



TRANSFERT DE TECHNOLOGIE EN AGRICULTURE

MAPM/DEFR

• Juin 2009 •

PNTTA

L'utilisation du centre pivot pour l'irrigation

Expérience des Domaines Agricoles au Maroc

Introduction

Le pivot est l'un des systèmes d'irrigation modernes utilisés en agriculture pour mieux valoriser les ressources en eau, particulièrement dans les régions arides de grande culture.

Inventée aux USA à la fin des années 40, cette technologie n'a été développée au moyen orient (Arabie saoudite, Jordanie) et en Afrique du nord (Maroc, Libye, Tunisie, Algérie) qu'à partir des années 70/80.

Au Maroc, les Domaines Agricoles ont été les pionniers dans ce secteur en introduisant à titre d'essai, dès 1980, les premiers pivots dans les régions du Haouz et de la Chaouia.

Le but de ce bulletin est de faire le point sur ce système d'irrigation dans le contexte marocain, à la lumière d'une expérience de vingt cinq ans d'utilisation, aux Domaines Agricoles, dans des conditions agro-climatiques et de production très variées.

Périodes d'installation et régions concernées

Les pivots ont été introduits partout où des progrès significatifs étaient attendus sur la productivité et la rentabilité des terrains grâce à l'irrigation. Les premiers pivots importés à titre d'essai, ont été installés en été 1980 au Domaine Agafay (Haouz) et aux Domaines Jacma et Kouacem (Chaouia). Les autres arri-vages ont concerné le Domaine de Tazeroualt dans le Tadla (1986), Saouda et Chtouka dans le Souss (1986 et 1992), Louata dans la région de Sefrou (1987-1996). Sont venus ensuite les Domaines d'Ouled Cheddad et Khenichet dans Gharb (1991, 1993 et 1994), les Domaines de Souihla et Graoua dans le Haouz (1991, 92 et 98), Tiniguir à Dakhla (1991), Zemamra dans les Doukkala (1993), Douiet et Oued N'Jae à proximité de la ville de Fès (1993), le Lac à proximité de Rabat-Salé (1993), et enfin le Domaine des Rivières à Allal Tazi dans le Gharb (1998) (Tableau 1).

Ces projets recouvrent des contextes très variés de climat, types de sol, ressources en eau et conditions de production:

- le milieu désertique de Dakhla ($P < 50$ mm/an), avec des terrains de «Grara» côtière, de texture argilo-sableuse, hydromorphes, une humidité

relative très forte, des vents fréquents toute la journée et une eau artésienne des aquifères profonds relativement salée ($EC \approx 2,56$ mmhos/cm);

- l'étage climatique aride ($P < 250$ mm/an), du Souss et du Haouz, avec un système de monoculture de céréales de type tout ou rien (forte production en cas d'année pluvieuse et production quasi-nulle en année sèche) et des terrains limoneux profonds à parfois pierreux;

- l'étage climatique semi-aride ($P \approx 350$ mm), du Tadla et de la Chaouia, avec des terrains de qualité médiocre dans le cas de cette étude (sol argilo-calcaire superficiel), irrigués avec l'eau de source ou de barrage collinaire non salée ($EC < 1$ mmhos/cm);

- le Bour favorable ($P \approx 400 - 450$ mm), tels que Louata et le Gharb, avec des terrains de qualité variable (calcaires pour la première zone et limons de Dehs dans la deuxième), et des eaux de barrage de salinité variable (0,8 - 1,4 mmhos/cm);

- le milieu des Merja de Allal Tazi, habituellement réservé à la riziculture, avec des terrains hydromorphes et une nappe très salée proche de la surface ($EC \approx 18$ mmhos/cm);

- les milieux avec des besoins spécifiques en matière d'irrigation, tels que le Domaine Douiet, où il fallait substituer le pivot à l'aspersion mobile dans le but de diminuer le piétinement et d'améliorer la longévité des luzernières.



SOMMAIRE

n° 177

Agronomie

- Taille et structures des pivots installés..... p.1
- Conduite des irrigations et des injections.... p.2
- Qualité des irrigations.....p.3
- Impact du pivot sur la productivité.....p.4
- Investissement et durée de vie du pivot.....p.5
- Rentabilité du pivot..... p.6

Taille et structures des pivots installés

Ce sont les caractéristiques du terrain (forme géométrique, superficie, pente, obstacles,...) qui déterminent le nombre, le type et la taille des pivots à installer. Pour que le projet puisse présenter un intérêt, il doit permettre d'irriguer un maximum de surface et ne laisser que peu de «chutes» de terrain sans irrigation ou pouvant être complétées avec les autres systèmes.

Tableau 1: Répartition des pivots installés par grande région agricole

Région	Type de pivot	Nombre
Dakhla/Souss	CIR	5
Haouz	CIR+1RF	7
Chaouia	CIR	2
Tadla	CIR	4
Rabat-Salé	CIR	2
Gharb	CIR+1RF	9
Fès	CIR	5
Louata	CIR	10
Doukkala	CIR	1

CIR = Circulaire; RF: Rampe frontale

D'une manière générale, lorsque la forme du terrain s'apparente à un grand carré ou un grand cercle, il faut utiliser plutôt des pivots circulaires fixes disposés en lignes ou en étoile. C'est le cas de la majorité des pivots installés aux Domaines Agricoles à travers les différentes régions. Dans certaines circonstances, le terrain peut être un peu plus long que large, ou nettement plus long que large, et on a alors le choix entre l'implantation de pivots mobiles à 2 ou 3 positions et les rampes frontales avec arrosage en aller/retour, rotation interne, ou type hippodrome. C'est le cas du tout premier projet de pivots réalisé à Agafay en 1980, composé de 4 pivots circulaires, d'un pivot tractable et d'une rampe frontale.

D'une manière générale, dans les circonstances normales d'installation, aux Domaines Agricoles, la composition de la structure de pivot couramment adoptée est constituée d'un centre pivot et de travées successives composées chacune de 4 tubes en acier de diamètre égal à 6 pouces et 5/8^{ème} et de longueur L= 13,4 m. Le pivot peut être équipé ou non de porte-à faux de 13,4 ou 19,4 m, ou terminé par un canon de fin de structure. Il faut une structure de 7 travées de 54 m avec porte-à faux faisant un cercle complet, pour irriguer 50 ha, et une structure de 10 travées avec porte-à faux pour irriguer 100 ha.

Dans les terrains de Merja ou très lourds (Allal Tazi, Ouled Cheddad, Douiet) et dans les terrains en forte pente (Louata), des modifications ont été apportées à cette structure de base, en limitant certaines travées à 3 éléments, pour prévenir le patinage et le désalignement du pivot au moment de traverser les zones à risque (ornières, points élevés).

D'une manière générale, dans la plupart des régions, les pivots installés ont des superficies nettes hors porte-à faux de 40 à 60 ha. Les plus grands pivots installés en terrain plat sont les 4 pivots de Tazeroualt (100 ha chacun), et le plus grand pivot installé en forte pente (p>10 %) a été réalisé à Louata (88 ha).

Montage et ses précautions/délai d'installation

Pour un projet d'envergure, il faut une maîtrise parfaite de la technologie des pivots par le personnel amené à s'occuper de l'entretien par la suite. Le montage est justement l'occasion pour la formation de ce personnel, d'autant plus que pour les premiers pivots, l'opération est réalisée avec l'assistance du fabricant.

Ce sont les étapes préalables au montage telles que le levé topographique, l'électrification, la réalisation des forages, des stations de pompage et des canalisations d'amenée, qui souvent prennent du temps. Une fois terminées, la suite consiste à préparer la plate-forme bétonnée devant recevoir le pivot. Les variantes de socles, leur dimensionnement, le rajout ou non d'une seconde plate forme de soutien sont choisies selon que le terrain est léger, lourd, lourd avec une nappe proche de la surface, ou encore en pente raide. Théoriquement, la dalle doit permettre de résister au couple de retournement exercé par la rampe et sa charge en eau. Chaque ancrage doit être en mesure de supporter la moitié du couple de renversement résultant. De valeur plus faible en terrain plat, ce couple peut être très important en cas de forte pente. Aux Domaines Agricoles, l'exemple type est fourni par les pivots montés sur les

'coteaux' de Louata où la dalle principale est renforcée par une seconde dalette arrière, équipée de tendeurs en chaînes réglables avec crochet à œillet, destinée à tenir le pivot lorsqu'il est en descente.

Pour les machines concernées dans la présente expérience, la variante de dalle utilisée pour l'ancrage est de forme carrée avec un côté de 3,81 m et une diagonale de 5,39 m. Les points d'ancrage où sont fixées les tiges sont à 3,09 m. Les semelles correspondantes sont également de forme carrée (75,5 x 75,5 cm) et profondes de 1,20 m. Le reste de la dalle garde une épaisseur de 25 à 40 cm selon les autres contraintes.

Le montage d'un pivot n'est pas une opération difficile. L'expérience montre qu'avec une grue ou un bon tracteur équipé de manutention avant, une équipe de 5 personnes dirigée par un mécanicien (ou de préférence un électromécanicien), on en a la maîtrise totale au bout de 4 à 5 montages consécutifs. Une fois l'équipe rodée, un pivot de 50 ha est en général monté (conduite d'amenée d'eau et courant électrique non compris), en une semaine à 10 jours.

Conduite des irrigations et des injections

Le pilotage de l'irrigation par le pivot peut être réalisé dans la pratique en utilisant divers moyens simples, comme la technique des micros lysimètres empruntée au maraîchage sous serre, le bac type classe A (comme à Souihla), les tensiomètres (O. Cheddad) ou le calcul d'ETP (Douiet). Mais d'une manière générale, aux Domaines Agricoles, c'est surtout le pilotage à vue autour des valeurs de restitu-



Pivot circulaire



Arroseurs



Rampe frontale

Quelques conseils pour le montage d'un pivot

Voici quelques conseils pour éviter les erreurs à une équipe débutante:

- 1- Vérifier qu'il n'y a pas de pièces manquantes, d'erreurs d'envoi ou de pièces endommagées sur la livraison dès réception du matériel;
- 2- Maintenir les ranchers en place durant le déchargement pour éviter les accidents;
- 3- Le socle doit être approprié et construit 10 à 15 jours avant le montage afin qu'il puisse sécher;
- 4- Mesurer la diagonale des quatre tiges d'ancrage, avant de couler le béton, pour s'assurer si elles ne sont pas en fausse équerre;
- 5- S'assurer que le dégagement prévu est bon et qu'il n'y a pas d'obstacles permanents au futur passage des roues (californien, borne d'irrigation, chambre de vannes), le cas échéant déplacer légèrement l'emplacement du centre pivot ou modifier la portée de la travée concernée;
- 6- Respecter scrupuleusement la procédure de déchargement et de ventilation des pièces afin de gagner du temps au moment du montage: (1) armoire, tête de pivot et pièces annexes à proximité de la dalle, (2) tubes alignés bout à bout depuis le centre pivot jusqu'au P-A-F, (3) ensemble roue droite et ensemble roue gauche et tube de traction à l'extrémité de chaque portée, (4) boîte d'engrenage gauche et droite, monture de boîtes, câble électrique et faisceau d'attaches de tours à chaque emplacement approximatif de celles-ci, (5) faisceau de cornières de tirants aux environs du milieu de chaque portée, ...
- 7- Prévoir le matériel et l'outillage nécessaire en nombre suffisant pour permettre à l'équipe de travailler efficacement (tractopelle, remorque agricole, chaînes ou bandes en nylon, avec charge nominale de 3t, compresseur d'air, perceuses à percussion, rallonge clé, et outils à main divers tels que clés combinées, clés à rochet, à molette, marteau, pointeaux, douilles,...);

- 8- Réduire le nombre d'éléments par travée en cas de forte pente ou de Merja avec risques de patinage des roues;
- 9- Monter le pivot en ligne pour en faciliter l'alignement et le raccordement de travées par la suite;
- 10- Eviter que se produisent des compressions au moment de l'assemblage en terrain de vallée;
- 11- Toujours s'assurer que la boulonnerie des étriers, des tirants et des traverses est bien serrée avant de commencer à soulever les travées sur les tours;
- 12- Soulever et manier les portées avec précaution au moment de l'assemblage pour éviter qu'elles pivotent (risque de torsion des cornières et des tubes);
- 13- Ne pas oublier les joints à brides entre les tronçons de tubes et ne pas oublier de déboucher et de tarauder les orifices, les portées encore au sol;
- 14- S'assurer que le plan de busage a été bien respecté et qu'il n'y a pas de sprinklers montés dans le désordre;
- 15- Ajuster correctement les Switch de contrôle des tours;
- 16- Ne brancher les fils d'alimentation électrique au disjoncteur principal qu'une fois le montage du pivot terminé;
- 17- Ne pas oublier l'installation de la mise à la terre et le montage du parafoudre;
- 18- Faire des essais à blanc pour s'assurer que toutes les sécurités montées au niveau de l'armoire de commande fonctionnent bien;
- 19- Vérifier si la pression réelle du pivot en particulier au niveau du P-A-F ou du canon est bien la pression prédéterminée;
- 20- Contrôler le coefficient d'uniformité de l'arrosage et l'efficacité des régulateurs de pression s'il y en a ■.

tion de référence (1 à 7 mm/j), fonction de l'époque de l'année (hiver, printemps, été), de l'étage climatique, de l'exigence et du stade de la culture, qui a été le plus souvent pratiqué.

C'est le temps minimum T pour faire la rotation de la circonférence C de la parcelle (compteur de vitesse du pivot positionné sur 100 %), qui fixe la dose d'eau qu'on peut apporter à la culture. Ce temps T est donné par le rapport entre la circonférence C que la dernière roue doit parcourir et la vitesse V d'avancement de celle-ci. On a :

$$C(m) = 2\pi R \text{ et } T(\text{min}) = C/60V$$

Dans cette égalité, le rayon R est donné par le nombre de travées du pivot et V est déterminé par mesure directe *in situ*; V est influencé surtout par la topographie et la nature du terrain.

Pour une hypothèse de rayon de pivot R = 378 m (soit 7 tours de 54 m sans porte-à-faux ni canon), une hypothèse de vitesse V = 1,9 m/min, le temps d'une révolution T = 20,8 heures.

Connaissant T et le débit de la pompe d (soit par exemple d = 0,8 L/s x 45 ha = 36 L/s ou 130 m³/h), on peut calculer la dose d'irrigation apportée par jour :

$$D(m \text{ ou } (mm/j)) = (d \times T) / \pi R^2 = (130 \times 20,8) / 3,14 \times (378)^2 = 0,006 m = 6 mm$$

Connaissant la dose journalière D et la superficie irriguée par le pivot, il est également possible de calculer le débit de la pompe d, en supposant un fonctionnement durant T/24h :

$$d(m^3/h) = D \times \pi R^2 / T = 0,006 \times 448,656 / 20,8 \approx 130 m^3/h$$

Dans la pratique, il est plus facile d'ajuster la dose d'irrigation pour un pivot sous dimensionné par rapport au débit de la pompe (en diminuant le temps d'irrigation), que pour un grand pivot surdimensionné. En dépit des différences entre régions, au Maroc on est en présence d'un climat globalement très chaud et sec en été, avec une forte demande climatique. Pour les grands pivots dépassant 50-60 ha, il est quasiment impossible d'irriguer correctement le cercle entier en été, avec des structures à base de tubes de diamètre $\phi = 168$ mm. C'est d'ailleurs l'une des difficultés de gestion, avec laquelle il fallait se familiariser aux Domaines Agricoles durant les premières années. Pour pallier cet inconvénient, il faut soit faire des avances d'eau à la culture au stade jeune, en augmentant le stock du sol (solution qui a des limites), ou diminuer la superficie semée de 40-50 %.

Il y a également la solution de changer la pompe (ce qui modifie la carte de busage); mais encore faut-il que la vitesse de l'eau dans les tubes ne dépasse pas 3 m/s afin de préserver leur longévité, particulièrement en cas d'eau riche en sable et abrasive. Avec un pivot de 100 ha, devant recevoir 8 mm/j en plein été, il faut une pompe d'un débit d = 400 m³/h, ce qui porte la vitesse dans les tubes de 168 mm, à environ 5 m/s, et augmente considérablement la consommation énergétique.

D'une manière générale, sous le climat sec de l'été au Maroc, il faut passer à des diamètres de plus de 8 pouces pour pouvoir arroser correctement des cercles complets de plus de 60ha.

Au Maroc, la variabilité de la pluviométrie est très importante d'une année sur l'autre. Comme le but de l'irrigation est d'apporter le complément d'eau manquant à la culture selon l'année, ce complément est lui aussi forcément variable d'une campagne à l'autre. Il varie en général avec le cycle de la culture et en sens inverse de la pluie efficace.

En moyenne, aux Domaines Agricoles, un blé reçoit une dose d'irrigation autour de 450 mm/ha dans les zones très arides où il pleut peu comme le Souss et le Haouz (ex. Souihla), autour de 250 mm dans les zones légèrement plus arrosées comme le Tadla (ex. Tazeroualt), et 100 à 150 mm là où il pleut assez comme le Gharb (O. Cheddad, Khenichet). Une betterave sucrière reçoit autour de 550-600 mm/ha, un maïs de cycle long ou de cycle moyen 600-650 mm/ha (Tableau 2).

Le modèle empirique global reliant le rendement Rdt en blé (qx/ha) à la dose d'irrigation apportée par le pivot D (mm) est :

$$Rdt = 10,6 \ln(D) + 1,5$$

Qualité des irrigations et des injections

Comme pour les autres systèmes (aspersion, gaine, goutte à goutte), la qualité de l'irrigation d'un pivot dépend entre autres, de la qualité de l'étude hydraulique et du plan de busage proposé par le fournisseur.

Que l'étude des pivots soit réalisée par le fournisseur lui-même (projet clé en main), ou par l'utilisateur, il faut des données fiables sur les caractéristiques du terrain (plat, pente), la structure de l'appareil (longueur, distance entre cannes) et les données hydrauliques (débit, pression) pour optimiser le plan de busage.

La formule de calcul du besoin en pression totale Pt, au niveau de la station de pompage, est donnée par la somme des besoins en pressions partielles de l'aval vers l'amont, soit :

$$Pt = (Pr + Pc + Hcm + Hg + Pca + Ha)$$

Avec Pr représentant la pression résiduelle en bout d'appareil, Pc la perte de charge dans le pivot, Hcm la hauteur de la colonne montante dalle/tête de pivot, Hg la dénivellée dalle/station de pompage, Pca la perte de charge dans la canalisation d'amenée, Ha la hauteur d'aspiration + la perte de charge correspondante.

Ce besoin en pression est à son minimum ($\approx 3,5 - 4$ bars) pour un pivot installé en terrain plat (Hg = 0), avec la source en eau proche du centre pivot (Pca faible), et monté sans canon (Pr requise faible), et à son maximum pour un pivot très éloigné de la source d'eau et installé en hauteur comme à Louata (amenée de plus de 6 km et élévation sur un peu plus de 300 m pour le pivot le plus excentré).

Dans les cas particuliers de Dakhla et de Douiet, ce besoin en pression est fourni par les forages artésiens. Les pivots ne sont pas équipés de station de pompage mais uniquement de petits groupes électrogènes pour la propulsion.

La perte de charge dans le pivot est généralement calculée selon la formule de Hazen et William, soit :

$$I = 1,148 \times 10^{11} \times [Q/W]^{1,852} \times L/[D]^{4,87}$$

Avec I représentant la perte de charge (m) sur l'ensemble des travées du pivot de longueur L (m), D le diamètre intérieur des tubes (mm), Q le débit (m³/h), W le coefficient de rugosité interne (soit 135 pour un appareil neuf et 125 après 5 ans).

Le respect du plan de busage au moment du montage (respect des numéros d'ordre Centre → porte-à-faux) est une condition de l'uniformité d'arrosage. D'autre part, une fois ce busage installé, aucun changement ne doit être apporté à la structure du pivot et aux données

Tableau 2: Doses d'irrigation apportées par le pivot sur les différentes cultures aux Domaines agricoles

Domaine	Blé tendre	Betterave	Maïs cycle long	Maïs cycle court
Tazeroualt	234	694	----	----
O. Cheddad	167	569	605	605
Souihla	470	----	----	660
Khenichet	100	200	----	----



Equipement de chimigation/fertigation



Commande à distance des pivots



Pivot tractable



Fixation du pivot



Pivot renversé par le vent



Kansas (USA)

hydrauliques (pression, débit) pour lesquelles il a été calculé, sinon il s'éloignera de l'optimum recherché. De même, l'uniformité d'arrosage doit en être contrôlée si le pivot a été déplacé ailleurs ou s'il a fait l'objet d'une extension.

Le cas le plus simple dans l'élaboration d'un busage est celui où l'on a affaire à un terrain plat, à un matériel de refoulement neuf et bien calibré et à des données hydrauliques constantes, tandis que le cas de difficulté maximale est celui où l'appareil évolue sur une double pente, comme à Louata, ce qui limite l'efficacité des régulateurs de pression. L'uniformité d'arrosage est parfois fortement affectée par le bouchage (algues, boue, engrais de mauvaise qualité) ou par des modifications du diamètre des orifices des asperseurs suite à l'utilisation d'eau renfermant du sable ou d'emploi à tort, de fil de fer pour les déboucher. Le même constat est fait, en présence de motopompe en mauvais état ne répondant plus aux normes débit/pression (ailettes de la roue usées, baisse du rendement du moteur thermique). Dans certaines circonstances, la mauvaise répartition relative de l'eau est le fait d'une grave fuite au niveau de quelques cannes ou buses fortement abîmées. Ce coefficient (Tableau 3) est globalement faible par rapport à la valeur de référence de 85 %, ce qui semble normal sur du vieux matériel après autant d'années d'utilisation.

Les Domaines Agricoles ont longtemps utilisé le pivot pour injecter les engrais et les pesticides. D'une manière générale, les résultats obtenus avec les engrais ne soulèvent aucun problème, pour autant que le calcul de dose et le choix des moments d'injection soient bien respectés. Du fait des fortes doses d'eau qu'il permet, on peut injecter avec le pivot aussi bien les produits à forte solubilité comme l'azote que les produits à moyennes ou faible solubilité comme le MAP, le DAP, le KCl ou le K₂SO₄.

C'est avec les pesticides que les résultats d'efficacité étaient mitigés, que ce soit des herbicides, des insecticides ou des fongicides. L'injection directe dans l'eau d'arrosage a été d'ailleurs abandonnée quelques années plus tard au profit du traitement usuel par le tracteur ou l'avion.

Impact du pivot sur le système de culture et la productivité

L'introduction du pivot aux Domaines Agricoles a apporté des changements profonds aux systèmes de culture et de production existants: (1) système de monoculture d'orge ou de blé des zones arides et semi-arides comme le Souss, le Haouz, le Tadla, ... ayant cédé sa place aux cultures irriguées comme la betterave, le colza, l'ail, ... (2) progrès spectaculaire sur la productivité, (3) introduction des cultures dérobes d'été comme le maïs ensilage, (4) introduction de l'élevage intensif, ...

Aux Domaines Agricoles, l'effet améliorant de l'irrigation par le pivot sur la productivité est incontestable aussi bien dans l'absolu que par rapport à l'irrigation gravitaire.

Cet effet est fonction de nombreux facteurs

dont l'étage climatique, le type de sol et la conduite technique. Mais d'une manière générale, la productivité sous pivot reste meilleure et comparable à celle d'une bonne aspersion mobile.

Sur les céréales à paille, la productivité courante est de 50-60 qx/ha, tandis que la productivité maximale observée a été de 80 qx/ha (Tableau 4). Sur betterave à sucre, la productivité varie de 50 à 70 t alors que la productivité maximale observée est de 90 T. Pour le maïs grain, la productivité tourne autour de 80-120 qx/ha et le maximum observé à Ouled Cheddad a été de 150 qx/ha. Sur maïs ensilage, le rendement tourne autour de 40-60 t/ha et le maximum observé a été de 65 t/ha.

En terres calcaires, l'effet pivot l'emporte amplement sur la mauvaise qualité du sol. C'est le cas de Tazeroualt qui chaque année donne les meilleurs rendements en betterave malgré un terrain argilo-calcaire hétérogène et peu profond. Le même constat a été fait à Chtouka (terrain caillouteux), et à Louata (terrain calcaire en pente).

C'est à Dakhla où l'étude climatique concluait au départ à des résultats spectaculaires sur céréales (possibilité de 2 récoltes/an d'après les bilans de sommes de températures), qu'on a obtenu paradoxalement la réponse la plus faible à l'irrigation par le pivot (Rdt <10 qx/ha), du fait de l'hydromorphie du sol et de l'excès de sel.

Réactions des sols

Dans les années 85, les types de spray utilisés sur le pivot n'étaient pas réellement adaptés aux terres fragiles comme les limons de dépôt récent de Souihla et les limons de Saouda. A l'état sec, le sol réagit à la première irrigation par la dégradation de la structure et la formation par plages, de croûte de battance, souvent gênante pour la levée des céréales. Pour en atténuer les effets, faute de mieux, il a fallu soit opérer des transformations artisanales sur l'asperseur pour en élargir le rayon d'impact, soit irriguer sans s'arrêter et pivot à vitesse max, pour empêcher la croûte de se former.

Dans les zones arides, le plus grand risque lié à l'irrigation, est incontestablement celui de la salinisation des sols à long terme. Le tableau 5, présente un extrait des constats réalisés dans le cadre de la présente étude en utilisant la conductivité électrique (EC) et le sodium échangeable (Na éch.), comme critères d'appréciation pratique de la salinisation.

Eu égard aux normes pratiques utilisées au Maroc pour l'interprétation de la salinité, un sol n'est jugé salé qu'à partir d'une valeur de 0,50 mmhos/cm (extrait 1/5). Sur les sols calcaires et poreux de Louata, on ne note aucun effet de salinisation sur le pivot 9 monté en 1992. Pour les pivots 1 et 2, installés depuis dix huit ans, les sols ont réagi à l'irrigation par un certain enrichissement modéré en sodium.

C'est dans les sols Dehs de texture lourde de O. Cheddad, qu'un certain effet net de l'irrigation sur la salinité du sol apparaît (EC respectifs de 0,34 et 0,50 contre 0,25 en parcelle non irriguée et Na respectifs de 504 et 629 contre 180 et 285 ppm dans les sols témoins).

Tableau 4: Rendements réalisés sous pivot aux Domaines Agricoles

Domaine	Rendement max. /ha	Rendement moyen/ha
Blé tendre*	80	50 - 60
Betterave**	90	50 - 70
Maïs grain*	150	80 - 120
Maïs ensilage**	65	40 - 60

*: quintaux; **: tonnes.



Sraghna (Maroc)



Berrechid (Maroc)

La forte salinité n'est pas forcément la conséquence de l'irrigation par le pivot, elle peut être déjà présente dans le sol au moment de l'installation du système (cas de Souihla dans le Haouz ou de Dakhla au sud), ou la conséquence d'une remontée par capillarité ou par suite des inondations, d'une nappe sous jacente très saumâtre (EC = 18 mmhos/cm) comme dans le cas des Rivières dans le Gharb.

Investissement

C'est l'importance de la superficie équipable qui détermine en première approximation l'investissement global à engager dans un projet de pivots. Le coût du projet peut être influencé par de nombreux facteurs parmi lesquels la configuration du terrain (d'un seul tenant ou morcelé, biscomu ou non, plat ou en pente, ...), l'éloignement de la source d'eau (coût élevé du PVC et de la pompe), de l'électricité (coût de la ligne et frais des peines et soins à verser à l'ONE), la présence d'obstacles physiques à déplacer (bâtiments, pistes publiques, ...).

Ramené à l'ha, le coût le moins cher est obtenu lorsque le projet est réalisé sur de grandes étendues d'un seul tenant (économie d'échelle), sans obstacles intrinsèques (pas d'aménagement préalable), avec la source d'eau et d'électricité à côté. Et le coût le plus élevé correspond le plus souvent à des projets réalisés sur des terrains avec d'importantes contraintes. C'est l'exemple du projet Tazeroualt dans le Tadla où il a été nécessaire de déplacer la ligne de haute tension (surcoût de 20%) ou de celui de Louata où il a fallu construire une exhaure très coûteuse avec des conduites d'amenée sur plusieurs km, réalisées en partie avec de l'acier, en plus d'une série de bassins de régulation et de transfert disposés en étages (+ 35 % de la valeur initiale du projet).

Dans les années 80-85, un pivot de 50 ha (pompage et conduite non compris) coûtait environ 500.000 à 600.000 Dh, soit environ 10.000 Dh/ha. Ce coût d'investissement a tout naturellement évolué de façon sensible

Tableau 3: Coefficient d'uniformité d'arrosage par le pivot dans différentes conditions d'installation

	O. Cheddad	Louata	Souihla	Douiet	Khenichet
Longueur	402 et 422	409 et 463	268	289,434 et 674	400
Age (an)	12	13 et 18	13	11	11
CU (%)	75 et 85	79 et 74	82	74, 79 et 84	81

depuis 25 ans. Le tableau 6 présente un exemple d'offre récente faite à une entreprise du nord du Maroc en vue d'équiper une ferme de 450 ha, spécialisée dans le maïs ensilage et les autres cultures fourragères.

Dans ce projet, le meilleur arrangement de matériel proposé par le fournisseur consulté, compte tenu des contraintes intrinsèques de la ferme (1 route en longueur, 3 pistes + un talweg en largeur) est celui de :

- 5 pivots fixes plein cercle pour irriguer 182 ha (3 pivots de 42 ha chacun + 2 pivots de 28 ha);
- 1 pivot secteur (un demi-cercle) pour irriguer 21 ha;
- 16 enrouleurs + 1 petite rampe basse pression pour irriguer les 175 ha de «chutes» échappant aux pivots.

Ce qui correspond à une superficie équipable de 84 % pour un investissement total de 6.311.900 et à un coût/ha moyen de 16.610 Dh.

Si on met de côté les nombreux commentaires techniques défavorables que suscite ce projet (armada d'enrouleurs, 15 % de la superficie restée non irriguée, gestion de matériel devant exiger beaucoup de main d'œuvre, ...), en termes d'investissement, le pivot revient nettement moins cher que l'aspersion intégrale (40.000 Dh/ha) ou le goutte à goutte monté en lignes jumelées (35.000 Dh/ha) et plus cher que l'aspersion mobile (9.000 Dh/ha).

Durée de vie d'un pivot et entretien

Ce sont les conditions générales de climat de la zone, les conditions d'utilisation et d'entretien du pivot qui déterminent sa longévité. D'après la présente étude, la durée de vie objective du pivot dans le contexte marocain, est de 10 à 15 ans. Passée cette limite, le pivot est encore utilisable durant quelques années, mais au prix de pannes préjudiciables à la production et d'un coût d'entretien/ réparation élevé.

Les organes les plus fragiles d'un pivot sont paradoxalement les tubes en acier, qui sont en contact avec l'eau d'irrigation et l'injection des engrais et des pesticides, suivis ensuite des moto-réducteurs. De toutes les régions du Maroc concernées par la présente étude, c'est dans les conditions corrosives de Dakhla (humidité, vent de sable, eau artésienne chargée en soufre), que les tubes et la structure ont montré une moins bonne longévité. Le même constat est également fait dans les zones où le pivot est régulièrement utilisé pour l'injection des engrais azotés et phosphatés (en particulier l'ammonitrate et le MAP).

L'une des causes graves qui peuvent écourter la vie d'un pivot, c'est la fréquence des accidents et de chute de la machine par terre, par suite du désalignement lors de la descente en forte pente ou dans les ornières, particulièrement par temps venté. L'âge de la machine, l'état des tubes (corrosion) de la triangulation de soutien, la longueur du pivot lui-même et sa charge en eau, sa position par rapport à la direction de la tempête, sont autant de facteurs aggravants des risques d'accidents.

Le nombre de tubes pouvant être abîmés ou tordus peut être de 1 à 3. Ils sont généralement non réparables et non récupérables.

Tableau 5 : Salinité des sols sous irrigation par pivot (horizon 0-30 cm)

Louata				
N°	Pivot 1	Pivot 2	Pivot 9	Témoin
Texture du sol	Calcaro-argilo-limoneuse			
EC (mmhos/cm)	0,19	0,20	0,17	0,20
Na (ppm)	148	148	47	61
O. Cheddad				
N°	Pivot 1	Pivot 2	Témoin 1	Témoin 2
Texture du sol	Argilo-limoneuse			
EC (mmhos/cm)	0,34	0,50	0,25	0,25
Na (ppm)	504	629	180	285

Comme il faut du temps pour remettre en état un pivot accidenté, l'impact sur les cultures d'été comme le maïs, peut être énorme, particulièrement en sol à faible capacité de rétention et si l'arrêt de l'irrigation coïncide avec la floraison.

En général, il est recommandé d'arrêter le pivot par vent très fort pour éviter sa chute, d'autant plus que la qualité de l'arrosage est mauvaise (évaporation, irrégularité, verse mécanique des céréales sous le poids de l'eau). A la fin de chaque récolte, le pivot doit également être orienté dos au vent dominant et fixé aux buses d'assainissement s'il y en a, au moyen de cordes.

Comme entretien préventif régulier sur la machine, il faut se plier au programme routinier du fabricant. Ce programme assez simple consiste entre autres, chaque année, à vidanger la structure des dépôts de boue en enlevant le bouchon du porte-à faux, à vérifier l'état général de la station de pompage (grilles, filtres, pompes, accessoires), à graisser le joint d'articulation du pivot, à contrôler l'état et la pression des pneus, les arbres de transmission et les protège-cardans, purger les boîtes d'engrenage pour en éliminer l'eau des condensations et faire la mise à niveau d'huile, changer les arroseurs défectueux, contrôler le tableau électrique et la boulonnerie. Un boulon non serré est un point de cisaillement garanti source d'accident, en particulier dans les terrains en pente.

D'autre part, au bout de chaque 2 ou 3 campagnes, vidanger les motoréducteurs et remettre de l'huile neuve. La capacité de chaque tour est d'environ 3 gallons (11,36 L) pour la boîte d'engrenage du moteur et les 2 boîtes d'engrenages des deux roues.

Rentabilité du système

On peut, pour cette analyse se servir de la notion de bénéfice marginal, empruntée à la microéconomie et souvent utilisée pour étudier l'impact économique de l'emploi des intrants en agriculture. On a :

$$P_1 \Delta Y = P_2 \Delta X$$

Où ΔY désigne l'accroissement de production (par ex. de blé) obtenu pour chaque accroissement de consommation d'intrant ΔX (ici l'eau), P_1 le prix unitaire du blé et P_2 celui de l'eau. Le principe de l'approche consiste à continuer de produire tant que le bénéfice marginal $P_1 \Delta Y$ reste supérieur au coût marginal $P_2 \Delta X$ et d'arrêter la production quand $P_1 \Delta Y$ devient égal à $P_2 \Delta X$, sinon on fait de la perte marginale.

En général, la réaction de la production agricole à un usage croissant des intrants est de type moins que proportionnel.

Au Maroc, on est en présence d'un climat à



dominante globalement aride, avec une sécheresse estivale absolue sur l'ensemble du pays, et des sécheresses spécifiques d'automne /hiver/printemps croissantes sur l'axe nord/sud du pays (P autour de 750 mm à Larache; 400 mm à Rabat, 200 mm dans le Souss et 50 mm à Dakhla). Dans ces circonstances, toutes choses égales ($P_1 \Delta Y$ et P_2 constants), le bénéfice marginal serait tout naturellement à sa valeur plafond dans les zones bien arrosées du nord (Gharb, Loukkos) où un appoint de 50 - 100 mm suffit parfois pour obtenir des gains spectaculaires de productivité en année sèche, et à sa valeur plancher dans les zones très arides du sud (Souss, Haouz), où il faut irriguer depuis le semis jusqu'à la récolte.

Dans certaines circonstances, le bénéfice marginal peut être fortement grevé à cause du coût exorbitant des installations, de pompage ou des deux à la fois. C'est l'exemple du grand projet du Domaine Louata, sis en altitude, où la batterie de pivots les plus éloignés ont été installés à des côtes dépassant 200-300 m par rapport au point de pompage.

D'une manière générale, dans les systèmes de culture de type tout ou rien des zones arides, comme le Maroc, on peut démontrer que l'irrigation au pivot reste très bénéficiaire, même en année sèche avec une forte dose d'appoint.

L'illustration est présentée dans le tableau 7, en considérant la culture du blé tendre, un gain de productivité ΔY de 20 qx, le prix de vente P_1 de 350 Dh/ql, un coût fixe des installations de 2.500/ha/an, un prix de l'énergie de 1,00 Dh/kW et un prix de l'eau de 0,25 Dh/m³. Le calcul est en outre réalisé, selon l'axe sécheresse (dose d'eau variant de 500 à 3000 m³, ligne 1) et l'axe élévation ou coût énergétique (HMT en mCE variant de 50 à 300m, colonne 1).

Tableau 6: Exemple d'offre récente d'équipement par pivots et enrouleurs

Type d'équipement	Nombre	Superficie (ha)	Coût total	Coût/ha (Dh)
Pivots circulaires	6	203	2.934.000,00	14.453,00
Enrouleurs	17	177	3.377.900,00	19.084,18
Total	22	380	6.311.900,00	16.610,26

Dans ce tableau, plusieurs familles de courbes d'iso-profits apparaissent:

- la famille > 4000 Dh/ha simulant les années humides à faible appoint d'irrigation (50 - 100 mm);
- la famille intermédiaire 3500-3000 Dh/ha simulant les campagnes sèches demandant un appoint conséquent en irrigation sur une forte HMT;
- la famille < 3000 Dh/ha simulant les cas typiquement secs avec une très forte HMT.

D'autre part, ces chiffres suggèrent qu'il y a un intérêt de continuer d'irriguer même dans les cas d'extrême sécheresse et de pompage sur d'importantes hauteurs comme à Louata. Quoi que cette notion de bénéfice marginal présente des limites, puisqu'on peut paraître gagnant au sens du bénéfice marginal et perdre de l'argent au sens du bilan comptable. C'est le cas où la production totale est égale à la production marginale, avec un bénéfice marginal ne couvrant pas les autres frais de production (zone désertique, culture dérobée de plein été).

Discussion et conclusion

Quelle que soit l'échelle de travail considérée (région, ferme, parcelle,...), un projet d'irrigation, c'est d'abord un problème d'optimisation du choix du matériel, en vue d'une meilleure efficacité technique et économique globale. Pour fixer ce choix de façon objective, l'idéal, quand on dispose des compétences au sein de l'entreprise, serait de réaliser l'étude du projet soi-même ou la faire faire à un bureau d'étude non motivé par une finalité commerciale.

L'étude est multicritères et fait appel à l'information sur la ressource en eau, sa qualité, son coût, sur le type de sol, de parcellaire, sa topographie, le type de culture, ses exigences, ... L'étude peut conclure indifféremment en faveur soit d'un équipement exclusivement de pivots, d'aspersion, d'enrouleurs, de goutte à goutte, ou encore en faveur d'un projet mixte alliant à la fois tout ou partie de ces matériels. C'est incontestable, le Maroc est un pays globalement aride où l'avenir est plutôt à l'irrigation localisée. Mais, il va sans dire qu'on ne peut tout reconvertir en goutte à goutte malgré les avantages de ce système. Sur le plan agricole, le Maroc est une véritable mosaïque, où chaque système d'irrigation justifie sa place.

En ce qui concerne le pivot, l'expérience accumulée sur le terrain, durant plus d'un quart de siècle, entre autres par les Domaines Agricoles, permet aujourd'hui de fournir beaucoup d'éléments objectifs en vue de mieux raisonner le choix et la gestion de ce système.

Considéré sous l'angle de l'efficacité hydrique et agronomique, à l'évidence, un pivot doit être plutôt comparé à l'aspersion. Il consomme plus d'eau que le goutte à goutte. De ce fait, il semble mieux convenir aux régions où il y a un peu plus de ressources en eau (centre et nord du Maroc) qu'aux régions du sud, connues pour leurs disponibilités hydriques très limitées (Souss, Haouz, Tadla).

Traité sous l'angle de la flexibilité d'installation, du fait de sa structure métallique solidaire, le pivot est plutôt fait pour un parcellaire de configuration proche des formes géométriques usuelles (carré, rectangle, cercle,...), non traversé par des obstacles permanents tels que des ravins, pylônes électriques, pistes publiques,... Malgré les progrès réalisés par les fabricants autour de versions de base (pivot déplaçable,

rampe frontale, canon avec fonctionnement intermittent,...), le système n'a pas la souplesse de l'équipement sur mesure qu'offre l'aspersion classique ou le goutte à goutte dans les terrains à contrainte irrémédiable.

Le choix d'un système d'irrigation doit aller de pair avec celui de la culture. Le pivot convient mieux aux grandes cultures, aux cultures fourragères, qu'au maraîchage et aux arbres fruitiers.

Vis-à-vis des exigences en main d'œuvre, le pivot garde une certaine supériorité même pour des espèces semées en ligne comme le maïs et la betterave. En grande culture, les rampes de goutte à goutte ne peuvent rester en place une fois pour toute comme en arboriculture. Elles doivent être réinstallées et retirées manuellement à l'occasion de chaque nouvelle culture, ce qui fait paradoxalement de l'irrigation localisée, un système qui valorise moins bien l'automatisme et augmente les charges en main d'œuvre que le pivot.

Aujourd'hui, avec les nouvelles générations de pivots, un seul opérateur suffit pour manœuvrer et surveiller à distance, un grand nombre d'appareils à la fois, pourvu que l'installation soit dotée de dispositifs de contrôle et de surveillance requis. Il peut à partir de son bureau, visualiser sur écran graphique, la position de l'appareil, son sens d'avancement, sa vitesse, la dose d'irrigation, la pression, la tension électrique, et estimer la durée approximative d'une rotation, en plus des autres options.

La préférence pour le pivot peut être parfois dictée par la qualité physique de l'eau. C'est le cas des eaux boueuses telles que l'eau du Sebou, ou à forte charge algale, telle que l'eau de surface des canaux de l'ORMVA du Loukkos où le pivot et l'aspersion d'une manière générale, sont beaucoup moins sensibles aux risques de bouchage que le goutte à goutte. En grande culture, c'est la solution pour un producteur, non disposé à investir dans la décantation, la filtration et le traitement de l'eau qu'exige le goutte à goutte dans ces circonstances.

Dans le Gharb, l'un des problèmes majeurs à la reconversion de l'irrigation gravitaire en goutte à goutte, sera de trouver une solution économique originale pour filtrer ces eaux boueuses. Les options sont nombreuses (décantation dans le barrage de garde actuel, par transit dans les fossés d'assainissement, décantation personnalisée,...) mais la région manque de recul sur le sujet et son expérience en matière de goutte à goutte avec les eaux de cette catégorie est encore fragmentaire.

Le recours au pivot est parfois la conséquence d'un comportement particulier du sol vis-à-vis des outils de préparation. Le cas d'école est donné par les Dehs de Moghrane dans le Gharb, où à l'état sec, il est très difficile d'obtenir un lit de semence fin, en multipliant les passages d'outils de reprise. Irrigué au goutte à goutte, le maïs d'été donne sur ces terres de mauvais résultats de germination/levée, malgré le roulage, faute de diffusion latérale suffisante de l'eau entre les mottes. Dans cette circonstance, en plus d'être un système d'irrigation, le pivot et l'aspersion d'une manière générale, est un outil pour affiner le lit de semence, en profitant de l'énergie cinétique de l'eau, sans oublier l'avantage de gain de temps, d'économie de carburant et de productivité meilleure.

En termes de coût d'investissement, seule l'aspersion déplaçable (réservée aux petits projets familiaux) est plus compétitive à l'égard d'une installation de pivot. Ce dernier

Tableau 7: Bénéfice marginal de l'irrigation par le pivot en fonction de la dose d'appoint (m³/ha) et de la hauteur d'élévation de l'eau (HMT en mCE)

	500 m ³ →	1000	1500	2000	3000
50 m	4307	4114	3921	3728	3342
100↓	4114	3978	3717	3455	2933
150	4171	3841	3512	3183	2524
200	4103	3705	3308	2911	2115
300	3966	3433	2899	2366	1298

est par contre beaucoup moins cher que le goutte à goutte ou l'aspersion intégrale, à la quelle il doit être objectivement comparée.

Vis-à-vis de la consommation en énergie, comme pour les autres systèmes, c'est lorsque l'eau est pompée dans des aquifères profonds comme dans le Souss, ou élevée en escalier sur des hauteurs importantes comme à Louata, que le coût énergétique est le plus élevé. Ceci exige, pour mieux valoriser le m³ utilisé, le choix de cultures très rentables et moins consommatrices d'eau.

Enfin, un projet de pivots est en principe réalisé pour durer. Il ne saurait être question de son démantèlement quelques années plus tard que si, entre temps, sont apparues sur le marché des produits agricoles plus rentables, non adaptés à l'irrigation par le pivot et justifiant ce brusque changement de décision (nouvelle variété d'agrumes, de rosacées,...) ■.



Algérie



Arabie Saoudite



France



Espagne

Aït Houssa A⁽¹⁾, Bouslama A⁽²⁾, Baraka M⁽³⁾, El Midaoui M⁽¹⁾, Benbella M⁽¹⁾

⁽¹⁾Ecole Nationale d'Agriculture de Meknès, ⁽²⁾ex Ingénieur stagiaire aux Domaines Agricoles, ⁽³⁾ex. Chef d'Atelier aux Domaines Agricoles