

PRÉVISION DE LA SALINISATION DES SOLS IRRIGUÉS PAR MODELE DE SIMULATION NUMÉRIQUE

PREVISIÓN DE LA SALINIZACIÓN DE LOS SUELOS DE REGADÍO CON EL USO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN NUMÉRICA

M. RIEU

RÉSUMÉ

Une parcelle cultivée en betterave à sucre, située dans la haute vallée de la Medjerdah (Tunisie) a été étudiée. Les conditions climatiques de la région ($P = 430\text{mm}$, $ETP = 1330\text{mm}$) rendent l'irrigation indispensable. Deux eaux sont disponibles à cet effet. L'eau de l'oued Medjerdah ($E.C. = 4,6 \text{ ms}$; $SAR = 13,2$) et l'eau de la retenue Bou Heurtma ($E.C. = 0,95 \text{ ms}$; $SAR = 1,6$).

Un modèle de calcul a été utilisé afin de préciser par anticipation le danger de salinisation du sol irrigué avec ces eaux. La validité du modèle a été vérifiée grâce à la simulation fidèle d'un épisode d'irrigation suivi de la redistribution de l'eau pendant 10 jours, mesuré en détail sur le terrain.

On a ensuite procédé à la simulation de l'évolution hydrique et chimique du sol pendant 365 jours consécutifs, comprenant la culture de la betterave.

Les irrigations distribuées en 18 apports d'eau représentent 540 mm. Les calculs ont été répétés pour l'une et l'autre eau d'irrigation.

En ce qui concerne l'évolution des stocks d'eau, on constate que les irrigations satisfont aux besoins en eau de la culture (ETR calculée: 759 mm au lieu de 770 mm optimaux). Le sol étant desséché au

moment du semis (fin de l'été), la majeure partie des pluies d'hiver est stockée dans le sol au lieu de lessiver les sols vers la nappe. Pour l'année, le drainage n'atteint pas 10 % de l'apport.

Dans le cas de l'irrigation avec l'eau de Bou Heurtma, la salinité de la solution du sol diminue avec les pluies d'hiver (- 15 à 90% selon la profondeur). Une resalinisation se produit en été entre 30 et 60 cm (+ 30%) tandis que le reste du profil se maintient à un niveau de salinité inférieur au niveau initial. Le taux de sodium échangeable suit une évolution semblable.

Dans le cas de l'irrigation avec l'eau de l'oued Merdjerdah, seuls les niveaux de surface sont lessivés par les pluies d'hiver (- 60 à 80%) tandis que le profil est légèrement salinisé à moyenne profondeur (+ 4 à 6%). Les irrigations d'été entraînent une forte salinisation (40 à 500 %) dans les 75 premiers cm du sol, accompagnée d'une alcalinisation rapide et de précipitation de gypse, initialement absent. La profondeur se maintient à un niveau de salinité inférieur au niveau initial.

Les conditions d'utilisation et d'irrigation du sol étudié étant fixées, la simulation conduit aux prévisions suivantes:

- En l'absence d'une pré-irrigation suffisante, les pluies d'hiver permettent seulement une dilution et redistribution du sel dans le sol.
- Les irrigations d'été avec l'eau de Bou Heurtma ne provoquent pas de salinisation importante.
- Les irrigations d'été avec l'eau de la Medjerdah entraînent une salinisation et alcalinisation vigoureuses dans la zone racinaire.

RESUMEN

Se estudio una parcela cultivada con remolacha, ubicada en el valle alto del río Medjerdah (Tunez). En esta zona las condiciones climáticas ($P = 430$ mm, $ETP = 1330$ mm) hacen del riego una necesidad. Dos aguas se pueden aprovechar con tal objeto: el agua del río

(EC = 4,6 ms; SAR = 13,2) y la de la represa de Bou Heurtma (EC = 0,95ms; SAR = 1,6).

Se usó un modelo de cálculo con el objeto de precisar con anticipación el peligro de salinización del suelo ante la aplicación del riego, usando dichas aguas.

Se comprobó la validez del modelo con una fiel simulación de un episodio de riego y posterior redistribución del agua durante 10 días, después de observar detalladamente estos procesos en el campo.

Se procedió entonces a la simulación de la evolución hídrica y química del suelo durante 365 días seguidos, incluyendo el cultivo de remolacha. El riego, distribuido en 18 aportes de agua, totaliza 540 mm. El cálculo fue repetido para ambas aguas de riego.

En cuanto al contenido de agua del suelo, se verifica que las irrigaciones alcanzan a cubrir las necesidades hídricas del cultivo (ETR calculado del cultivo = 759 mm contra 770 mm óptimos). Estando el suelo muy seco en la época de siembra (fin del verano), la mayor parte de las lluvias del invierno se acumulan en el perfil sin lixiviar las sales hacia el manto freático. El drenaje total queda inferior al 10% de los aportes de agua.

En el caso de usar el agua de Bou Heurtma, la salinidad de la solución del suelo disminuye con las lluvias del invierno (-15 a 90% según la profundidad). En el verano la salinización reaparece solamente entre 30 y 60 cm (+30%) mientras las demás partes del perfil permanecen con un contenido de sales inferior al inicial. Una evolución similar afecta al contenido de sodio intercambiable.

Usando el agua del río Medjerda, solo los niveles más superficiales son lixiviados por las precipitaciones del invierno (-60 a 80%) mientras que la salinidad aumenta levemente (+4 a 6%) en la parte mediana del perfil. Con las irrigaciones del verano, se observa en los primeros 75 cm, una salinización intensa (+40 a 500%) junto a una alcalinización rápida y precipitación de yeso, estando esta sal ausente en el estado inicial. También en este caso, el contenido de sales permanece inferior al inicial en la profundidad del suelo.

Fijadas las condiciones de cultivo y de riego del suelo estudiado, la simulación autoriza las previsiones siguientes:

- Sin una pre-irrigación suficiente, las precipitaciones del invierno permiten solo una dilución y redistribución de las sales en el perfil.

- El riego de verano con el agua de Bou Heurtma no provoca una salinización de importancia.

- El riego de verano con el agua del rio Medjerdah ocasiona una salinización y alcalinización intensas en la zona de las raíces del cultivo.

Etude réalisée à Tunis en 1983-1984 pour le compte de la division des sols du Ministère de l'Agriculture de Tunisie, avec la participation de N. Benzina et R. Ochi

Estudio realizado en Tunez en 1983-1984 al pedido de la division de suelos del Ministerio de Agricultura, con la participacion de N. Benzina y R. Ochi

INTRODUCTION

Depuis plus de 2000 ans, la vallée de la Medjerdah (Fig.1), au nord de la Tunisie, est le lieu d'une agriculture intense. Le climat de cette région est caractérisé par une forte évaporation: 1330 mm (moyenne 1974-1982) que 430 mm de pluies (moyenne 1972-1981) ne peuvent compenser. De plus, les précipitations sont concentrées entre octobre et mars; il ne pleut pratiquement pas pendant les mois d'été alors que l'évaporation est la plus forte (Fig.2).

Dans de telles conditions, l'irrigation est indispensable. Mais elle n'est pas sans risques: pour peu que les eaux soient salées, les sols sont enrichis en sels et leur potentiel agronomique est compromis.

La présente étude s'inscrit dans le cadre des recherches menées par le Ministère de l'Agriculture de Tunisie, afin d'établir des prévisions sur la possibilité d'assurer aux cultures une alimentation en eau adéquate sans pour autant entraîner la dégradation des sols.

Elle concerne la Haute Vallée de la Medjerdah, entre Bou Salem et Jendouba, où ont été aménagés de grands périmètres agricoles destinés à la culture de la betterave à sucre.

1. Les sols et les eaux des périmètres de Bou Salem.

Les sols (OCHI, 1984).

Les sols des périmètres sont formés dans des matériaux d'apport provenant des collines voisines et charriés par les oueds. Ils sont profonds (150 à 200 cm), limités en profondeur par une nappe phréatique dont le niveau varie dans l'année. Ce sont des sols peu évolués et mal différenciés. L'argile domine dans la totalité du profil, en particulier dans les 100 premiers cm. (40 à 50%). L'ensemble est massif, médiocrement aéré par une faible structure polyédrique émoussée que l'on n'observe plus au-dessous de 80 cm.

Les manifestations visibles de la pédogénèse sont limitées à quelques caractères vertiques: fentes de retrait sur les 30 premiers cm, faces de glissement en profondeur, et à l'hydromorphie: pseudogley et concrétions au-dessous de 80 cm.

La salinité n'est pas observable, ni le calcaire pourtant présent dans tout le profil sous forme diffuse.

La compacité évidente du sol est confirmée par les mesures de densité apparente: 1.55 dans le premier mètre, puis 1.67 et 1.73 en profondeur. La porosité est de l'ordre de $0.5 \text{ cm}^3 / \text{cm}^3$ en surface et $0.4 \text{ cm}^3 / \text{cm}^3$ en profondeur - fine à moyenne dans les 30 premiers cm, elle est fine à très fine au-dessous. L'eau est fortement retenue dans cette porosité: pour l'ensemble du profil, la teneur en eau à la capacité du champ est $27.7 \text{ g}/100\text{g}$ ($0.416 \text{ cm}^3 / \text{cm}^3$) et elle est encore de $20 \text{ g}/100\text{g}$ ($0.3 \text{ cm}^3 / \text{cm}^3$) au point de flétrissement. La marge d'eau utile est faible et si le sol a été desséché, des apports importants doivent être effectués avant que l'eau devienne utilisable par la végétation (Fig.3.)

Des expérimentations menées sur le terrain ont permis de réunir de nombreuses valeurs de la conductivité hydraulique du sol pour différentes profondeurs et pour des teneurs en eau variées. La perméabilité du sol saturé d'eau est voisine de $20 \text{ cm}/\text{j}$. Mais elle décroît rapidement avec la teneur en eau et la conductivité hydraulique n'est plus que de $0.5 \text{ mm}/\text{jour}$ pour une teneur en eau de $0.36 \text{ cm}^3 / \text{cm}^3$. Le drainage interne du sol est donc médiocre (Fig.4).

L'analyse chimique du sol témoin permet de vérifier que le profil est peu salé: la conductivité électrique de la solution du sol, relativement desséché au moment du prélèvement des échantillons, oscille entre 3 et 6 millisiemens. Le faciès de la solution est carbonaté calcique. La teneur en sulfate et en sodium est assez élevée. Dans l'ensemble du profil, la solution est sous saturée par rapport au gypse et en équilibre avec la calcite. Le pH est de 8.5 à 9. (Fig.5).

La capacité d'échange varie entre 10 et 23 mé/100 g. Le calcium échangeable est prédominant. Le sodium ne dépasse pas 7% dans les 60 premiers cm mais atteint 15 à 20% en profondeur.

A la base du sol, la nappe phréatique, alimentée par les sources des collines voisines, est peu salée ($E_c = 2$ ms) et peu alcaline ($pH = 7.8$). Elle est en équilibre avec la calcite.

LES EAUX.

Jusqu'à une date récente, seule l'eau de l'oued Medjerdah était utilisée pour l'irrigation. Sa salinité varie pendant l'année selon l'importance des apports des affluents; la moyenne est atteinte aux environs du mois de mai: $E_c = 4.56$ ms, $pH = 8.54$. Le faciès est chloruré sodique ($SAR_a = 13.1$) et l'eau est saturée par rapport à la calcite.

Depuis peu, la retenue de Bou Heurtma située dans les montagnes du nord permet d'alimenter la vallée avec une eau très faiblement salée dont la composition est pratiquement constante: $E_c = 0.95$ ms; $pH = 8.2$. Le faciès est carbonaté calcique ($SAR_a = 1.6$) et l'eau est saturée par rapport à la calcite. (Fig.6.)

Le réseau d'irrigation permet d'utiliser l'une ou l'autre de ces eaux ainsi que des mélanges. Les périmètres sont divisés en blocs de 10 ha munis chacun d'une borne reliée à des rampes d'aspersion. Le dispositif permet une pluviométrie de 12.5 mm/heure (9 mm/heure en été) sur une surface de 3500 m²: une trentaine de déplacements des rampes est nécessaire pour irriguer un bloc et il faut 6 jours en été pour lui apporter 35 mm.

2. La culture irriguée de la betterave.

Dans la région de Bou Salem, la betterave à sucre est semée fin octobre, au début des pluies d'hiver, et est récoltée à la mi-juillet, soit une durée de culture d'environ 260 jours.

Les premiers essais de culture permettent d'estimer ses besoins en eau à 750-800 mm, soit environ 400 mm de plus que les précipitations moyennes annuelles. Un calendrier d'irrigations compatible avec les possibilités du réseau local a été établi de façon à satisfaire aux besoins de la culture: Pendant les mois d'hiver, les pluies assurent en général un bilan excédentaire et seules 4 petites irrigations d'appoint ont été prévues.

Dès le printemps, mais surtout en été, la demande en eau est élevée: 13 irrigations de 35 à 50 mm doivent être effectuées. En outre une pré-irrigation de 25 mm est destinée à humecter le sol au moment du semis. On parvient ainsi à un total de 539 mm, dont près de 250 mm en juin et juillet, période d'évaporation maximum (Fig.7).

Il apparaît donc indispensable de préciser la menace de salinisation en déterminant par anticipation quel type et quelle quantité de sels risquent de s'accumuler dans le sol selon l'eau d'irrigation utilisée.

3. La méthode employée.

L'ensemble des données sur les caractéristiques physiques et chimiques du sol, sur l'évapotranspiration de la culture et du sol nu, ainsi que sur les pluies et les irrigations a été introduit dans un modèle de simulation numérique permettant de décrire l'évolution hydrique et chimique d'un sol en fonction du temps.

Le modèle SIMUL (RIEU, 1983-1985) remplit trois fonctions essentielles:

- Calcul, selon un pas de temps variable, des flux hydriques produits dans le sol et calcul de la teneur en eau tous les 5cm de profondeur.

La teneur en eau du sol initial doit être connue ainsi qu'une relation la liant à la succion. Le profil, normalisé, est découpé en zones homogènes dont les teneurs en eau caractéristiques et la conductivité hydraulique sont déterminées. Le calcul nécessite en outre un calendrier standard des pluies, des irrigations, de la consommation d'eau par la végétation et du niveau de la nappe phréatique si elle existe.

- Calcul des quantités de solutés transférées dans le sol:

Pour chaque pas de temps, le modèle détermine la nouvelle composition chimique globale de la solution du sol dans des strates successives de 15 cm d'épaisseur.

La composition chimique initiale de la solution du sol, celle de l'eau d'irrigation et celle de la nappe phréatique sont nécessaires au calcul.

- Remise à l'équilibre thermodynamique à la fin de chaque pas de temps: calcul simultané de la composition d'équilibre de la solution du sol, des masses de calcite ou de gypse dissoutes ou précipitées et des cations adsorbés, pour chaque strate de 15cm.

Le calcul nécessite la connaissance des cations échangeables initiaux et des stocks initiaux de calcite et de gypse, de la constante de sélectivité de l'échange Ca-Na, et de la $p\text{ CO}_2$ dans le sol. Les constantes de dissociation des principales espèces solubles dans les eaux naturelles et les produits de solubilité du gypse et de la calcite sont utilisés.

Dans un premier temps, le modèle a été ajusté au sol étudié en simulant le plus exactement possible un épisode d'irrigation et redistribution de l'eau dans le profil observé et mesuré en détail sur le terrain.

On a ensuite procédé à la simulation de la culture de la betterave irriguée soit avec l'eau de la retenue de Bou Heurtma, soit avec l'eau de l'oued Medjerdah, ces deux exemples fixant les limites d'évolution possible avec une eau d'irrigation qui serait un mélange de deux eaux de référence. Les simulations ont été effectuées pour 365 jours consécutifs. Cette méthode a permis d'établir des prévisions sur l'effet

des irrigations sur la salinité du sol. Il s'agit de prédictions théoriques et les résultats des calculs ne peuvent être considérés que comme des indications moyennes sur le comportement d'un sol semblable au sol témoin étudié, dans les conditions d'utilisation précisées dans les paragraphes précédents.

4. *Calage du modèle.*

Un essai d'irrigation (eau de Bou Heurtma) de 212 mm étalée sur trois jours et suivie d'une semaine de redistribution de l'eau, drainage et évaporation, a été réalisé sur le sol en friche pendant le mois d'Août. Le stock d'eau entre la surface et des profondeurs croissantes a été mesuré chaque jour. Juste avant l'irrigation et 4 jours après le dernier apport d'eau, le profil a été prélevé et analysé par strates de 15 cm.

Cet épisode a été simulé en utilisant comme données initiales le profil hydrique et la composition chimique du sol juste avant l'irrigation. Les résultats des calculs ont été comparés aux mesures expérimentales.

On constate que l'allure des profils hydriques calculés successifs reproduit correctement celle des profils mesurés (Fig.8). De la même façon la simulation de l'évolution des stocks d'eau correspond assez bien à la réalité mesurée. A titre d'exemple la fig.9 présente ces évolutions pour les niveaux 105 et 120 cm.

Comme indicateur du transfert des solutés, on a utilisé par la teneur en Na de la solution du sol, cet élément étant considéré suffisamment soluble pour être déplacé avec l'eau sans réagir particulièrement avec le sol lui-même. On constate (Fig.10) un bon accord entre valeurs calculées et mesurées entre 15 et 95 cm. La simulation calcule un lessivage un peu trop important entre 0 et 15 cm et surtout entre 95 et 105cm. Mais pour ce dernier niveau, il est délicat de faire la part des erreurs expérimentales et celle des défauts de la simulation: le lessivage mesuré apparaît en effet anormalement faible.

5. *Simulation d'une année agricole.*

Le modèle de calcul paraissant convenablement ajusté au milieu étudié, les simulations de longue durée ont été exécutées, entre le 20.8 et le 19.08. Pour des raisons pratiques les résultats n'ont été

imprimés que le 1er et le 15 de chaque mois(*). On dispose ainsi d'une description bimensuelle de l'état hydrique et chimique du sol sans pouvoir préjuger des situations intermédiaires.

5.1. Evolution hydrique.

Seule la composition chimique de l'eau changeant entre les deux simulations effectuées, les résultats concernant l'évolution hydrique sont strictement identiques dans les 2 cas.

Le bilan hydrique apparaît positif à chaque quinzaine. Les apports d'eau cumulés (pluies + irrigations) ne sont jamais inférieurs aux pertes (ETR + drainage) (Fig.11). Mais si l'on vérifie dans le détail, on constate que la culture manque légèrement d'eau en avril, juin et juillet.

A ces occasions, un ou plusieurs niveaux du sol contenant des racines atteignent une teneur en eau correspondant au flétrissement alors que globalement le stock d'eau du profil suffirait à satisfaire à la demande. Ces déficits localisés sont comptabilisés par la simulation et n'atteignent que 9,56 mm pour la durée de la culture (soit 1% de la consommation). La culture de la betterave se déroule donc dans de bonnes conditions d'alimentation hydrique.

Au moment du semis, en dépit de la pré-irrigation de 25mm, le sol initial est très sec et sa conductivité hydraulique est très réduite. Le front d'humectation produit par les apports d'eau successifs ne progresse que très lentement: 30 cm le 01.11, 60cm 45 jours plus tard et 120 cm 2 mois plus tard encore. Ce n'est que le 01.03 que l'ensemble du profil est suffisamment humide pour que des flux hydriques de l'ordre du mm/j puissent le traverser (Fig.12). A cette date, la majeure partie des pluies est déjà tombée. Cette eau n'a pas lessivé le sol dont elle a seulement dilué la solution: le 01.03 le total de l'eau drainée depuis le mois d'août n'est que de 18,25mm alors que les apports en surface sont de 314mm. Par la suite le drainage enfin amorcé se maintient: 75mm seront drainés entre mars et la mi août.

(*) Dans ces conditions, la simulation d'une année demande environ 30' sur le DPS 8 de CII-Honeywell Bull du Centre National Informatique de Tunis.

Au terme de l'année simulée, le 19.08, le bilan se présente comme suit:

Apports: P = 431.6mm IR = 539mm Total= 970.6mm

Drainage: 93.6mm

ETR : 829mm, dont 759 pour la culture de la betterave

Variation de stock du profil: + 48mm

5.2. Evolution de la salinité.

On a représenté sur les figures 13 et 14 l'évolution annuelle de la solution du sol entre 0 et 75 cm ainsi qu'en profondeur.

La première strate enregistre fidèlement les événements qui affectent la surface du sol. C'est aussi le cas de la strate suivante qui réagit de façon plus atténuée: jusqu'au mois de mars les pluies provoquent une désalinisation de la solution du sol, tandis que les irrigations d'appoint ont l'effet inverse, d'autant plus marqué que l'eau d'apport est salée. Les abondantes irrigations de printemps ramènent la salinité de la solution des deux premières strates au niveau de celles des eaux d'irrigation. Ce point est atteint en mai. Par la suite, la forte consommation en eau provoque une concentration des solutions. La strate de surface, régulièrement lessivée à chaque irrigation se salinise plus lentement tandis que ses effluents vont se joindre aux solutions remontant de la profondeur pour se concentrer dans la strate 15-30, la plus riche en racines et où la demande en eau est la plus élevée.

Les strates 30-45 et 45-60 ne sont atteintes par le front d'humectation qu'en octobre-novembre. Elles reçoivent alors les eaux qui ont lessivé les deux premières strates et leur salinité augmente. Devenues plus salées que les strates de surface, elles subissent ensuite une faible désalinisation, tempérée par les irrigations d'appoint avec l'eau de Bou Heurtma ou même annulée dans le cas de l'utilisation de l'eau de la Medjerdah. Dès le mois de mars, les fortes irrigations et la consommation croissante en eau entraînent une salinisation rapide du niveau 30-45, riche en racines, tandis que la salinité du niveau 45-60, moins asséché, se stabilise.

Le front d'humectation n'atteint 60 cm qu'en décembre et 120 cm qu'en Février. La salinité des strates 60-75 et 120-135 ne commence à évoluer qu'à partir de ces dates. Initialement assez salés, recevant les effluents des couches supérieures et ne contenant pas de racines, ces niveaux sont progressivement désalinisés jusqu'au mois de juin où la demande en eau, devenue très forte dans les strates de surface, provoque une remontée générale des eaux du sol. La strate 60-75 est alors traversée par des flux ascendants d'eau plus salée que sa solution et sa salinité augmente, tandis que la profondeur ne recevant plus d'eaux venues du haut, voit sa salinité se stabiliser.

Si les évolutions sont globalement comparables, les niveaux atteints en utilisant l'une ou l'autre eau d'irrigation, sont très différents:

Avec l'eau de Bou Heurtma, l'hiver se solde par une diminution générale de la salinité du profil de 15 à 90%. Les irrigations d'appoint avec l'eau de la Medjerdah ne permettent pas d'atteindre ce résultat: seul le niveau 0-30 est lessivé tandis que la salinité se maintient ou même augmente légèrement au-dessous.

Mais c'est surtout avec les irrigations d'été que les différences s'affirment. Si l'on utilise l'eau de Bou Heurtma, le bénéfice de l'hiver est maintenu sauf entre 30 et 60 cm où la salinité remonte légèrement. Dans le cas de l'eau de la Medjerdah, l'ensemble du profil est resalinisé dans des proportions considérables, allant de 40 à 750%.

5.3. Evolution du stock de sels.

La solution du sol initial est en équilibre avec la calcite et sous saturée par rapport au gypse. La simulation permet de vérifier que la situation reste inchangée si on utilise l'eau de Bou Heurtma. On constate même une très légère dissolution du stock de calcite initial.

L'effet de l'eau de la Medjerdah est plus complexe. Pour le préciser, on peut analyser le comportement de la strate 15-30 cm qui subit les fluctuations les plus fortes.

Cas de la calcite (Fig.15).

Les pluies d'hiver ont un effet diluant: l'activité de Ca^{++} diminue. Une partie du stock de calcite est dissoute progressivement

de façon à rétablir l'équilibre entre la solution et le minéral: au 1^{er} Mars, 0.12 gr. de calcite par litre de solution du sol ont été remis en solution. Cette dissolution enrichit la solution du sol en ion CO_3^{--} , l'alcalinité augmente légèrement et le pH passe de 7.47 à 7.70.

Au printemps et en été, le processus inverse se produit. La concentration progressive de la solution de la strate 15-30 fait augmenter l'activité de Ca^{++} . Il y a précipitation de calcite et consommation de CO_3^{--} . Le stock s'enrichit de 0.8 gr. de Ca CO_3 par litre de solution et le pH s'abaisse jusqu'à 7.12.

Cas du gypse (Fig. 16 et 17).

La solution du sol reste sous saturée par rapport au gypse jusqu'au mois de juin. A cette date, le produit des activités (Ca^{++}). (SO_4^{--}) atteint la valeur du Kps du gypse entre 15 et 45 cm. Le 15.06 c'est le tour de la strate 45-60 et le niveau 0-15 atteint la valeur critique début juillet. Le gypse précipite alors dans ces niveaux, conjointement avec la calcite tandis qu'au-dessous de 60 cm, la solution reste sous-saturée. A la fin de l'année simulée, 4.18 g. par litre de solution du sol ont précipité dans la strate 15-30 cm.

5.4. Evolution du taux de sodium échangeable (Fig. 18 et 19).

Initialement, le Na/T des 60 premiers cm de sol est faible: 5 à 8. Jusqu'au mois de mars, il se maintient à sa valeur initiale ou même diminue légèrement. Mais avec les irrigations de printemps et surtout d'été, les comportements deviennent très différents selon l'eau apportée.

S'il s'agit de l'eau de Bou Heurtma, carbonatée calcique et dont le SAR est faible (1,6), Na/T ne varie pas ou augmente légèrement entre 30 et 60 cm, de la même façon que la salinité générale du sol.

Quant à l'eau de la Medjerdah, chlorurée sodique et dont le SAR est 8 fois plus fort, elle a un effet alcalinisant marqué. De plus, pendant les mois d'été la précipitation du gypse consomme du SO_4^{--} et du Ca^{++} . Il en résulte un renforcement du caractère chloruré sodique de la solution du sol. L'alcalinisation est inévitable; ainsi dans la strate 15-30 cm, Na/T passe de 6.4 à 14.5 entre les mois de mai et août. A la fin de l'année simulée, Na/T a augmenté de 10 à 135% dans les 60 premiers cms du sol.

CONCLUSION.

A l'évidence, l'utilisation de l'eau de la Medjerdah est à proscrire en été. L'eau de Bou Heurtma peut être utilisée mais à terme, le niveau 30-60 risque d'être trop salé pour la betterave à sucre. De plus, l'alcalinisation peut se développer et nuire au drainage du profil.

Les pluies d'hiver n'ont pas l'effet lessivant que l'on pourrait attendre. En fait, il a été vérifié par une simulation non présentée dans cet article que si le sol est suffisamment humide au moment du semis (0.35 à $0.40 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$), le drainage est possible dès les premières pluies (71 mm au lieu de 18 mm entre septembre et mars). Dans ce cas, la désalinisation du niveau 30-60 est efficace et ce niveau n'est pas resalinisé l'été suivant. Dans ces conditions l'eau de Bou Heurtma est sans danger et l'on peut même utiliser des coupages avec l'eau de la Medjerdah. Toutefois, cette solution est onéreuse: il faut effectuer des pré-irrigations très importantes (150 à 200 mm) et surtout, le drainage étant actif pendant toute la culture, (280 mm en 1 an au lieu de 94 mm), les doses d'irrigation de printemps et d'été doivent être augmentées de 20 à 30% .

Au point de vue méthodologique, la simulation numérique s'avère précieuse pour analyser dans sa totalité les processus de salinisation du sol et fournir des informations chiffrées et cohérentes sur les différents mécanismes qui interviennent : mouvements de l'eau et des solutés, chimie de la solution du sol, équilibre avec les sels cristallisés et le complexe adsorbant.

BIBLIOGRAPHIE

- OCHI R.(1984) - Modélisation des transferts de l'eau et des sels dans un sol du périmètre irrigué de la haute vallée de la Med-jerdah. Mémoire INAT, Tunis, multigr. 122 p.
- RIEU M. (1983) - Simulation numérique des flux hydriques et prédiction de la salinité dans les sols. H.S. ORSTOM, ISBN 2-7099-0684-8, multigr., 161 p.
- RIEU M. (1985) - Simulation numérique du transfert vertical des solutés et des équilibres d'échange et de précipitation dans les sols calcaires et gypseux. Sc.Géol., Bull., Strasbourg. (à paraître).

FIGURES

FIGURAS

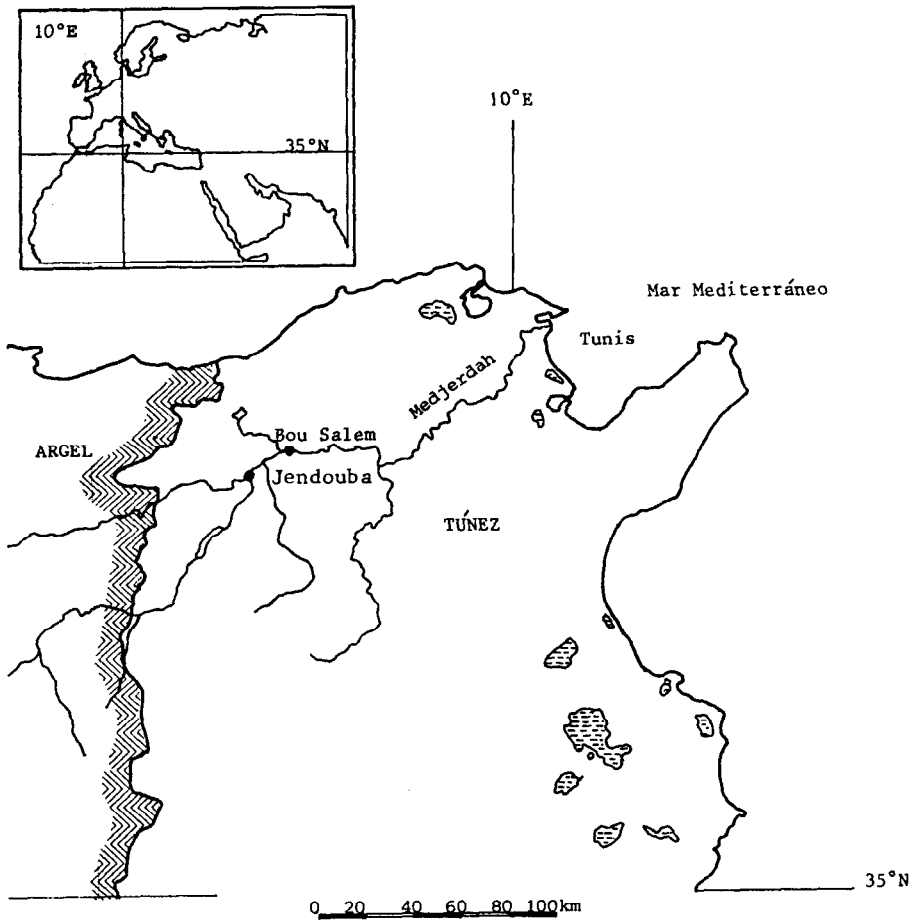


Fig. 1 : Localisation du site d'étude

Fig. 1 : Localizaci3n del sitio de estudio

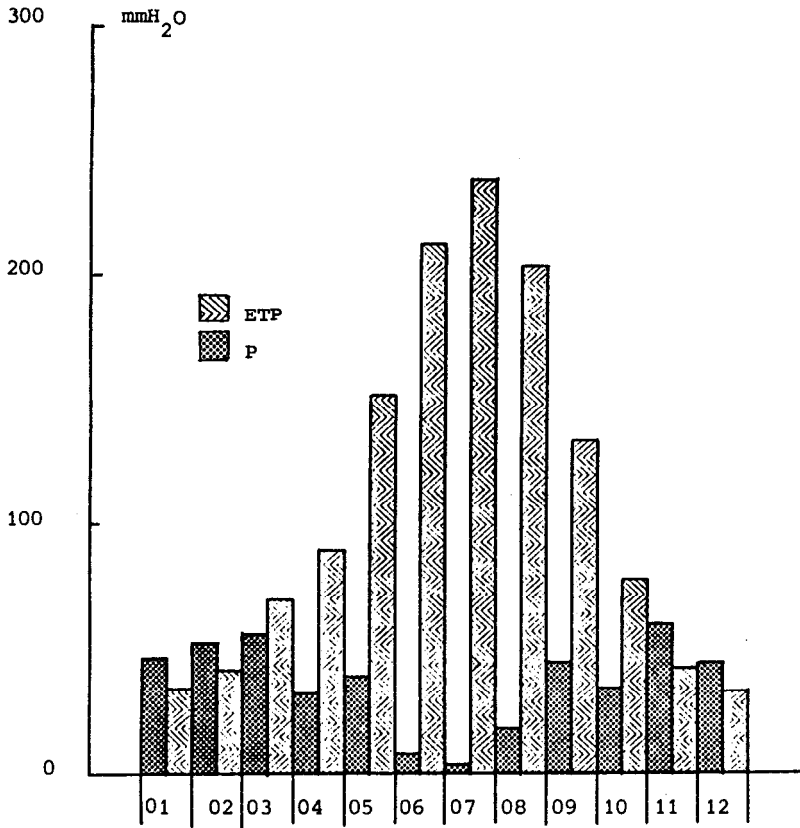


Fig. 2 : Précipitations et évapotranspiration potentielle

Fig. 2 : Precipitaciones y evapotranspiración potencial

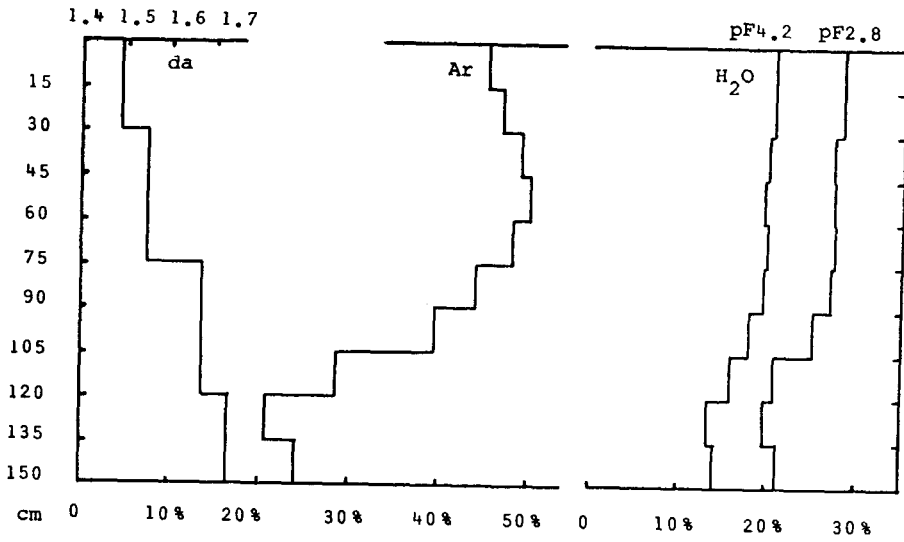
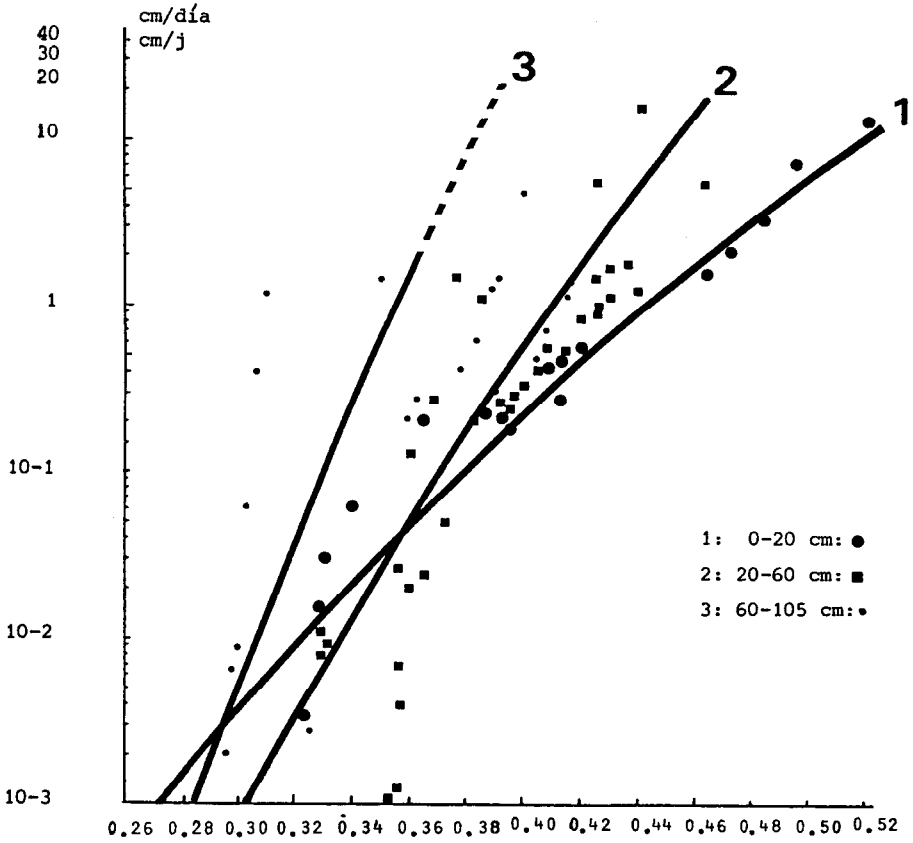


Fig. 3 : Densité apparente, teneur en argile et réserve en eau utilisable

Fig. 3 : Densidad aparente, contenido de arcilla y reserva de humedad acequible



H_2O (cm³/cm³)

Fig. 4 : Conductivité hydraulique

Fig. 4 : Conductividad hidráulica

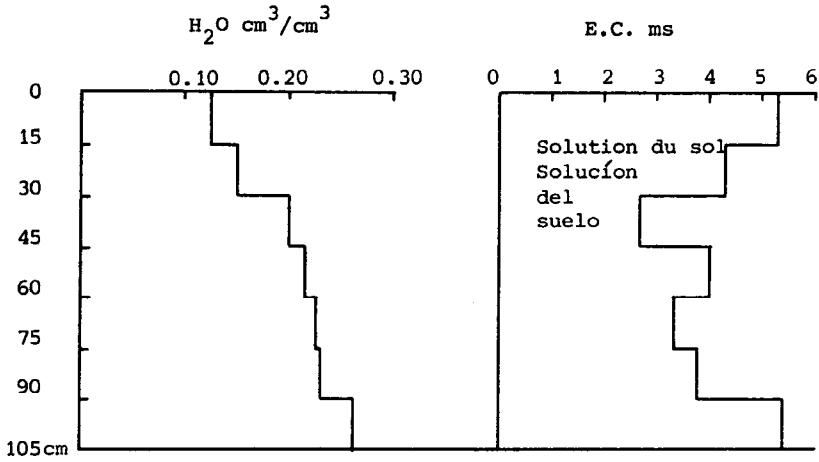


Fig. 5 : Salinité du sol initial

Fig. 5 : Salinidad del suelo inicial

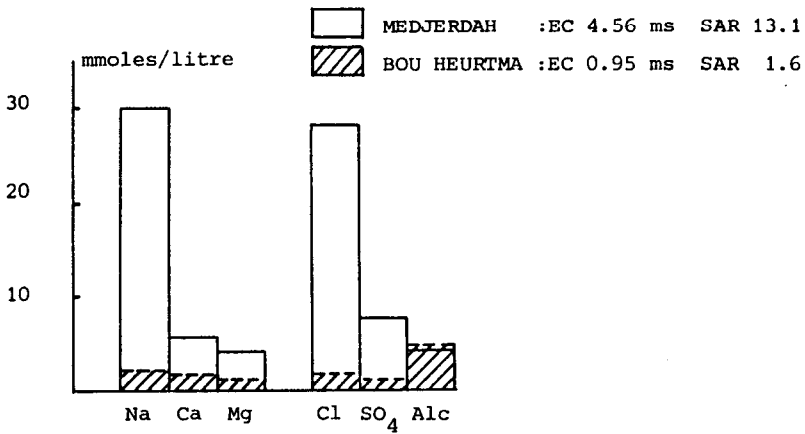


Fig. 6a : Eaux d'irrigation

Fig. 6a : Aguas de riego

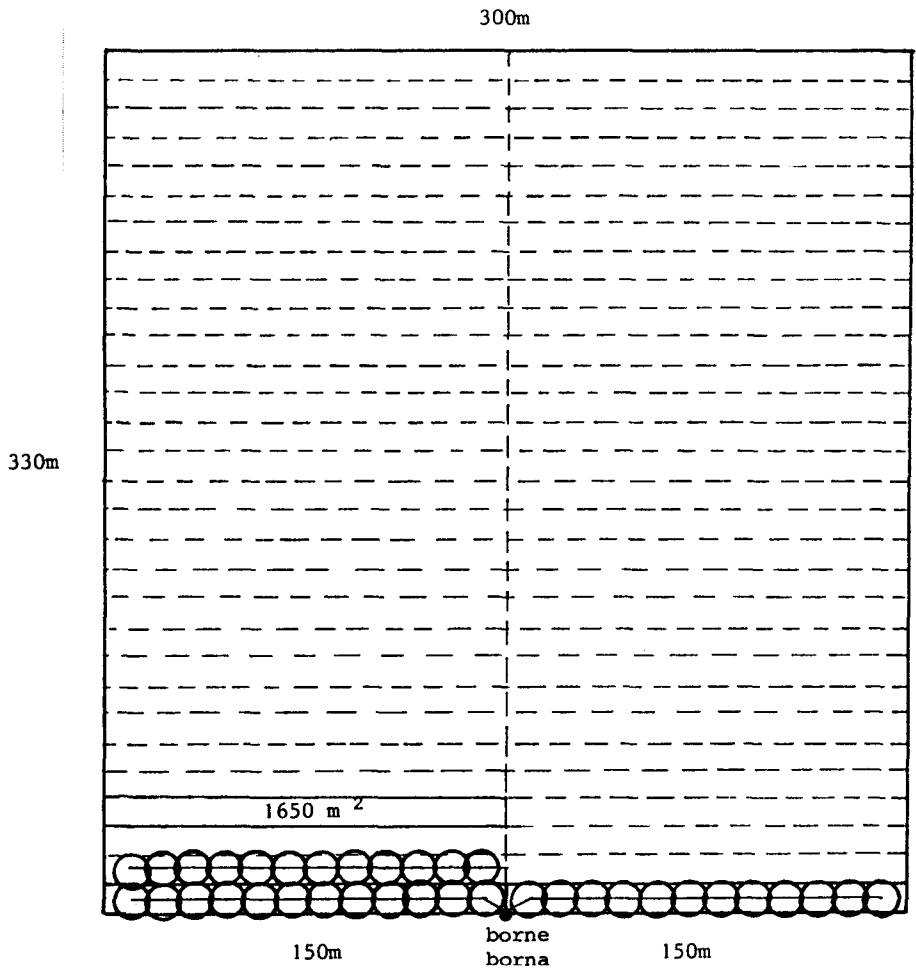


Fig. 6b : Infrastructure d'irrigation d'une parcelle de 10 ha

Fig. 6b : Infraestructura de una parcela de 10 ha

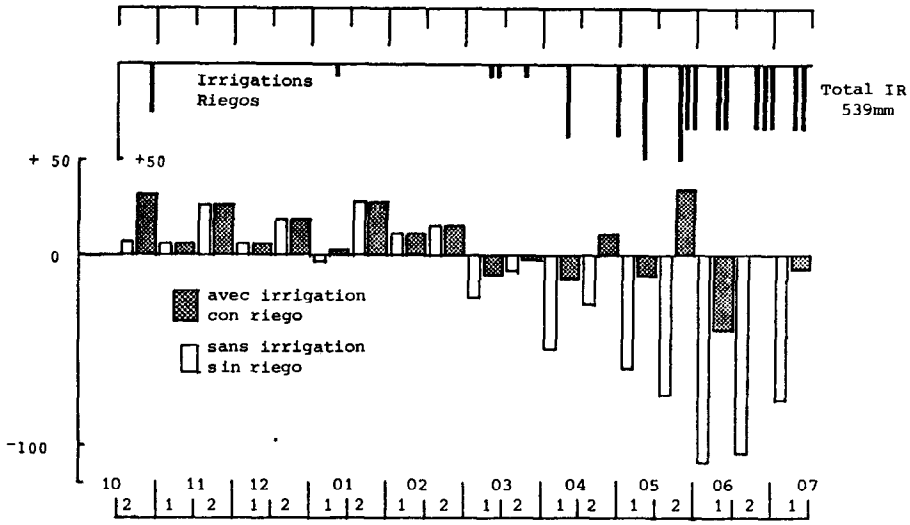


Fig. 7a : Bilan hydrique par quinzaines de la culture de la betterave

Fig. 7a : Balance hídrica por quincenas del cultivo de la remolacha

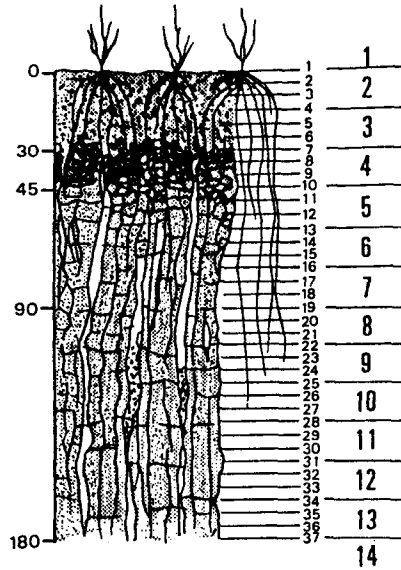


Fig. 7b : Discretisation du profil

Fig. 7b : Discretización del perfil

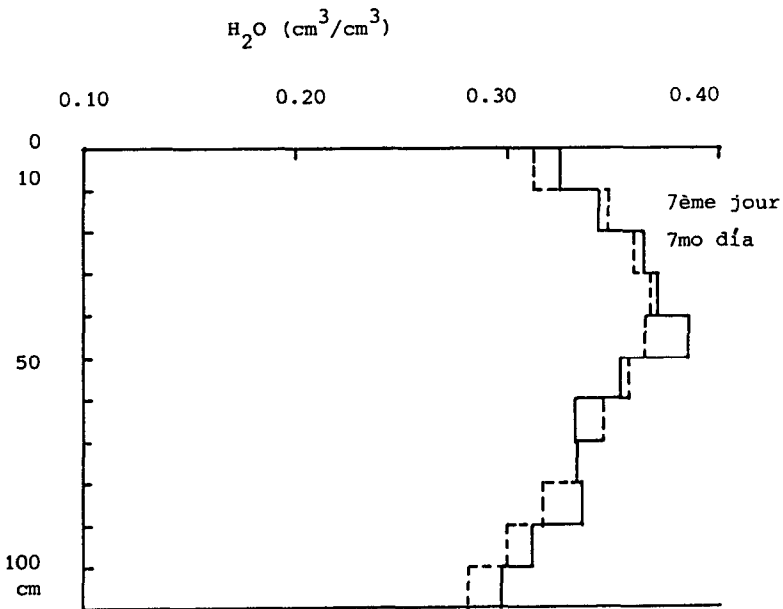
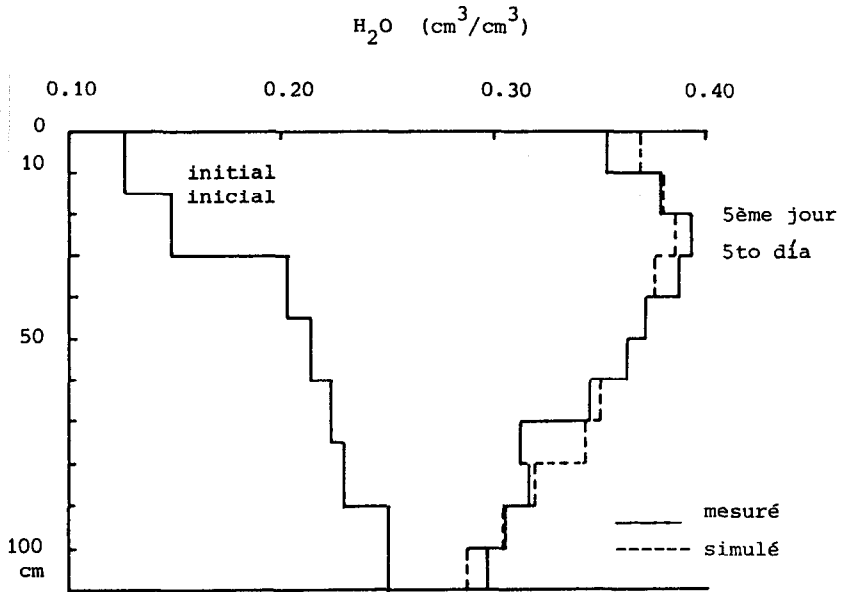


Fig. 8 : Irrigation de 210 mm et redistribution

Fig. 8 : Riego de 210 mm y redistribución

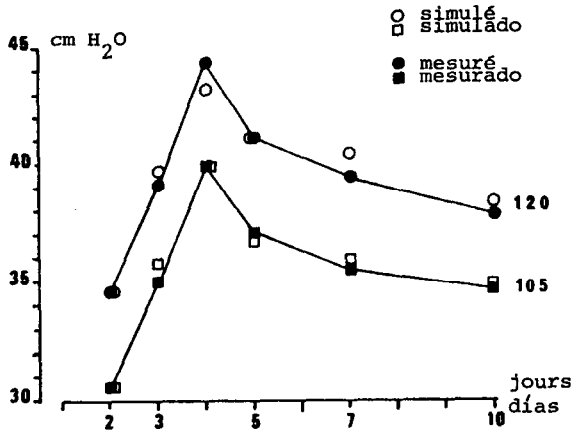


Fig. 9 : Evolution du stock d'eau

Fig. 9 : Evolución del contenido de agua

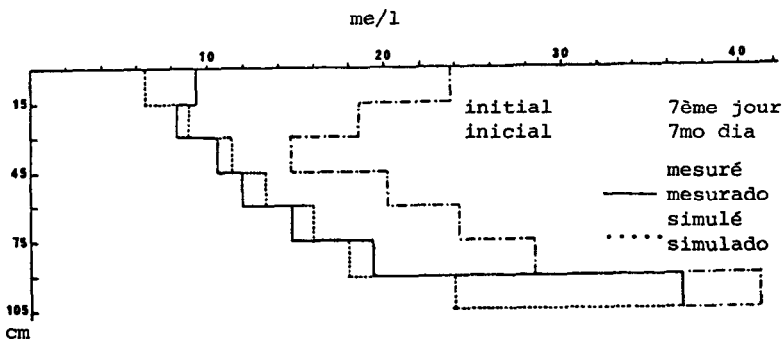


Fig. 10 : Evolution du stock de sodium

Fig. 10 : Evolución del contenido de sodio

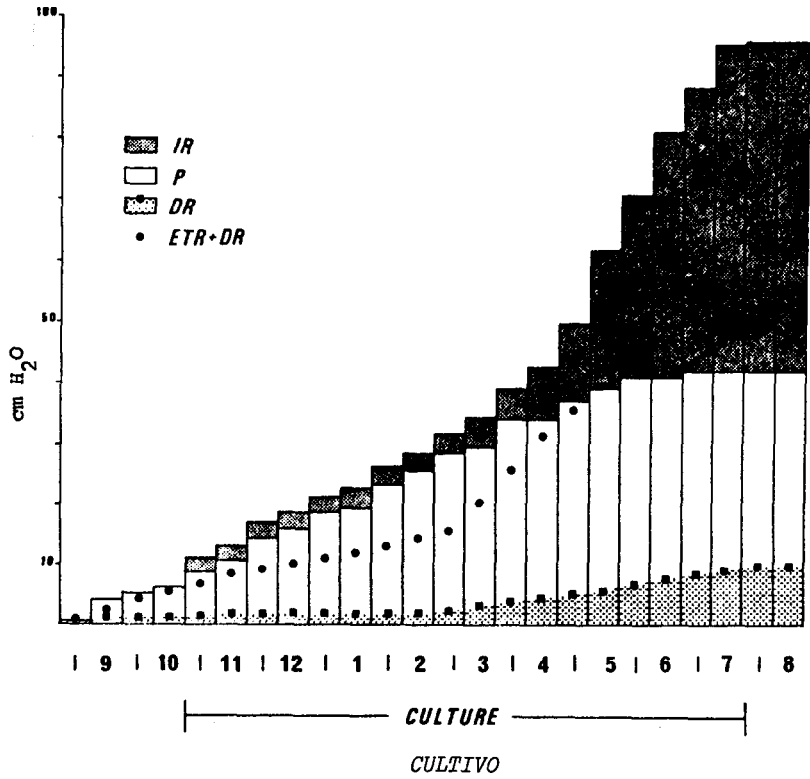


Fig. 11 : Bilan hydrique annuel cumulé

Fig. 11 : Balance hídrico anual cumulado

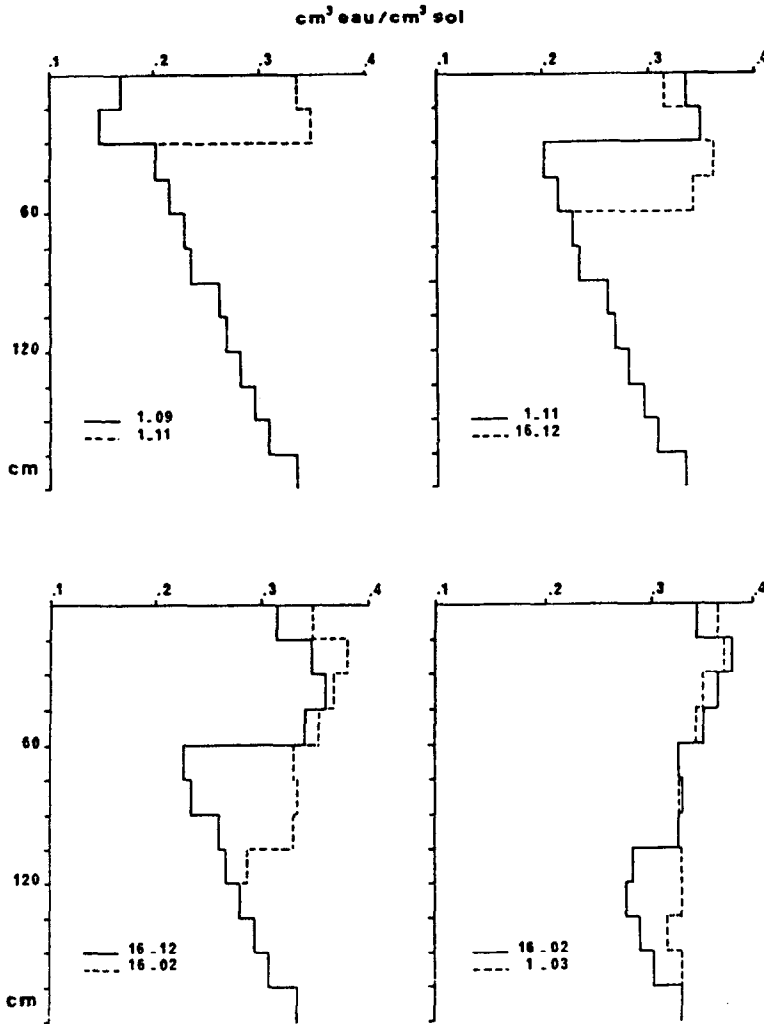


Fig. 12 : Progression du front d'humectation

Fig. 12 : Avance del frente de humedad

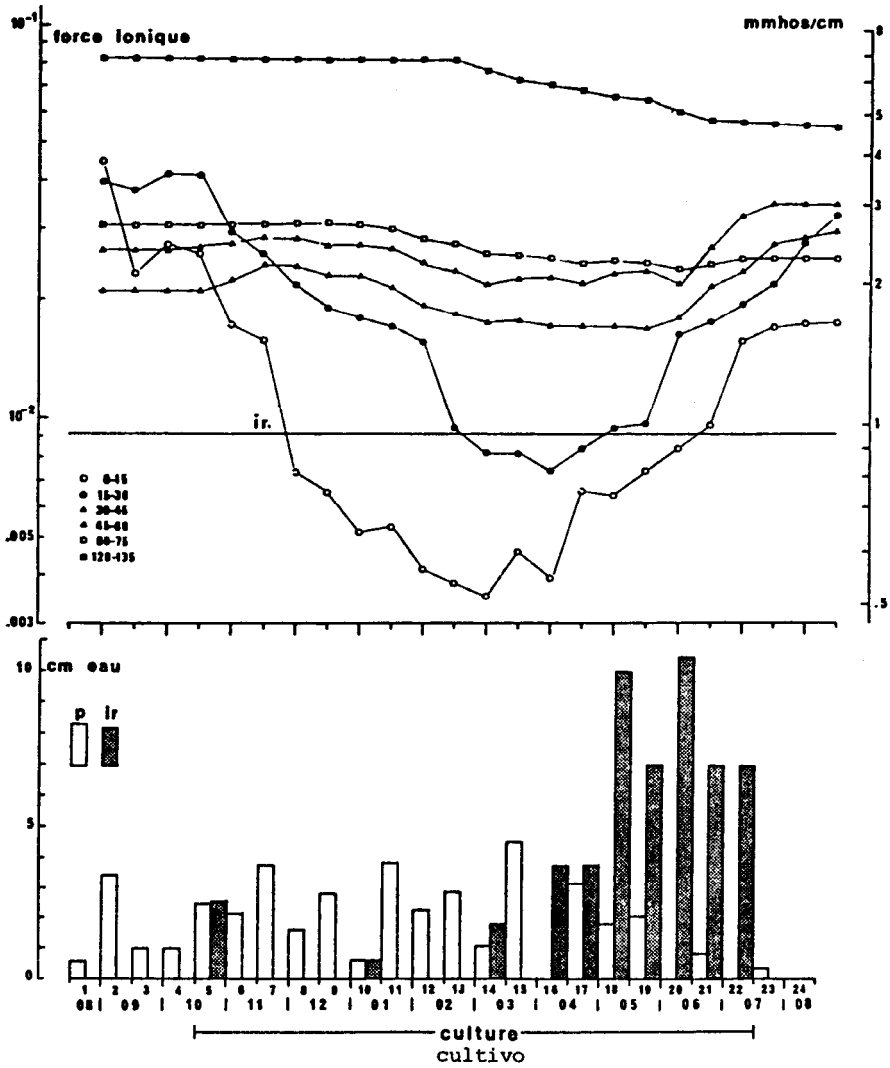


Fig. 13 : Bou Heurtma. Evolution annuelle de la salinité du sol

Fig. 13 : Bou Heurtma. Evolución anual de la salinidad del suelo

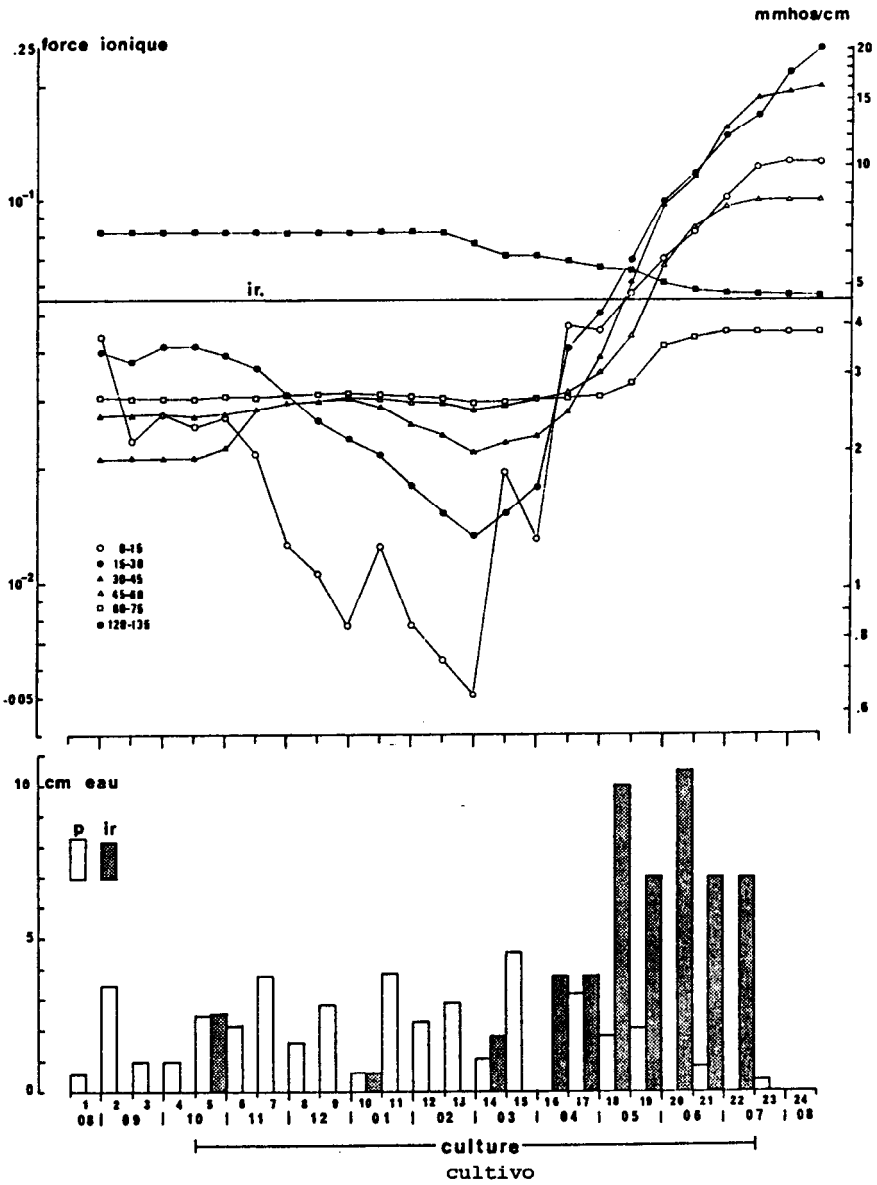


Fig. 14 : Medjerdah. Evolution annuelle de la salinité du sol

Fig. 14 : Medjerdah. Evolución anual de la salinidad del suelo

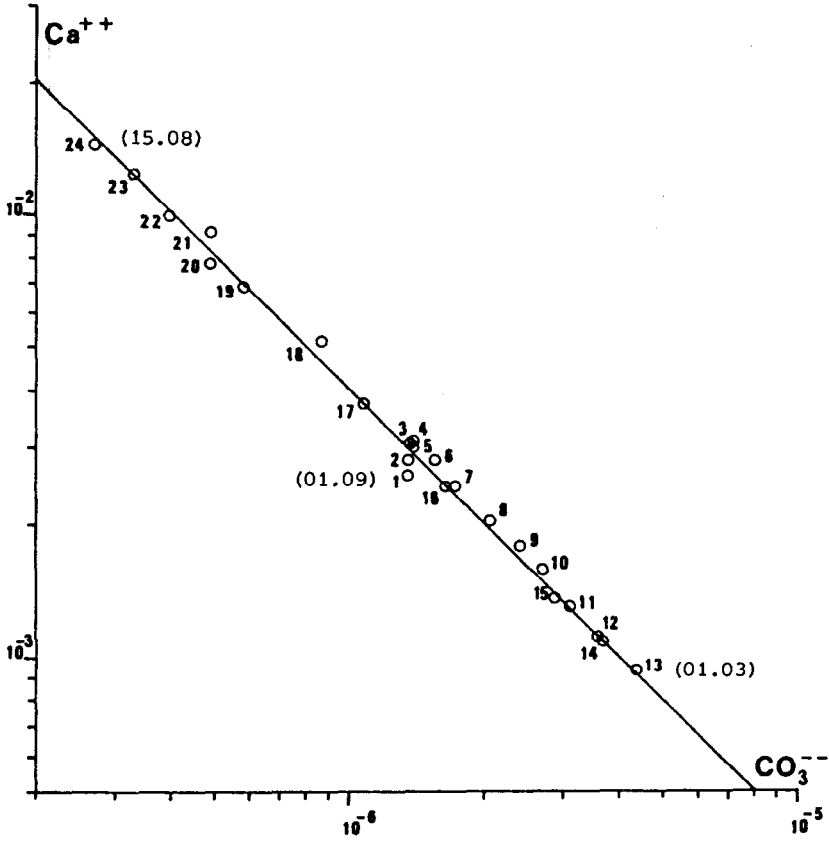


Fig. 15 : Medjerdah. Evolution de l'équilibre avec la calcite

Fig. 15 : Medjerdah. Evolución del equilibrio con la calcita

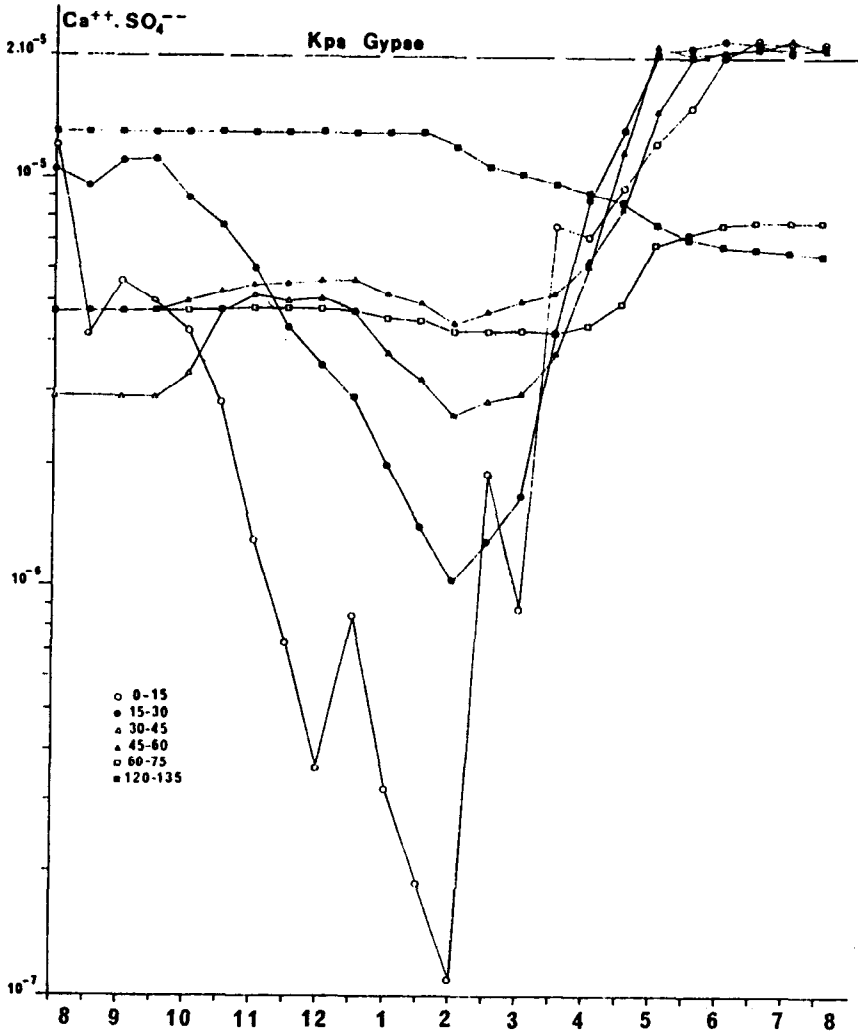


Fig. 16 : Medjerdah. Evolution de l'équilibre avec le gypse

Fig. 16 : Medjerdah. Evolución del equilibrio con el yeso

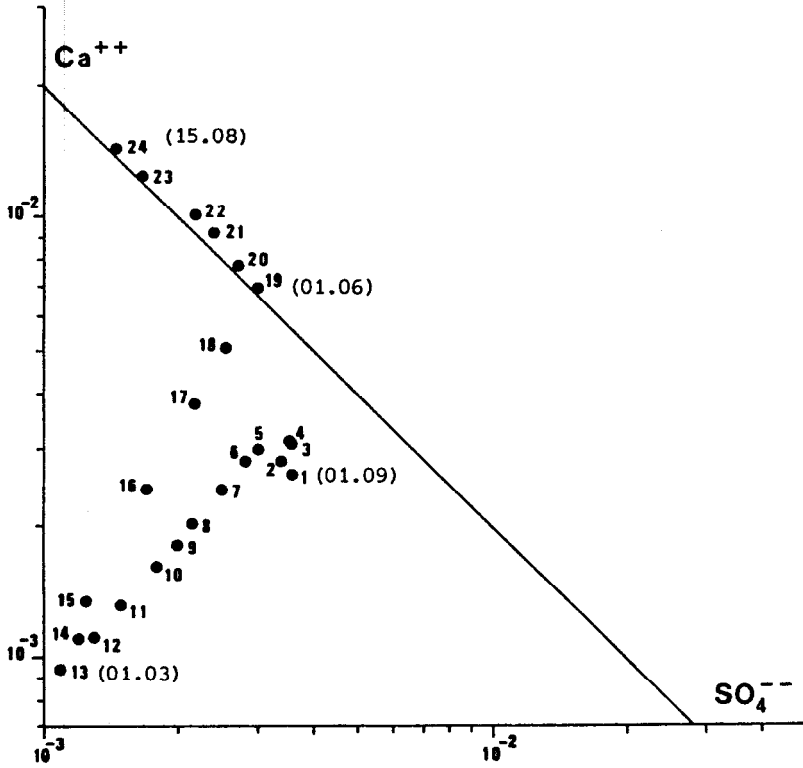


Fig. 17 : Medjerdah. Evolution de l'équilibre avec le gypse

Fig. 17 : Medjerdah. Evolución del equilibrio con el yeso

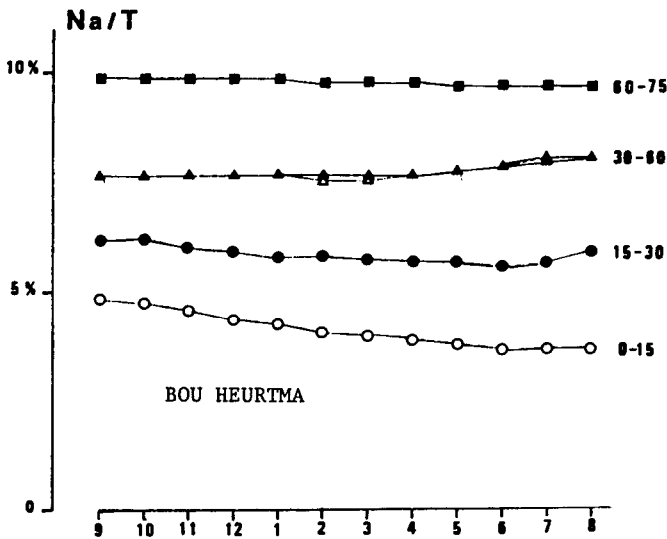
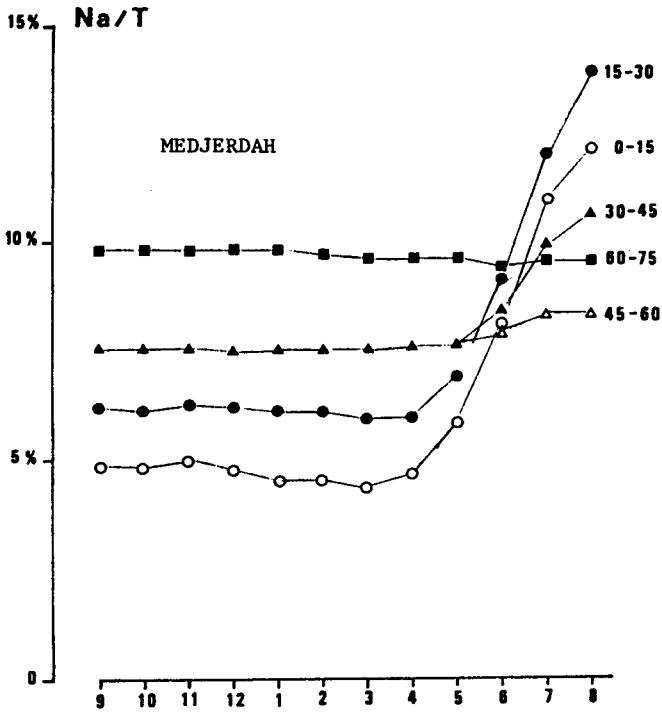


Fig. 18 et 19 : Evolution de l'alcalinisation

Fig. 18 et 19 : Evolució de la alcalinización