valeurs	1.25	3.95	1	1.6	0,64	2	20 heures

Le tableau 3 suivant résume les données relatives au sol et à la plante

Tableau 3	Hcc volumétrique	HpFp	Pourcentage d'humectation du sol avec le système déjà mentionné	f = Pourcentage de déclenchement d'irrigation (pourcentage de la Réserve Utile à partir duquel on déclenche l'irrigation. Il dépend également de la sensibilité de la plante à la sécheresse (f)	Profondeur racinaire (cm)
Valeurs	44%	33%	12.25%	20 %	40 cm

• Questions conception

a. Quels sont les besoins en eau journaliers de pointe (mm/j) pour le pommier dans cette région.

Les besoins en eau de pointe correspondent au mois de juillet avec un ETc max de 155mm/mois équivalents à 5 mm/j

b. Calculer la pluviométrie fictive (mm/h)

Pf = Q/(Eg*Er)
Pf= 1,6/(0,64*3,95)

Pf = 0,63mm/h

c. Calculer la durée maximale d'arrosage pendant la période de pointe (h ou min) (1pt)

Durée maximale d'arrosage = Besoins brute de pointe/Pf= 6/0,63mm/h

Durée maximale d'arrosage = 7,94h= 7h et 56 min

d. Calculer le nombre minimal de secteurs à irriguer

Nombre de secteur = temps alloué à l'irrigation/Durée maximale d'arrosage Temps
Nombre de secteur = 20/7,94

Nombre de secteurs =2,51 donc 2 Secteurs

e. Calculer la taille maximale d'un secteur d'irrigation (ha)

La taille maximale d'un secteur d'irrigation = Superficie de l'exploitation/ Nombre de secteur = 20/2

La taille maximale d'un secteur d'irrigation = 10 ha

- **Questions pilotage**

a. Calculer la dose nette maximale (DNM ou RFU) en mm

DNM = f x (Hcc – Hpfp) xZ x PSH
DNM= 0,2*(0,44-0,33)*400*0,1225

DNM=1,08mm

b. Calculer la durée maximale d'irrigation pour chaque apport en (min)

Durée maximale d'irrigation pour chaque apport = DNM/PF

La durée maximale d'irrigation pour chaque apport=1,08/0,63= ***1,71h=1h et 43 min***

Le tableau 4 suivant illustre les valeurs journalières d'évapotranspiration de référence ET0 calculées pendant quelques jours du cycle. La valeur de kc du pommier pendant cette période est également notée au niveau du tableau.

Jours	01/06/2020	01/06/2020	01/06/2020
ET0 (mm/j)	4.63	6.17	5,33
Kc	0.75	0.75	0.9

c. Proposer un calendrier d'irrigation selon le modèle présenté au niveau du tableau suivant

Jour	Dose totale à apporter par jour (mm/j)	Nombre des irrigations	Quantité et durée d'irrigation pour chaque apport								
			Apport 1		Apport 2		Apport 3		Apport….		RELIQUAT
			mm	min	mm	min	mm	min	mm	min	mm
01/06/2020	ETC= ET0*KC 4,63*0,75 3,47	Nombre des irrigations= ETC/DNM 3,47/1,08=3,21 DONC 3	1,08	103	1,08	103	1,08	103			3,47 – (1,08* 3)= 0,23
02/06/2020	6,17*0,75 +0,23= 4,86	4,86/1,08 4,5 donc 4	1,08	103	1,08	103	1,08	103	1,08	103	0,54
03/06/2020	5,33*0,9 4,79	4,79/1,08= 4,44 donc 4	1,08	103	1,08	103	1,08	103	1,08	103	0,47



VIII. Nouvelles technologies de pilotage d'irrigation

1.1.13 Suivi de l'état de l'eau dans l'atmosphère : Station agro-météorologique

Les paramètres météorologiques à mesurer pour préciser un climat à un moment donné en un lieu précis sont au nombre de sept : Température de l'air, Humidité de l'air, Pression atmosphérique, La direction du vent, La vitesse du vent, Les précipitations, L'ensoleillement : il résulte d'une part de l'intensité du rayonnement solaire et d'autre part de l'absorption de ce rayonnement par l'atmosphère.

1.1.14 Suivi de l'humidité du sol

Tensiomètres

La mesure du potentiel hydrique du sol s'effectue à l'aide des tensiomètres à eau ou par des tensiomètres électriques. (Figure 5).

Les Tensiomètres à eau : sont des appareils simples, précis et très utilisés. Il se composent d'une bougie en céramique poreuse enfoncée dans le sol et reliée par un tube à un manomètre. La pression à l'intérieur du tube équilibre au bout d'un certain temps la tension d'eau du sol par l'intermédiaire de la bougie.

Les tensiomètres électriques : sont des capteurs servant à la mesure précise du potentiel hydrique du sol indirectement en utilisant une résistance électrique, représentative de la teneur en eau. L'état hydrique du sol est mesuré en tension dans une plage comprise entre 0 et 200 cbar, ce qui augmente considérablement la plage de mesure du tensiomètre (max 80 cbar).



Figure 5 différents types de tensiomètre

Sondes capacitives

L'utilisation des sondes capacitives a fortement augmentée ces dernières années avec le développement de techniques basées sur des mesures électromagnétiques, automatisables, avec peu de maintenance et un temps de réponse quasi-instantané. Le principe général des mesures d'humidité du sol repose sur une estimation de la permittivité diélectrique. Il s'agit d'une propriété physique d'un milieu qui exprime l'interaction de ce milieu avec un champ électrique. Ces sondes indiquent l'humidité volumétrique en pourcentage au niveau de différentes profondeurs du sol. Les senseurs de profondeur donnent des indications immédiates sur d'éventuels excès d'irrigation. Selon cette information, on peut agir pour changer la dose nette maximale, (DNM) qui n'est que la dose d'irrigation.
Les sondes de surface permettent de suivre la quantité d'eau dans la zone racinaire. Ce suivi est un indicateur pour le changement et à gestion du coefficient cultural Kc.

IX. SMART Irrigation

1.1.15 Irrigation digitale

La digitalisation du secteur agricole est désormais une composante importante de la nouvelle stratégie « Génération-Green 2020-2030 » du Gouvernement Marocain. L'introduction des applications digitales dans le domaine de la gestion de l'eau en irrigation est un impératif, en raison de la nécessité d'une gestion raisonnée de cette ressource, aussi bien pour son économie effective, que pour en tirer de meilleurs rendements.

Des initiatives ont été menées au Maroc pour le développement des applications Smartphone qui permettent d'offrir un outil d'aide à la décision simple et convivial permettant de gérer avec précision l'irrigation localisée des cultures d'une manière fiable, au moment opportun et avec un suivi régulier. La finalité de l'utilisation de ce type d'application est de contribuer à promouvoir l'usage d'application digitale, notamment parmi les petits et moyens agriculteurs, afin de les inciter à l'économie et la valorisation de l'eau via une gestion intelligente de l'irrigation localisée à l'échelle de la parcelle. En termes pratiques, les paramètres de planification de l'irrigation peuvent être générés quotidiennement pour chaque parcelle (culture) introduite dans l'application.



1.1.16 Nouvelles générations de systèmes d'irrigation au goutte-à-goutte

a- Les systèmes de goutte à goutte enterré

La technique du goutte à goutte enterré a fait son apparition aux États-Unis il y a déjà plus de deux décennies. Cependant, les matériels utilisés généralement constitués de tuyaux poreux s'avéraient peu performants car très vulnérables au colmatage et aux intrusions racinaires. Avec l'évolution des équipements d'irrigation au goutte-à-goutte, en particulier les gaines en polyéthylène, ce problème est résolu. En effet, ces gaines s'opposent à l'intrusion dans les goutteurs des particules du sol et des racines. De plus, les goutteurs sont dotés d'un système anti-siphon et la gaine se vidange automatiquement sitôt l'eau coupée.

Le système présente les avantages suivants :

- Economie d'eau par rapport au goutte à goutte en surface ;
- Facilite le travail du sol ;
- Limite le développement des adventices ;
- Système moins sensible aux dégâts dus aux gibiers, chasseurs et vandalisme.

b- Les nano-irrigation

La nano irrigation est une nouvelle technologie permettant d'humecter le sol en permanence en libérant lentement de très faible quantité d'eau. En effet la nano irrigation permet de répartir les besoins en eau durant tout le cycle sans interrompre les apports. La membrane interne des conduits d'eau sont semi-perméables et semé de micropores invisibles. L'écoulement se fera sous l'effet de leur énergie potentiel. L'eau passera dans la membrane directement sur les zones à faible énergie potentielle qui peuvent être : potentiel du soluté, potentielle hydrique du sol, potentiel d'eau atmosphérique, potentiel hydrique des racines. La nano-irrigation est souterraine et permet par conséquent la fourniture d'eau et d'engrais directement aux racines. Ce qui donne une économie importante en eau et en engrais. Le système n'a pas besoin de la puissance mécanique à la fonction, ce qui réduit la consommation d'énergie par rapport à l'irrigation de la goutte à goutte (Figure 6)



Figure 6. Concept de la nano irrigation

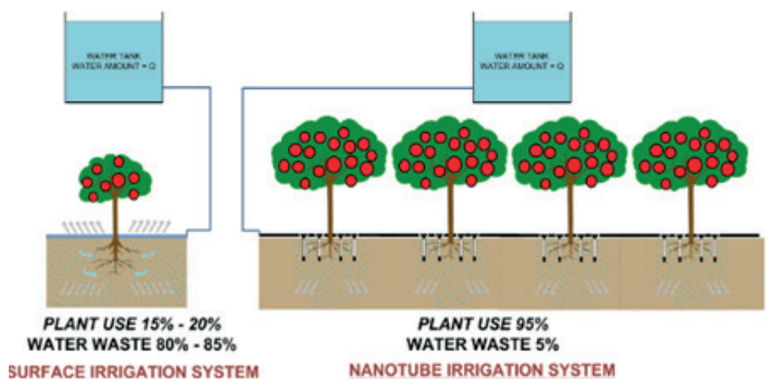
Les avantages de la nano-irrigation :

Il diffère d'autres irrigations d'approvisionnement en eau intermittent. La méthode nanotube irrigation permet une irrigation continue. Les caractéristiques de l'irrigation en continu sont les suivantes : C'est une méthode d'irrigation qui s'adapte étroitement aux processus vitaux des plantes.

Irrigation souterraine permet la fourniture d'eau et d'engrais directement aux racines des plantes, empêchant sol perte par évaporation, ruissellement pertes et des pertes d'infiltration souterraine.
Le système n'a pas besoin de la puissance mécanique à la fonction, ce qui réduit la consommation d'énergie de 95% par rapport à l'irrigation avec goutte à goutte.

Ci-dessous une comparaison entre la quantité d'eau utilisée par le système nano-irrigation et d'autre système d'irrigation (Yang et al., 2008) :

On constate que l'irrigation d'un arbre par le système d'irrigation en surface égale l'irrigation de quatre arbres par le système nano-irrigation et même le rendement augmente avec un taux qui peut atteindre 30% (Figure 7).



Système d'irrigation de surface **système de nano irrigation**

Figure 7 : comparaison entre la nano-irrigation et l'irrigation en surface

Chapitre 2:

La fertigation : bases techniques de calcul des besoins et méthodes de contrôle



INTRODUCTION

La fertilisation raisonnée constitue un pilier principal, permettant de réaliser des gains de productivité appréciables. L'objectif donc de la fertilisation est de satisfaire les besoins des cultures en éléments nutritifs par un équilibre entre les éléments déjà présents dans le sol et les fertilisants ajoutés pour une production satisfaisante. La fertilisation minérale, bien qu'elle soit relativement peu utilisée au Maroc, connaît un progrès notable au cours des trois dernières décennies. Une fertilisation optimale favorise l'obtention de rendements optimaux mais aussi contribue à maintenir l'équilibre de la fertilité du sol et à réduire les risques de contamination des eaux par les éléments nutritifs, notamment des éléments mobiles comme l'azote et le phosphore.

Les technologies de fertigation ont évolué en parallèle avec l'extension de l'irrigation au goutte-à-goutte au début des années soixante. Les éléments nécessaires à la plante sont classés en éléments majeurs, présents en forte proportion et en général très impliqués dans la croissance et la production, et en éléments mineurs, dont les teneurs sont faibles, le plus souvent impliqués dans des processus physiologiques particuliers mais essentiels.

II. Stratégies de diagnostique nutritionnel et de gestion de la fertigation des plantes



2.2.1 Introduction : la fertilisation raisonnée

La fertilisation raisonnée est une des nombreuses composantes de l'agriculture raisonnée. A partir d'objectifs de production, quantitatifs et qualitatifs, l'agriculteur calcule l'apport de fertilisants nécessaire pour compléter l'offre du sol en éléments minéraux et satisfaire les besoins nutritionnels des plantes. Un plan de fertilisation est constitué à partir des données suivantes : Les exportations des cultures, les analyses du sol et de l'eau et la dynamique des éléments en fonction du cycle de la culture.

2.2.1.1 Analyses du sol et analyse de l'eau

a. Analyse du sol

L'analyse du sol est un outil clé pour une bonne gestion de la fertigation. Des recommandations d'engrais peuvent être données sur la base des résultats des analyses de sol. L'analyse du sol peut fournir des informations essentielles sur la salinité et la fertilité du sol et pour prendre des décisions concernant la gestion des engrais et l'irrigation.

b. Analyse de l'eau

Généralement, l'analyse de l'eau concerne les éléments suivants :

- **Le pH**

Le pH de l'eau d'irrigation influence la solubilité des sels minéraux dans le sol. En effet, les minéraux qui ne sont pas dissous ne sont pas disponibles pour les plantes, car les plantes ne peuvent absorber les minéraux que d'une solution aqueuse. L'apport des acides peut engendrer une diminution du Ph pour faciliter l'absorption de quelques éléments. La figure 8 présente le diagramme d'assimilation des éléments minéraux selon le PH de la solution du sol.

- **La salinité**

Un niveau de salinité trop élevé réduit la capacité de la plante à absorber l'eau. La salinité de l'eau est mesurée en TDS (sels dissous totaux) ou en conductivité électrique (CE). Les deux se rapportent à la concentration totale de sels dissous dans l'eau.

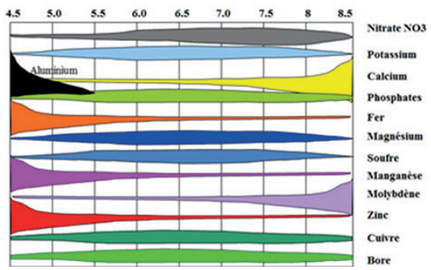


Figure 8: Diagramme d'assimilation des éléments minéraux en fonction du Ph du sol (d'après Triog et Bachelier).

2.2.2 Etablissement d'un programme de fertigation

Pour établir un programme de fertigation trois méthodes peuvent être utilisées :

a. Méthode des équilibres

Cette méthode est basée sur l'établissement des équilibres entre les éléments fertilisants (azote, phosphore, potassium, calcium et magnésium) selon les exigences de la culture, sa physiologie et son stade de développement. Les équilibres sont obtenus sur la base de la fertilisation azotée.

b. Méthode des normes

Elle consiste à donner à la plante des solutions nutritives qui ont été établies sur la base des besoins en fonction des stades végétatifs. Les réserves en éléments fertilisants existants dans le sol et les quantités apportées par l'eau d'irrigation doivent être soustraites des doses préconisées.

c. Méthode basée sur la conductivité électrique

La méthode de la conductivité électrique n'est pas nutritionnelle, mais elle sert à garder une conductivité électrique adéquate pour un bon développement des plantes. Cette méthode nécessite la connaissance chaque semaine de la conductivité électrique du sol déterminée dans un extrait ½ et la conductivité électrique de la solution nutritive au niveau des injecteurs à l'aide d'un conductivimètre.

2.2.3 Engrais pour fertilisation

2.2.3.1 Formes d'engrais

Le tableau 7 ci- dessous présente les différentes formes d'engrais disponibles sur le marché avec la teneur en éléments nutritifs, le pH et la solubilité dans l'eau

Tableau 7 : formule et solubilité des engrais

Engrais	Formule	Teneur	pH (1 g/L à 20°C)	Solubilité (g/L) à	
Urée	$CO(NH_2)_2$	46 – 0 – 0	5.8	0 °C	20 °C
Nitrate de Potasse	KNO_3	13 – 0 – 46	7.0	670	1033
Sulfate d'ammoniaque	$(NH_4)_2SO_4$	21 – 0 – 0	5.5	700	760
Ammonitrate	NH_4NO_3	34 – 0 – 0	5.7	1180	2190
Nitrate de Calcium	$Ca(NO_3)_2$	15 – 0 – 0	5.8	1020	1220
Acide phosphorique	H_3PO_4	0 – 52 – 0	2.6		
Monophosphate de potassium	KH_2PO_4	0 – 52 – 34	5.5	148	230
Mono Ammonium Phosphate	$NH_4H_2PO_4$	12 – 61 – 0	4.9	225	400
Nitrate de potasse	KNO_3	13 – 0 – 46	7.0	135	335
Sulfate de potasse	K_2SO_4	0 – 0 – 50	3.7	75	120
Sulfate de magnésium	$MgSO_4$	16MgO – 13S	5.5		700

2.2.3.2 Compatibilité des engrais

Tous les engrais ne peuvent être mélangés entre eux : Certaines associations d'éléments sont déconseillées, pour éviter les précipitations. Ils devront alors être utilisés successivement ou être mis dans des cuves différentes. Tous les engrais n'ont pas la même solubilité dans l'eau. Lors de la préparation, procéder du moins soluble au plus soluble, c'est-à-dire des engrais potassique et phosphate et à base de magnésium et de nitrates. Le tableau 8 ci-dessous résume la compatibilité des éléments

Tableau 8 : compatibilité chimique des engrais

Urée	Sulfate d'ammoniaque	Superphosphate triple	Superphosphate simple	DAP	MAP	Chlorure de potasse	Sulfate de potasse	
Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Ammonitrate
	Oui	Peu	Peu	Oui	Oui	Oui	Oui	Urée
		Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Sulfate d'ammoniaque
			Oui	Peu	Oui	Oui	Oui	Superphosphate triple
				Peu	Oui	Oui	Oui	Superphosphate simple
					Oui	Oui	Oui	DAP
						Oui	Oui	MAP
							Oui	Chlorure de potasse

Oui: compatible
Non: Incompatible
Peu: Compatibilité limitée

2.2.4 Méthodes et technologies de contrôle de la fertilisation en goutte-à-goutte

2.2.4.1 Automatisme de fertigation

L'automatisation implique le contrôle de l'irrigation sans nécessité de déplacement à la ferme ou à la station de tête. Pour automatiser une installation les éléments suivants sont nécessaires : Vannes électriques ou hydrauliques et un programmateur, des sondes EC et Ph

2.2.5 STATION DE FERTIGATION

2.2.5.1 Avantages de la fertigation

Les avantages de la fertigation sont très nombreux, mais son potentiel ne peut être atteint que moyennant une conception, une gestion et un entretien continu du système. Parmi ces avantages on peut citer :

- Augmentation du rendement,
- Amélioration de la qualité de production,
- Diminution de la main d'ouvre nécessaire pour l'irrigation et la fertilisation,
- Amélioration de l'efficience d'utilisation des engrais par les cultures,
- Augmentation de la fréquence des apports d'engrais,
- Application précise des engrais au sol,
- Correction d'une déficience en phosphore au cours du cycle de la culture,
- Préservation de la qualité des eaux souterraines en limitant le lessivage des sels et des nitrates.

2.2.5.2 Problèmes liés à la fertigation

La micro-irrigation exige un investissement initial considérable. Il opère avec une très faible marge d'erreur et requiert la maîtrise de nouveaux concepts, tels que l'injection de l'engrais et des acides. Il exige également un régime de maintenance rigoureux, comprenant le nettoyage des filtres et la purge des gouteurs.

2.2.5.3 Station de Fertigation :

a. Kit d'injection

Il permet l'injection de plusieurs engrais dont le mélange se fait indépendamment, le système d'injection manuel a l'avantage de pouvoir injecter des volumes très importants allant jusqu'à 1200 l/h par injecteur. Le réglage des débits injectés se fait manuellement à l'aide des vannes de réglage à l'entrée des injecteurs. En option, et pour un contrôle plus pratique des paramètres, le kit manuel peut être équipé d'un afficheur, d'une sonde EC et d'une sonde pH (figure 9)



Figure 9. Photo d'un programmateur des irrigations avec un kit injection automatique

Le matériel d'injection d'engrais est indispensable à la réalisation de la fertigation. Il sert également à l'injection dans l'eau d'irrigation, des produits de traitements de l'eau (l'eau de Javel et l'acide), des pesticides ou d'autres produits chimiques. Parmi les injecteurs utilisés, on peut citer le réservoir d'engrais, la pompe doseuse, le venturi et le système d'aspiration créé par la motopompe.

2.2.5.4 Différents type d'injection

2.2.5.4.1 Injecteur Venturi

Un injecteur Venturi, installé en parallèle avec le réseau principal, engendre une dépression utilisée pour pomper la solution fertilisante à partir d'un bac de pré-mélange. En effet, lorsqu'une partie d'eau d'irrigation traverse le venturi, sa vitesse augmente et sa pression diminue ce qui permet l'aspiration du liquide à injecter. Le débit aspiré est contrôlé grâce à une vanne de réglage.
La figure 10 illustre les étapes de fonctionnement du venturi. L'arrivée de l'eau (1) engendre une dépression provoquant une aspiration de la solution mère préparée (2), puis l'eau repart vers la conduite principale d'irrigation (3).

2.2.5.4.2 Avantage du venturi

- Il ne requiert aucune source d'énergie externe;
- Utile pour la fertigation de grandes surfaces;
- Il est léger et se transporte facilement et le montage est simple.

2.2.5.4.3 Inconvénient du venturi

- Fortes pertes de pression.
- Il se peut qu'il n'y ait pas assez de pression pour actionner l'injecteur Venturi.
- Chaque modèle dispose d'une portée de fonctionnement limitée.
- Il est nécessaire d'assurer un débit d'eau minimum par l'injecteur afin de respecter le principe d'aspiration Venturi.



Figure 10. Principe de fonctionnement du venturi

2.2.5.5 Injection par pompe

L'injection de produits chimiques par des pompes doseuses présente une grande variété d'équipements. Ils peuvent être répartis en deux catégories : actifs, signifiant qu'une source d'alimentation externe est nécessaire, ou passifs, signifiant qu'aucune source d'alimentation externe n'est nécessaire. La solution chimique est aspirée dans le réservoir et injectée dans le système d'irrigation par une pompe qui crée une pression supérieure à la pression existante dans le système d'irrigation lui-même.

2.2.5.5.1 Avantages de l'injection par pompe doseuse

- Les pompes à injection disposent d'un grand nombre de réglages possibles permettant de fournir dans l'eau d'irrigation une concentration uniforme et continue de produits chimiques
- Les pompes à injection permettent un contrôle complet du processus d'injection de produits chimiques tel que le minutage de l'injection et elles peuvent être entièrement automatisées.
- Il n'y a aucune perte de pression dans le système.

2.2.5.5.2 Inconvénients de l'injection par pompe doseuse

- Le fonctionnement de l'équipement est relativement compliqué.
- Les coûts initiaux sont élevés par rapport aux autres systèmes (injecteur Venturi).
- Dans le cas de pompes non hydrauliques, une source d'énergie externe est nécessaire.
- En cas d'arrêt de l'écoulement d'eau, l'injection se poursuivra si les pompes sont activées par une source d'alimentation externe.

2.2.5.6 Pompes hydrauliques

Les injecteurs hydrauliques sont considérés comme des injecteurs actifs bien qu'aucune source d'énergie externe ne soit nécessaire.

L'énergie de l'eau sous pression dans le système d'irrigation est utilisée pour actionner l'injecteur.

a Pompes à membrane

Avantages :

- Sécurité d'exploitation totale.
- Pompe à étanchéité absolue.
- Le système de surveillance des membranes est d'un bon fonctionnement
- Résistance aux produits chimiques

b. Pompes à piston

Les pompes à pistons sont disponibles en deux modèles : à tête d'injection unique ou à tête d'injection double. Les unités activées par piston ont besoin d'eau provenant du système d'irrigation sous pression pour actionner le piston. La quantité d'eau expulsée du piston correspond en général à trois fois le volume de la solution injectée.

c. Pompe doseuse volumétrique

C'est une pompe doseuse permettant une injection, de la solution fertilisante, proportionnelle au débit d'eau nécessaire pour son fonctionnement et indépendamment de la pression de travail du réseau d'irrigation. La pompe est munie d'un dispositif de commande simple et facile à entretenir.

2.2.5.7 Pompe doseuse électrique

Lorsque l'électricité est disponible sur le terrain, il est plus facile d'utiliser des pompes électriques pour l'irrigation fertilisante. Elles sont peu coûteuses et fiables. Il est possible de les faire fonctionner à moindre coût et il est facile de les associer à du matériel pour une automatisation du processus. Une grande variété de modèles et de types sont disponibles : des petites pompes à membrane, capables de n'injecter que quelques litres par heure, à des pompes plus volumineuses, reliées à des vannes volumétriques, conçues pour une injection proportionnelle.

a. Pompes électrique à membrane

Les pompes d'injection à membrane ne fuient pas et sont spécialement conçues pour des matières corrosives ou toxiques. Selon le type de système choisi, la membrane peut être utilisée à des pressions atteignant 10 bars. Les pompes à membrane sont fournies avec un sas de séparation qui, en cas de rupture de la membrane due à l'usure, empêche les produits chimiques d'inonder la pompe elle-même ou d'autres composants du système. Du fait de leur conception, les pompes d'injection à membrane dépendent davantage de la pression que les pompes à piston.

b. Pompes électrique à piston

Ces pompes fonctionnent de façon similaire aux pompes à piston hydrauliques. Elles sont très précises et dépendent moins de la pression que les pompes à membrane. A la différence des pompes à membrane, le dosage change suivant la longueur de course et peut être contrôlé de manière à réduire le rendement au maximum. Les pompes à pistons multiples ou jumeaux conviennent particulièrement aux applications précises de mélange pour lesquelles il est nécessaire de mesurer des doses constantes et entièrement réglables de différents liquides. Par le biais de moteurs à vitesse variable, la concentration reste constante tandis que la quantité injectée s'adapte au débit variable du système d'irrigation.

Les pompes à piston fonctionnent à une pression allant de 2 à 10 bars, avec un débit de 55 à 270 l/h.

2.2.6 RÉSERVOIR D'ENGRAIS

Ce sont des cuves dans lesquels on met l'engrais. L'eau d'irrigation passe à travers le réservoir d'engrais dilue les engrais et entraîne une solution nutritive vers l'extérieur du réservoir en direction du système. Ce réservoir est monté en dérivation sur la conduite dans la station de tête. La quantité d'engrais à envoyer dépend de la taille du réservoir.

2.2.7 Critères de choix d'un appareil d'injection

Il faut toujours vérifier que la capacité de chaque pompe d'injection (létard& al 1995) permet d'injecter un volume de solution mère suffisant pour fabriquer la solution nutritive souhaitée. Le débit minimum (Q min) et le débit maximum (Q max) de la pompe d'injection doivent encadrer le débit Q (m3/h) du fonctionnement du réseau. Il existe actuellement sur le marché une large gamme d'injecteurs d'engrais et de pompes doseuses. Les principaux facteurs dont il faut tenir compte, lors du choix sont le débit d'injection (l/h), la maîtrise du taux d'injection avec précision, la disponibilité des pièces de rechange et la qualité – prix. Bien qu'elles coûtent plus chers à l'installation, les pompes doseuses présentent une meilleure précision de réglage, une régularité de la concentration, et un apport continu ou fractionné de la solution.

2.2.8 Raisonnement de la fertigation

Il s'agit de raisonner et piloter ensemble deux techniques culturales majeures : l'irrigation et la fertilisation. Il faut donc prévoir une installation d'injection adaptée au réseau d'irrigation et aux pratiques de fertilisation souhaitées et surtout respecter des règles précises de fonctionnement

2.2.8.1 Estimation des besoins réels

Avant de choisir l'engrais il est indispensable de :

- Faire une analyse d'eau pour vérifier son pH et qu'elle contient naturellement
- Faire une analyse de sol pour déterminer les éléments et combler judicieusement une carence éventuelle
- Evaluer les besoins de la plante de ses objectifs de production et de qualité

Cela permet de faire un calcul correct de la dose de fertilisant nécessaire à prévoir. Tout excès peut provoquer des accidents physiologiques sur la production des pollutions préjudiciable à l'environnement

2.2.8.2 Préparation de la solution mère

La solution mère est une solution concentrée : C'est de l'eau dans laquelle on a dissous des engrais. Elle est préparée dans une cuve :

Soit à partir d'un mélange d'engrais simples ou complets solides solubles, soit avec des engrais complets sous forme liquide prêtes à l'emploi. (Figure11)

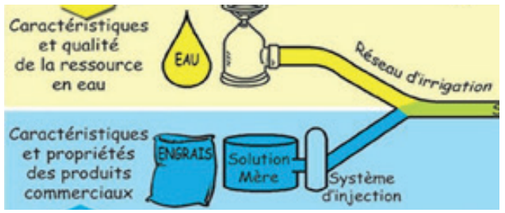


Figure 11 : Schéma d'injection de la solution mère dans le réseau

2.2.7.3 Injection de l'engrais dans le réseau

L'engrais dissous dans la solution mère passe dans le réseau au point d'injection. La solution mère se dilue dans le réseau. L'eau d'irrigation fertilisante et alors appelée" solution fille" ou solution fertilisante ou solution nutritive (figure 12).

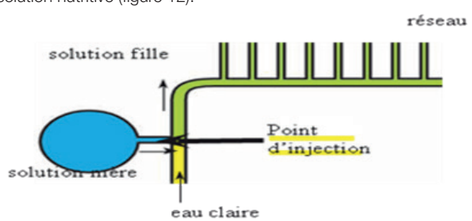


Figure 12 : Point d'injection de la solution mère dans le réseau

1. Calcul de la concentration de la solution mère et fille

$$\text{Concentration de la solution mère (g/l)} = \frac{\text{Poids total d'engrais (g)}}{\text{Volume de solution (l)}}$$

2.2.8.4 Calcul pratique

On a 180kg d'engrais dans une cuve de 1200 litres de solution.

$$\text{Concentration mère= Cm(g/l)} = \frac{180\text{x}1000\text{(g)}}{1200\text{(l)}} = 150\text{g/l}$$

On a une parcelle avec 2600distributeurs de 4l/h.

Débit du réseau=2600x4=10400l/h

Si on veut injecter cette solution avec un rapport d'injection de 1%(=0,01), on doit avoir : débit d'injection = 10400l/h x 0,01 = 104l/h

On obtient donc une concentration fille=150g/lx0,01=1,5g/l

2.2.8.5 Calcul du temps de fertilisation

Pour calculer un temps de fertilisation à partir d'une installation connue pour organiser son planning de travail, on détermine le temps nécessaire pour faire passer une certaine quantité d'engrais diluée dans un certain volume d'eau. Cela peut être utile pour envisager un fractionnement des apports et programmer des automatismes.
Temps de fertilisation (h) = quantité d'eau à injecter(g)/ débit du réseau (l/h)× concentration fille(g/l)

a- Calcul pratique 1

On a 180kg (=180000g) d'engrais dans une cuve de 1200litres

Concentration mère=180000g/1200l=150g/l

On a une parcelle avec 2600 distributeurs de 4l/h,

Soit un débit du réseau=2600x4=10400l/h

Le rapport d'injection est réglé 1,2%=0,012.

On obtient donc une Concentration fille=150g/lx0,012= 1,8g/l

Le temps total de fertilisation pour vider ce bac sera :

$$T = \frac{180000\text{g}}{10400\text{l/h x } 1{,}8\text{ g/l}} = 9{,}6\text{heures} = 9\text{h}37\text{mn}$$

b- Calcul pratique 2

Dans ce même cas de figure, si on prévoit de fractionner l'apport ou de n'apporter que 25kg (25000g) d'engrais par apport. La durée de fertilisation sera :

$$T = \frac{25000\text{g}}{10400\text{l/h x } 1{,}8\text{g/l}} = 1{,}33\text{heures} = 1\text{h}20\text{mn}$$

On peut gagner du temps en augmentant le rapport d'injection en veillant à ne pas dépasser 2g/l pour la concentration fille ;

Pour injecter une quantité d'engrais fixée, dans un temps donné

Le temps de fertilisation doit toujours être inférieur au temps d'irrigation, compte tenu du temps de rinçage. En période de faibles besoins en eau, la durée de fertilisation peut être une contrainte. Il est alors nécessaire de bien vérifier que la concentration au niveau des distributeurs ne dépasse pas 2 g/l. On peut, si nécessaire, fractionner l'apport sur plusieurs arrosages.

$$\text{Concentration fille (g/l)} = \frac{\text{Quantité d'engrais à injecter (g) x 60}}{\text{Débit du réseau (l/h) x temps de fertilisation (mn)}}$$

2.2.8.6 Réglage du taux d'injection

On veut impérativement faire passer une certaine quantité d'engrais dans un temps donné sans dépasser une concentration de 2g/l aux distributeurs ! Cela impose un certain débit d'injection ou un certain rapport d'injection.

$$\text{Rapport d'injection (\%)} = \frac{\text{Débit d'injection (l /h)}}{\text{Débit de réseau (l/h)}} = \frac{\text{concentration fille (g/l)}}{\text{concentration mère(g/l)}}$$

a- Calcul pratique : Pour régler le débit d'injection ou le rapport d'injection

On a une parcelle avec 2600 distributeurs de 4l/h, soit un débit du réseau =2600x4=10400l/h

On accepte une concentration fille de 2g/l

Le débit d'injection nécessaire sera :

$$\text{Débit d'injection (l/h)} = 10\,400 \text{ l/h} \times \frac{2 \text{ g/l}}{100 \text{ g/l}} = 208 \text{ l/h}$$

Si on dispose d'un appareil type fertiliseur, ou venturi, on fait des essais "à vide" pour vérifier et caler le débit d'injection. Si on dispose d'une pompe hydraulique ou d'une pompe électrique, on règle le débit d'injection. Ou alors on dispose d'un doseur hydraulique proportionnel ou d'une pompe électrique asservie au débit et on règle le rapport d'injection.

b- Calcul pratique : Pour régler le débit d'injection ou le rapport d'injection

On a 300 kg (= 300 000 g) d'engrais à faire passer en une semaine à raison de 1 heure par jour (soit 7 heures).

Les parcelles ont 6250 distributeurs de 4 l/h. Débit du réseau = 6250 x 4 = 25 000 l/h

La concentration de la solution fille sera :

$$\text{Concentration de la solution fille} = \frac{300\,000 \text{ g}}{25\,000 \text{ l/h} \times 7 \text{ h}} = 1{,}7 \text{ g/l}$$

Si on avait prévu un temps d'irrigation de 1/2 h par jour au lieu d'une heure, la concentration aux distributeurs aurait été de 3,4 g/l, ce qui est bien au-delà des 2 g/l tolérés

2.2.9 Eléments de gestion de la fertigation

2.2.9.1 Outil de management de la fertigation

On propose ici l'exemple de la tomate industrielle :

- Les besoins de la culture en éléments fertilisants

Les besoins de la culture de tomate industrielle en éléments nutritifs, sont calculés en fonction des besoins en éléments de la culture, de la disponibilité des éléments nutritifs dans l'eau et dans le sol. On raisonne le fertigation selon l'équilibre 1-0,5-2 sont de 20 kg/ha d'azote (14 kg/ha sous forme de nitrate et 6 kg/ha sous forme ammoniacale), 10 kg/ha de P2O5 et 40 kg/ha de K2O. La conductivité électrique (CE) de la solution fille recommandée doit être inférieur à 2,4 dS/m (1 CE de 0,9 dS/m = 1g/l de sel).

- Préparation de la solution mère destinée pour la fertigation

Pour satisfaire les besoins en éléments nutritifs du stade de culture considéré dans notre exemple, les engrais disponibles qui seront utilisés pour la préparation de la solution mère sont : le Phosphate mono-ammonique (MAP), l'ammonitrate, le nitrate de potasse et le sulfate de potasse. Ces engrais sont compatibles, donc un seul bac suffira.

- Calcul le besoin d'engrais pour fertiliser les tomates pour un secteur

Par rapport aux besoins en éléments fertilisants pour un hectare de tomate industrielle, les quantités de fertilisants à apporter par secteur d'irrigation (1,2 ha) sont de : 24 kg d'azote (16,8 kg sous forme de nitrate N-NO3- et 7,2 kg sous forme ammoniacale N-NH4+), 12 kg de P2O5, et 48 kg de K2O.

Pour accomplir les besoins en P2O5 d'un secteur d'irrigation de tomate industrielle (12 kg de P2O5), la quantité de MAP (12% NH4+ + 60% P2O5) à apporter est de 12 x 100/60 = 20 kg de MAP. Cette quantité de MAP fournit 20 x 0,12 = 2,4 kg de N-NH4+ (Voir Tableau ci-dessous).

Pour apporter le reste des besoins en azote ammoniacal N-NH4+ (7,2 - 2,4 = 4,8 kg), on utilisera l'ammonitrate (16,5% N-NO3- - 16,5% N-NH4+). La quantité d'ammonitrate à apporter est égale à 4,8 x 100/16,5 = 29,1 kg.

Cette quantité d'ammonitrate apporte 29,1 x 0,165 = 4,8 kg d'azote sous forme de nitrate N-NO3-.

Pour combler les besoins en nitrate N-NO3- (16,8 - 4,8 = 12 kg), on apporte une quantité de nitrate de potassium (13%N-NO3- - 46%K2O) = 12 x 100/13 = 92,3 kg. Cette quantité de nitrate de potassium apporte 92,3 x 0,46 = 42,5 kg de K2O.

Pour compléter les besoins en potasse soit 48 - 42,5 = 5,5 kg, on apportera une quantité de sulfate de potassium (50% K2O) égale à 5,5 x 100/50 = 11 kg.

Cette quantité d'ammonitrate apporte 29,1 x 0,165 = 4,8 kg d'azote sous forme de nitrate N-NO3-.

Pour combler les besoins en nitrate N-NO3- (16,8 - 4,8 = 12 kg), on apporte une quantité de nitrate de potassium (13%N-NO3- - 46%K2O) = 12 x 100/13 = 92,3 kg. Cette quantité de nitrate de potassium apporte 92,3 x 0,46 = 42,5 kg de K2O.

Pour compléter les besoins en potasse soit 48 - 42,5 = 5,5 kg, on apportera une quantité de sulfate de potassium (50% K2O) égale à 5,5 x 100/50 = 11 kg.

La quantité totale d'engrais utilisée pour la confection d'une solution mère en vue de ferti-irriguer un secteur de tomate industrielle de 1,2 ha pendant dix jours est de 152,4 kg (Voir Tableau ci-dessous)

Quantité d'engrais en kg par secteur d'irrigation		Eléments nutritifs à apporter kg par secteur par semaine			
		$N(NO_3^-)$	$N(NH_4^+)$	P_2O_5	K_2O
Phosphate mono-ammonique = MAP (12%N-NH_4^+ + 60% P_2O_5)	20		2,4	12	
Nitrate d'ammonium = Ammonitrate (16,5%N-NO_3^--16,5%N-NH_4^+)	29,1	4,8	4,8		
Nitrate de Potassium (13% N-NO_3^- - 46% K_2O)	92,3	12			42,5
Sulfate de Potassium (50% K_2O)	11				5,5
Total	152,4	16,8	7,2	12	48

Calcul des quantités d'eau pour dissoudre les engrais utilisés

La quantité totale d'eau nécessaire pour bien dissoudre les 152,4 kg d'engrais nécessaire pour la confection de la solution mère est donnée dans le Tableau ci-dessous. Le volume de la solution mère qui sera injectée durant les dix jours sera de 700 litres. Une quantité (Q) égale à 70 litres de solution mère sera injectée chaque jour dans l'eau d'irrigation.

Pour confectionner la solution mère, on versera 50 litres d'eau (si possible à 20-25°C) dans un bac de 1000 litres, suivi par le surnageant de chacun des engrais dissous auparavant, puis on complète avec de l'eau à 700 litres.

	Quantité d'engrais par dix jours (kg/ha) (1)	Solubilité recommandée (kg/l) (2)	Le volume d'eau pour dissoudre les engrais (en litres) (1)/(2)
MAP	20	0,25	80
Ammonitrate	29,1	1,2	24,3
Nitrate de Potassium	92,3	0,25	369,2
Sulfate de Potassium	11	0,08	137,5
Total pour le bac	152,4	-	611 (à compléter par 89 l d'eau pour obtenir une solution mère de 700 litres)

Taux, débit et durée d'injection

Le taux d'injection est égal à:

r = Cf/Cm = 2,7/217,7 = 0,0124 = 12,4 %o avec Cf = concentration de la solution fille = 2,4/0,9 = 2,67 = 2,7 g/l et Cm = concentration de la solution mère = 152400/700 = 217,7 g/l.

Le débit d'injection (Di) est la quantité de solution mère (litres) injectée avec l'eau d'irrigation par heure de fonctionnement en vue d'atteindre une concentration de la solution fille exigée par la culture. Il dépend de la concentration (en gr/l) des solutions mère (Cm) et fille (Cf) et du débit d'eau de la source Qs (en l/h) envoyé vers un secteur d'irrigation.

Di = Qs x Cf/Cm = 48000 x 0,0124 = 595,2 l/h (avec Qs = débit de la source d'eau = 48000 l/h et Cf/Cm = 2,7/217,7 = 0,0124).
La durée d'injection (Dinj) est :

Dinj = Q /Di = 70/595,2 = 0,118 h = 0,118 x 60min = 7 minutes
[Avec Q = quantité de solution mère à injecter dans l'eau d'irrigation chaque jour = 70 l/jet Di = débit d'injection (l/h)].

2.2.9.2 Proposition d'un outil de gestion économique de la fertigation raisonnée

2.2.8.2.1 Importance de la notion du facteur limitant

Un facteur limitant est un élément nutritif qui se trouve en plus faible quantité par rapport aux besoins de la culture et qui a pour action de limiter le rendement. L'eau est le premier facteur limitant de la nutrition des plantes. Son rôle essentiel dans le métabolisme. Il détermine le potentiel de croissance de la plante. D'autre part l'eau véhicule vers les racines les éléments minéraux en solution et permet leur absorption. Sans eau dans le sol, pas de nutrition minérale possible. Un élément nutritif absorbé en trop faible quantité par rapport aux besoins de la plante devient aussi un facteur limitant de la croissance de la plante. Dans les cas extrêmes, des symptômes visuels de carence peuvent apparaître. (Figure 13).

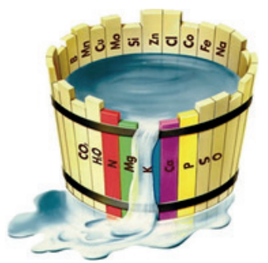


Figure 13 : schéma qui illustre l'effet d'un facteur limitant sur la production

L'importance de cette notion de facteur limitant est qu'elle détermine avec précision les facteurs à surveiller pour optimiser les rendements sans avoir des effets néfastes des excès de ces éléments sur l'environnement mais aussi sur la charge économique de la fertigation. Dans ce sens, l'importance d'un bon pilotage d'irrigation est très claire vue le rôle qui joue l'eau dans le transport des éléments dans le sol et dans la plante.

En effet, une perte d'eau dans les profondeurs signifie automatiquement des pertes d'engrais surtout les éléments mobiles dans le sol (azote, phosphore, sulfates, …). De même, le pilotage des apports d'engrais par des outils de suivi adéquats contribue à optimiser la production tout en évitant les effets néfastes de la salinité sur le sol et la plante, sur l'environnement (pollution de la nappe et effet sur la faune du sol par exemple) et sur les coût de production.

2.2.8.2.2 Proposition d'un outil de raisonnement de la fertigation

L'objectif de cet outil de gestion est l'évaluation en continue de l'effet d'une irrigation fertilisante (fertigation) sur la production d'une culture donnée. Cela se fera sur la base de suivi des critères d'évaluation et la gestion (changement) des facteurs de pilotage de la fertigation(Figure 14).

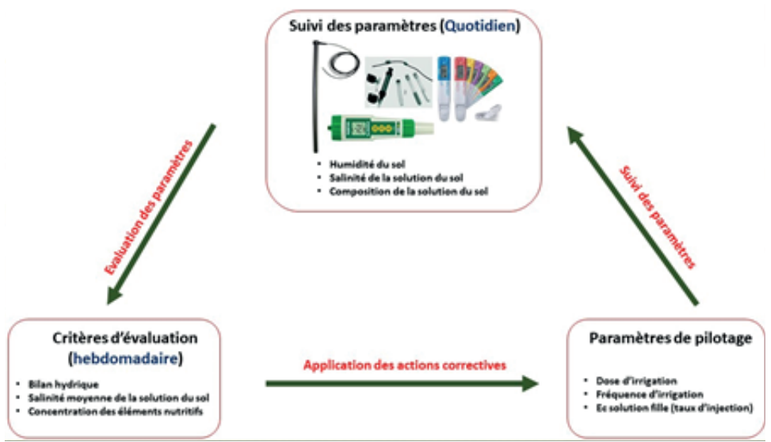


Figure 14: Schéma de l'outil de contrôle et de pilotage de la fertigation

a- Paramètre et Critères d'évaluation

Il s'agit d'un suivi hebdomadaire ou quotidien des facteurs limitants définis (l'humidité du sol, la salinité de la solution du sol, et la composition de la solution du sol en éléments nutritifs essentiels).

Critères d'évaluation

- **Salinité de la solution du sol**

Il s'agit d'un suivi quotidien de la salinité et du pH de la solution du sol à travers sa récupération par des tubes lysimétriques pour chaque parcelle. Les mesures se font grâce à un Ec-mètre et un pH-mètre de terrain. Les mesures sont notées sur un tableau sur place comme suit :

Parcelle	Date	N° de tube lysimétrique	pH	Ec
1				
2				

- **Humidité du sol de la zone racinaire**

Il s'agit d'un suivi quotidien de l'humidité du sol à travers des sondes capacitives ou des tensiomètres. L'objectif est de contrôler le niveau d'humidité de la zone racinaire d'un côté, et de l'autre côté, de suivre les éventuelles pertes d'eau au-delà de la zone racinaire.
Critères d'évaluation :

- ***Bilan hydrique hebdomadaire***

Il s'agit de calculer la différence entre la valeur initiale et finale de l'humidité du sol dans un intervalle de 7 jours. Une valeur positive signifie un bilan hydrique positif et donc un excès d'eau. Une valeur négative du bilan hydrique signifie un déficit hydrique au niveau de la zone racinaire.

- ***Salinité moyenne hebdomadaire***

Il s'agit de calculer la valeur moyenne de la salinité du sol pour chaque parcelle.

- ***Teneur des éléments nutritifs dans la solution du sol***

Il s'agit de mesurer la teneur des éléments nutritifs essentiels de la solution du sol (azote, potasse, phosphore et calcium) par un des outils de mesures dans le champ ou par l'envoi des échantillons au laboratoire. Les mesures sur le champ sont préférables vue qu'on obtient des mesures sur place pour les évaluer et puis appliquer les actions correctives sur place.

b- Paramètres de pilotage

- ***Dose d'irrigation***

C'est la quantité journalière d'eau à appliquer. Il se base sur un calcul journalier à travers la formule ETc= Kc x ETo. (Voir chapitre 1)

- ***Fréquence d'irrigation***

C'est le nombre d'apport par jour. Il est défini par le calcul de la dose nette maximale (voir chapitre 1)

- ***Ec de la solution fille***

L'Ec de la solution fille est contrôlé par le taux d'injection.

- ***Equilibre de la solution mère***

C'est la composition de la solution mère en éléments nutritifs (azote, potasse, phosphore et calcium).

c- Actions correctives

- ***Changement de Kc***

Bilan hydrique proche de 0 **Pas de changement**

Bilan hydrique positif **Diminution** de la valeur du Kc

Bilan hydrique négatif **Augmentation** de la valeur du Kc

- ***Changement de la valeur de la DNM***

Perte d'eau dans les profondeurs **Augmenter** les fréquences d'irrigation

L'eau n'arrive pas jusqu'à la profondeur racinaire **Diminuer** les fréquences d'irrigation

- ***Changement du taux d'injection***

Salinité moyenne de la solution du sol stable **Pas de changement**

Salinité moyenne de la solution du sol augmente **Diminution** du taux d'injection

Salinité moyenne de la solution du sol diminue **Augmentation** du taux d'injection.

- ***Changement de la composition de la solution mère***

Cette composition change en fonction des stades mais aussi en fonction des résultats des analyses quotidiennes de la solution du sol. Ces dernières nous aident à comptabiliser la quantité des éléments libérées par le sol dans la solution du sol et donc la portion de ces éléments disponible pour la plante.

- ***Changement de la composition de la solution mère***

Cette composition change en fonction des stades mais aussi en fonction des résultats des analyses quotidiennes de la solution du sol. Ces dernières nous aident à comptabiliser la quantité des éléments libérés par le sol dans la solution du sol et donc la portion de ces éléments disponible pour la plante.

2.2.8.2.3 Comparaison des deux méthodes de raisonnement de la fertigation

a- Contexte

Il s'agit d'une partie d'un essai qui rentre dans le cadre d'un projet piloté durant trois ans sur une culture de pommier dans la région d'imouzzer Kandar entre 2015 et 2017. Les résultats présentés ci-dessous concernent la première année de l'essai (2015). Il s'agit d'une comparaison économique entre deux stratégies, un Baseline qui représente la conduite classique de la ferme et une stratégie basée sur un raisonnement scientifique (défini ci-dessus).

Le pilotage de la fertigation pour la stratégie du raisonnement de la fertigation était basé sur :

- Une station Agrométéorologique pour le suivi des paramètres du climat (figure 15)
- Une sonde capacitive pour le suivi de l'humidité du sol (figure 15)
- Des tubes lysimétriques pour le suivi de la solution du sol (figure 15)
- Un Ec mètre et un pH mètre (figure 15)



Figure 15 outils de suivi de la fertigation

b- Résultats et discussion

Les deux tableaux ci-dessous (Tableau 9 et 10) présentent les quantités d'engrais et d'eau apportées pour les deux stratégies ainsi que les charges engagées (eau et engrais).

Tableau 9 : stratégie de raisonnement de la fertigation : Economie d'eau et d'engrais

Stade phénologique	Période (2015)			Quantité d'eau (m3/ha)	Engrais (Kg/ha)				Coût total (Dh/ha)
	Début	Fin	Durée (Jr)		Ammonitrates	Acide phosphorique	Nitrates de calcium	Nitrates de potasse	
Floraison	18/04	01/05	13	584	70	15	29	0	
Nouaison	02/05	31/05	29	166	23	5	10	0	
Grossissement	01/06	19/06	18	510	71	15	31	0	
	20/06	26/06	6	269	0	0	0	0	
	27/06	10/07	13	578	58	0	46	23	
	11/07	26/07	15	671	54	0	0	34	
Maturation	27/07	02/08	6	240	12	0	0	14	
	03/08	12/08	9	262	0	0	21	0	
Total				03/08	288	35	137	71	***6619***

Tableau 10 : Stratégie Baseline : fertigation non raisonnée

Stade phénologique	Période (2015)			Quantité d'eau (m3/ha)	Engrais (Kg/ha)				Coût total (Dh/ha)
	Début	Fin	Durée (Jr)		Ammonitrates	Acide phosphorique	Nitrates de calcium	Nitrates de potasse	
Floraison	18/04	01/05	13	700	39	13	26	0	
Nouaison	02/05	31/05	29	200	116	22	58	0	
Grossissement	01/06	19/06	18	646	72	9	36	54	
	20/06	26/06	6	359	21	0	0	24	
	27/06	10/07	13	770	45	0	0	52	
	11/07	26/07	15	895	0	0	0	75	
Maturation	27/07	02/08	6	320	0	0	0	30	
	03/08	12/08	9	350	0	0	0	45	
Total				4240	294	44	120	280	10302

Il est clair que la réduction de la quantité des apports en eau a induit une économie du coût de pompage et également de la consommation des engrais afin de garder une salinité tolérable pour l'arbre. A titre d'exemple, avec un scénario de fertigation raisonnée comparé par rapport à un scénario business as usual (fertilisation non raisonnée), le coût total économisé est équivalent à 3683 dh/ha pour le cas de cette culture de pommier. De plus, le rendement en fruit était plus élevé pour la stratégie de fertigation raisonnée par rapport à celle non raisonnée ce qui va engendrer un chiffre d'affaire plus important et donc un bénéfice plus élevé.

Cet exemple pratique a été donné à titre d'exemple afin de montrer le gain généré avec une fertigation raisonnée. Le raisonnement peut changer dans d'autre contexte selon les conditions pédoclimatiques, le type de culture, le rendement objectif, la disponibilité en eau, le type d'engrais utilisé, et d'autres pratiques agricoles qui influencent directement et indirectement sur la réponse de la plante. Il est à signaler que le bon raisonnement de la fertilisation est conditionné par un bon pilotage d'irrigation comme il a été expliqué dans les chapitres ci-dessus.



Chapitre 3:

Etude de cas de projets de conversion du pompage conventionnel vers le pompage solaire avec système de fertigation : Cas d'irrigation directe (absence du bassin)



INTRODUCTION

Dans cette partie, nous allons étudier l'option de conversion d'un mode de pompage d'eau où le réseau d'irrigation goutte à goutte est alimenté par une pompe fonctionnant avec du gasoil, du gaz butane ou avec une pompe électrique, vers un mode d'irrigation goutte à goutte alimenté par une pompe solaire.

Nous allons opérer une analyse des caractéristiques et contraintes générées par cette conversion selon les deux options suivantes :

- Cas d'une exploitation ne disposant pas de bassin de stockage, dans ce cas, le système de pompage alimente directement le réseau d'irrigation G à G,
- Cas où l'exploitation dispose d'un bassin de stockage alimentant le réseau d'irrigation G à G.

L'objectif de cette analyse est multiple :

- Identifier les variations des paramètres et des grandeurs des composants des systèmes, notamment la partie génération d'électricité, la partie pompe et la partie connexion pompe- réseau gouttes à gouttes
- Identifier les contraintes générées par l'opération de conversion, notamment celles concernant les paramètres hydrauliques du réseau d'irrigation.

Notre étude comparative concerne une exploitation disposant d'une superficie de 5ha d'agrumes.

II- SITUATION DE BASE : POMPAGE CONVENTIONNEL

Nous étudions le cas d'une exploitation agricole de **5 Ha d'agrumes.**



a- Les données de base :

Débit des goutteurs (l/h)		4
Espacement entre gouteurs Eg (m)		1
Écartement entre rampe en (m)		7
Besoin brut (mm)		5
Nombre de rampes par ligne		2
Pression de Service du distributeur (mce)		10

b- Pluviométrie fictive (Pf) et durée d'irrigation par poste (T)

Caractéristique	Formule	Valeur 1
Pluviométrie calculée (mm/h)	Pf = qg/Sg	1.14
Durée d'irrigation par poste d'irrigation par jour (T)	T= Bb /Pf	4.38

c- Poste d'irrigation

Nous supposons, à titre d'exemple, une durée d'irrigation souhaitée entre 8 et 9 heures par jour, le nombre de secteur est de deux secteurs pour un débit de 28,57 m3/h et une durée d'irrigation totale de 8,75 h par jour.

Pompes	Secteur	Poste	Cultures	Durée d'irrigation (h/j)	Superficies (m2)	Nb de goutteurs	Débits (m3/h)
Pompe 1	1	1	Agrumes	4.38	25000.00	7142	28.57
	Total secteur 1			4.38	25000.00	7142.00	28.57
	2	2	Agrumes	4.38	25000.00	7142	28.57
	Total secteur 2			4.38	25000.00	7142.00	28.57
	Total Général			8.75	50000.00	14284.00	

d- Dimensionnement de la pompe

Le calcul de la puissance P nécessaire au niveau de la pompe exprimée en Kw et en CV est fait à partir des formules suivantes :

$$P_p = \frac{\rho \times HMT \times Q_P}{102\,\eta}\,[KW]$$

$$P_p = \frac{\rho \times HMT \times Q_P}{75\,\eta}[CV]$$

- **Pp :** La puissance en Kilowatt (Kw) ou en cheval vapeur (CV).
- **HMT :** La charge requise de la pompe
- **Qp :** Le débit requis en m3/s
- **η** : L'efficience de la pompe (η = 0,70)
- **ρ**: La masse volumique de l'eau en Kg/m3, (ρ = 1000 kg.m-3).

La puissance du moteur Pm est :

Pm = en Kw avec ηm=0.75

Pour la Hauteur Manométrique Totale, nous supposons une valeur de 65 mce (y compris profondeur forage, pertes de charge au niveau de la station de tête, pertes de charge linéaires et singulières et la pression de service du distributeur). Le débit du secteur le plus important est de 28,57 m³/h, nous projetons d'installer une électropompe dont les caractéristiques sont Q=28.57 m3/h et une HMT de 65mCE.

	Pompe
Débit de pompe (m3/h)	28.57
HMT totale (mCE)	65.00
Rendement pompe	0.70
Rendement moteur	0.75
Puissance pompe en (CV)	9.80
Puissance pompe en (KW)	7.21
Puissance moteur en (CV)	14.37
Puissance moteur en (KW)	10.58

III- PROJET DE CONVERSION VERS LE POMPAGE SOLAIRE

1. DIMENSIONNEMENT DU CHAMPS PHOTOVOLTAIQUE

Les différentes étapes pour le dimensionnement d'un système de pompage solaire sont :

- Évaluation des besoins en eau
- Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire
- Détermination de l'énergie solaire disponible
- Choix des composants

a- Estimation des besoins en eau

Les besoins d'eau pour l'irrigation dépendent du type de culture, de la méthode d'irrigation et des facteurs météorologiques (la température, l'humidité, la vitesse du vent, l'évapotranspiration du sol, et la saison de l'année en question). Cependant, la pratique et l'expérience locale restent toujours très indispensables pour une évaluation correcte des besoins.

Nous prenons l'exemple de l'exploitation d'agrumes de 5 ha. Les besoins en eau sont détaillés dans le tableau 11:

Tableau 11 : Estimation des besoins en eau

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Jui.	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Eto (mm/j)	2.01	2.66	3.67	4.71	5.49	6.26	6.49	6.2	5.13	3.71	2.56	2.01
Kc	0.6	0.65	0.65	0.65	0.65	0.7	0.7	0.7	0.65	0.65	0.6	0.6
Besoin net (mm/j)	1.2	1.7	2.4	3.1	3.6	4.4	4.5	4.3	3.3	2.4	1.5	1.2
Besoin brut (mm/j)	1.3	1.9	2.7	3.4	4.0	4.9	5.0	4.8	3.7	2.7	1.7	1.3
Besoin brut (m3/ha)	13	19	27	34	40	49	50.5	48	37	27	17	13

Les besoins de pointe sont : ***50.5 x 5= 252.5 m3***

b- Rayonnement solaire

Le tableau 12 donne les valeurs de rayonnement global journalier calculées sur la moyenne mensuelle pour des rayons incidents sur un plan incliné d'un angle optimal saisonnier sur le site.

Tableau 12: Les valeurs globales de l'irradiation journalière mensuelle pour une inclinaison optimale saisonnière

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Jui.	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
HTo(wh/m².jr)	3194	4139	5222	6222	6639	6778	6278	5917	5306	4361	3556	3083
h (heures)	3.2	4.1	5.2	6.2	6.6	6.8	6.3	5.9	5.3	4.4	3.6	3.1

c- Hauteur manométrique total

La hauteur manométrique totale (HMT) d'une pompe est la différence de pression en mètres de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement. Cette hauteur peut être calculée comme suit :

HMT = Hg + Pc

Où

Hg = hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée (niveau dynamique) et le plan d'utilisation (Hr+Nd). Pour une pompe de surface sur un plan d'eau, Hg sera choisie en fonction de la hauteur de la pompe à son niveau le plus bas.

Pc = pertes de charge produites par le frottement de l'eau sur les parois des conduites. Ces pertes sont en fonction de la distance des conduites (D), de leur diamètre (dc) et du débit de la pompe (Q) et s'expriment en mètres d'eau. Le diamètre des conduites doit être calculé afin que ces pertes de charge correspondent au plus à 10% de la hauteur géométrique totale.

Niveau statique

Le niveau statique (Ns) d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à la surface de l'eau avant pompage.

Niveau dynamique

Le niveau dynamique (Nd) d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à la surface de l'eau pour un pompage à un débit donné. Pour le calcul de la HMT, le niveau dynamique est calculé pour un débit moyen. La différence entre le niveau dynamique et le niveau statique est appelée rabattement. Rm est le rabattement maximal acceptable avant de stopper la pompe (Figure 16).

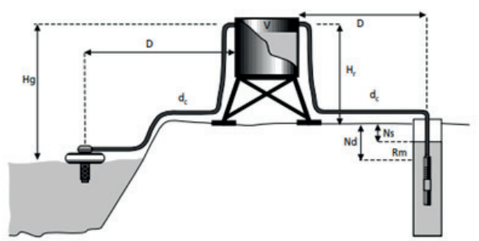


Figure 16. Hauteur manométrique totale

Rabattement

La différence entre le niveau dynamique et le niveau statique est appelée rabattement. Rm est le rabattement maximal acceptable avant de stopper la pompe (Figure 16).

Des essais de pompage peuvent être effectués notamment pour évaluer le rendement fiable à long terme (ou débit d'exploitation) d'un forage, et donc déterminer si le forage peut être considéré comme une « réussite » et aussi évaluer la performance hydraulique d'un forage, généralement par ses caractéristiques de rendement-rabattement. Quel doit être le rabattement pour fournir une certaine quantité d'eau ?

Parmi les essais les plus pour déterminer le débit d'exploitation c'est l'essai par paliers (parfois appelé essai par paliers de rabattement) est conçu pour déterminer le rapport à court terme entre le rendement et le rabattement dans le forage testé.

Il consiste à effectuer une série de pompages à différents débits, pendant des temps relativement courts (normalement, toute la série peut être terminée en un jour).

HMT = 65 MCE

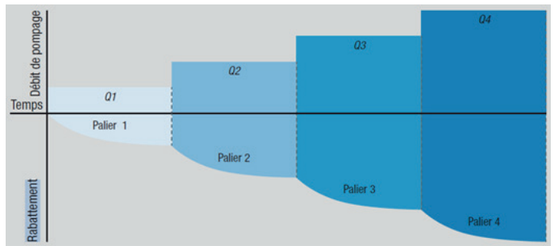


Figure 17: Séquence typique de débits de pompage (Q) et le comportement du niveau d'eau.

d- Identification des besoins journaliers en eau - régime d'irrigation pour le cas de référence

Les besoins journaliers en eau d'irrigation pour la parcelle concernée sont répartis au cours de l'année comme suit.

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Jui.	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Total annuel
Besoin brut (m3/ha)	13	19	27	34	40	49	50,5	48	37	27	17	13	
Besoins brut de l'exploitation (m3)	65	95	135	170	200	245	252,5	240	185	135	85	65	**1872,5**

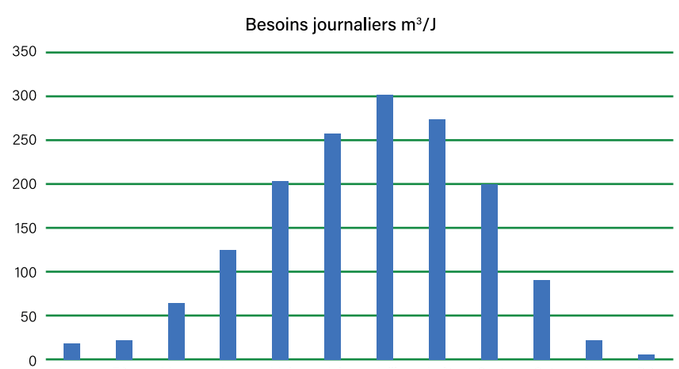


Figure 18: Besoin en eau journalier pour la parcelle concernée

e- Calcul de l'énergie hydraulique quotidienne requise

Une fois les besoins nécessaires en volume d'eau pour chaque mois de l'année et les caractéristiques du puits sont définis, nous pouvons calculer l'énergie hydraulique moyenne journalière et mensuelle nécessaire à partir de la relation :

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Jui.	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
HTo(wh/m².jr)	3194	4139	5222	6222	6639	6778	6278	5917	5306	4361	3556	3083
h (heures)	3.2	4.1	5.2	6.2	6.6	6.8	6.3	5.9	5.3	4.4	3.6	3.1
Qh (m3/hr)	4.2	4.6	5.1	5.5	6.0	7.2	8.0	8.2	7.0	6.1	4.8	4.3
Eh	11.9	17.0	23.5	30.1	35.1	43.1	44.7	42.7	32.8	23.7	15.1	11.9
Hto/Eh	269.2	243.3	222.5	206.5	189.1	157.2	140.4	138.5	161.7	183.8	235.2	259.8

L'énergie hydraulique ***Eh = 44.7 KWh/j***

f- Calcul de l'énergie électrique quotidienne requise

L'énergie nécessaire pour soulever une certaine quantité d'eau sur une certaine hauteur donnée pendant une journée est calculée à partir de l'équation suivante :

$$E_e = \frac{E_h}{\eta_{MP} x \eta_{Ond}}$$

Où :

- Ee : Energie électrique exprimée en (kwh/jr)
- η_{MP} : Le rendement du groupe motopompe, en général entre 30% et 60%.
- η_{Ond} : Le rendement d'onduleur.

Pour un rendement du groupe motopompe de 50% et un rendement onduleur de 90% :

Pour le calcul de l'énergie électrique, nous pouvons utiliser la formule simplifiée suivante :

g- Calcule de l'énergie électrique nécessaire par jour :

$$\text{Energie Électrique Journalière (Wh/j)} = \frac{\text{Volume d'eau (m3/j) x HMT (m) x 2,725}}{\text{Rendement de la motopompe}}$$

Ci-après les valeurs des rendements de référence par type de pompe :

Type de pompe	Volumétrique	Centrifuge (<2 HP)	Centrifuge (>2 HP)
Rendement de référence	0,6	0,4	0,6

Mois	Besoins journaliers	Eh requise (Wh)	Eéle requise (Wh)
Janv	65	11.513,13	23.026,25
Fév	95	16.826,88	33.653,75
Mars	135	23.911,88	47.823,75
Avr	170	30.111,25	60.222,50
Mai	200	35.425,00	70.850,00
Jui	245	43.395,63	86.791,25
Juill	252,5	44.635,50	89.271,00
Août	240	42.510,00	85.020,00
Sept	185	32.768,13	65.536,25
oct	135	23.911,88	47.823,75
Nov	85	15.055,63	30.111,25
Dév	65	11.513,13	23.026,25

h- Calcul de la puissance des panneaux solaires à installer :

La production de panneaux dépend de la puissance lumineuse reçue au sol, de leur mode de pose, d'une perte de rendement dû à la maintenance (film de poussière) et du vieillissement des panneaux dans le temps. Les rendements de parc photovoltaïques régulièrement constatés sont les suivants :

$$\text{Puissance Totale Panneaux à installer} = \frac{\text{Energie Électrique Journalière (Wh/j)}}{\text{Rayonnement Journalier (kWh/m2/j) x Rendement}}$$

Dans notre cas nous aurons un système de pompage solaire avec un générateur PV d'une puissance estimée à **19,8 KWc**.

IV- ANALYSE DES CARACTERISTIQUES TECHNIQUES, FINANCIERES ET ENVIRONNEMENTALES LIEeS A LA CONVERSION.

L'absence du bassin ne laisse pratiquement aucune marge de manœuvre quant au dimensionnement et au choix du système de pompage solaire.

Taille requise du système

Afin de satisfaire les besoins de l'exploitation en eau d'irrigation et en absence de bassin de stockage, il est impératif de considérer la période de la demande de pointe. Dans notre cas le mois de juin - juillet – août avec un pic des besoins de 252 m3/h.
Le système de pompage solaire recommandé pour ce site dans ce cas sera d'une taille estimée à 19,8 KWc.

Adéquation besoins/productible

Il faut retenir dans ce cas la contrainte du surplus de productible d'eau d'irrigation générée par cette pompe durant les autres mois, en particulier l'écart (excès) très important durant la période novembre - avril entre la quantité d'eau pompée et celle des besoins.
Le productible journalier pour le système de pompage solaire de 19 KWc est simulé selon le graphe ci-dessous.

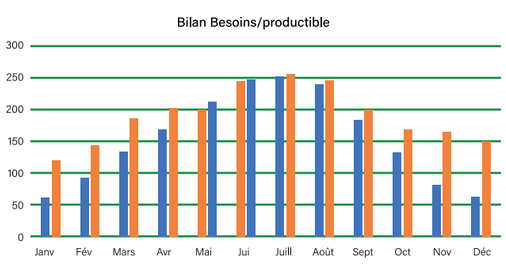


Figure 19: Bilan : besoin/productible

Adéquation par rapport au niveau du régime d'irrigation

L'absence du bassin de stockage impose à l'agriculteur d'utiliser directement l'eau pompée du forage pendant les horaires de pompage. Cette contrainte poserait des problèmes au niveau de l'adéquation entre les horaires de disponibilité de l'eau pompée avec les horaires appropriés pour l'irrigation de la parcelle.

Adaptations requises de débit/pression

Une autre contrainte technique consiste en la variation du débit/pression de l'eau pompée par la pompe solaire au cours de la journée et qui pourrait entrainer un écart de compatibilité en termes de pression utile avec les composants du réseau G à G, en particulier au niveau de la station de tête.

Contrainte de gestion de l'excédent d'eau – impact sur les ressources

L'excédent d'eau généré pendant les périodes de faible demande en eau impose à l'agriculteur de mettre en œuvre des solutions, parmi lesquelles :

- Un arrêt régulier du système de pompage durant les périodes de faible demande
- Une réorientation de l'eau produite pendant les périodes de faible demande pour les agrumes vers d'autres cultures (culture intermédiaire, extension des superficies irriguées, etc..)



FERTIGATION ASSOCIEE AUX RÉSEAUX GOUTTE-À-GOUTTE ALIMENTÉS PAR DES SYSTÈMES DE POMPAGE SOLAIRE

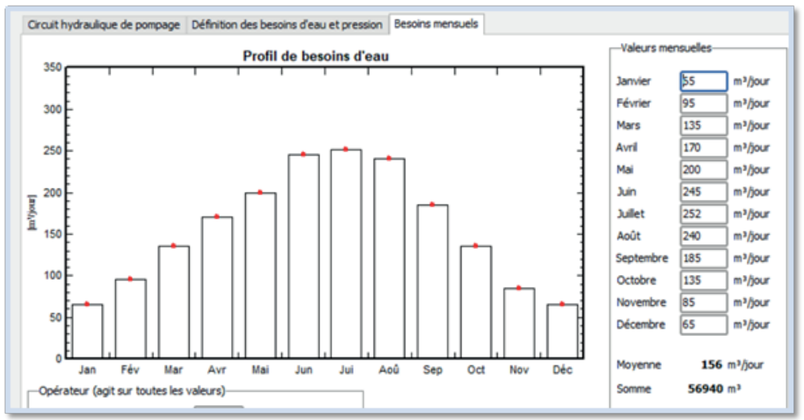
V- ETUDE COMPARATIVE AVEC LE CAS D'EXISTENCE DU BASSIN ET ANALYSE DE LA SITUATION

On suppose que l'exploitation dispose d'un bassin d'une capacité totale de 4000 m3. Les paramètres liés au forage et aux besoins journaliers en eau restent inchangés.

L'existence du bassin de stockage permettrait une conversion du mode de pompage d'eau vers l'option du pompage solaire dans des conditions meilleures et avec un impact positif à plusieurs niveaux :

Technique

Il est possible dans ce cas de prévoir un système de pompage dont la taille est nettement inférieure à celui requis dans le cas précédent.
La moyenne journalière des besoins en eau est donnée dans le tableau suivant :



Le volume d'eau pompé sera nettement réduit sans que cette réduction affecte le taux de satisfaction des besoins durant l'année.

La taille de système dans ce cas sera de **11 KWc** environ

Le bassin permettra une autonomie par rapport au pic des besoins (juillet- août) le bassin de stockage joue ainsi la fonction de régulateur entre l'offre et la demande en eau en particulier pendant la période de haute irrigation. Il offre une autonomie allant jusqu'à 45 jours d'eau d'irrigation.

D'autre part, les contraintes liées à l'adaptation des horaires d'irrigation par rapport aux horaires de pompage d'eau par le solaire sont évitées.

Économique

Le montant de l'investissement sera nettement inférieur à celui nécessaire dans le cas d'une exploitation ne disposant pas de bassin, réduisant ainsi le coût réel du m3 d'eau pompée.

Ressources hydriques et régime d'irrigation

Le fait que le système de pompage solaire n'est pas connecté directement au réseau G.à.G permettra d'éviter les efforts d'adaptation liés à cette connexion, en termes de débit/pression au niveau des tuyauteries et canalisation ainsi qu'une utilisation rationnelle de l'eau d'irrigation.

VI - RECOMMANDATIONS

En conclusion, la conversion d'un régime de pompage conventionnel vers un système de pompage solaire dans une exploitation qui ne dispose pas de bassin de stockage d'eau est possible d'un point de vue technique et technologique, mais elle impose à l'exploitant de procéder à des adaptations nécessaires à plusieurs niveaux, notamment :

- L'adaptation par rapport au régime d'irrigation et les horaires imposés
- Les interventions régulières pour la mise en marche et l'arrêt du système de pompage solaire
- La gestion de l'excédent durant les périodes basse saison

Comme pour le cas du pompage conventionnel, le dimensionnement du réseau et de la pompe se fait sur la base de la période de pointe. Pour remédier à la problématique de l'excès d'eau durant les mois de Novembre à Avril il faut savoir que :

- Durant les mois de novembre à avril les besoins en eau des cultures sont faibles, et par conséquent, il est recommandé d'ajuster la fréquence des irrigations, mais de garder une dose fixe (au lieu d'appliquer 3 irrigations durant les mois de pointe, on se contente d'une irrigation à deux à titre d'exemple). Bien sûr avec un bon suivi des besoins en eau journaliers. Le fait de garder la même dose permettra d'avoir un débit fixe tout le long du cycle d'irrigation et par conséquent optimiser la consommation d'énergie ;
- Dans le cas où le changement de débit s'impose surtout en baisse, l'installation d'un variateur de vitesse (régulateur de fréquence) est très recommandée. Les variateurs de vitesse peuvent fonctionner sur des plages de 0,4 à 45 KW (0.5 à 30 CV). Le variateur de vitesse permettra d'optimiser le fonctionnement de la pompe surtout durant les périodes où les besoins sont faibles ;
- L'installation d'une vanne de décharge permettra aussi d'éviter les problèmes de surpression dans le réseau, en évacuant l'excès d'eau dans le puits ;
- L'installation d'une vanne de régulation de la pression : permettant le contrôle et la fixation de la pression dans la station de tête ;
- L'utilisation des goutteurs autorégulants permet la réduction de l'impact du changement de la pression sur le débit des goutteurs (débit fixe même si la pression change).

L'installation des équipements cités ci-dessus permettra de réduire l'impact du changement des besoins en eau le long de tout le cycle de la plante mais aussi le changement du rayonnement solaire durant la même journée.

D'autre part, pour que cette conversion se déroule dans les meilleures conditions techniques et économiques possibles, il est recommandé de :

- Réaliser une étude technique du projet basé sur des données réelles et exactes des besoins en eau d'irrigation et des connaissances s sur les capacités hydriques du point d'eau (forage ou puits), combiné avec une connaissance plus large sur le potentiel hydrique de la zone et son évolution.
- Prévoir des équipements qui doivent répondre aux critères et normes de qualité reconnus au niveau du Maroc et à l'international.
- Des installations à faire par des entreprises et installateurs formés et reconnus.
- Assurer une gestion rationnelle à moyen et long terme des ressources hydriques avec une vision de durabilité du projet et de l'activité agricole.

FERTIGATION ASSOCIEE AUX RÉSEAUX GOUTTE-À-GOUTTE ALIMENTÉS PAR DES SYSTÈMES DE POMPAGE SOLAIRE

contact@amee.ma
www.amee.ma



gef

amee
Agence Marocaine
pour l'Efficacité Energétique

PNUD