

# Irrigation avec l'eau géothermale salée dans le Sud tunisien

M. Hachicha<sup>(1)</sup>, R. Khaldi<sup>(2)</sup> \* et A. Mougou<sup>(3)</sup>

- 1) Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts (INRGREF), 17 rue Hédi Karray BP 10, 2080 Ariana – Tunisie
  - 2) Centre Régional de Recherches en Agriculture Oasienne Dégueche - Route de Tozeur 2260 - Tunisie
  - 3) Institut National Agronomique de Tunis, Avenue Charles Nicolle, El Menzah, Tunisie
- \* : Auteur correspondant : rabebk@yahoo.com

## RÉSUMÉ

Dans le sud désertique tunisien et compte tenu de la rareté de l'eau, l'exploitation des eaux géothermales a été une opportunité pour le développement agricole de cultures intensives sous serres. Rapidement, des problèmes de salinité sont apparus. Pour analyser l'effet de cette salinité sur la durabilité de ce système de culture, une enquête a été réalisée dans la région de Tozeur qui constitue un important pôle de la géothermie. Les résultats ont mis en évidence la salinisation de plusieurs périmètres irrigués en particulier celui de Hamma 1 bis. Cette salinisation des sols apparaît liée à la durée de l'irrigation de la même serre et se répercute sur la nature des cultures. Au-delà de la quatrième année d'irrigation, la salinité du sol devient excessivement élevée surtout en surface. L'augmentation de la salinité depuis la première mise en eau s'accompagne par la pratique de cultures de plus en plus tolérantes à la salinité. Pour gérer et réduire l'effet de la salinité, plusieurs mesures sont utilisées individuellement par chaque agriculteur dans ses serres ou collectivement par plusieurs agriculteurs d'une même région : utilisation séquentielle de cultures de plus en plus tolérantes à la salinité, amendements sableux, lessivage estival des sels, rotation à l'intérieur de la même serre et mise en irrigation de nouvelles régions limitrophes.

## Mots clés

Eau géothermale, salinité, irrigation, sol, durabilité, Sud tunisien, Tunisie.

## SUMMARY

### **IRRIGATION WITH GEOTHERMAL SALINE WATER IN THE TUNISIAN SOUTH**

*In the Tunisian desertic south and taking into account the scarcity of water, the use of geothermal water was an opportunity for the agricultural development. The saline waters were used for intensive crops under greenhouses. Rapidly, salinity problems appeared. To analyze the effect of this aspect on the sustainability of this farming system, an investigation was carried out in the area of Tozeur*

which constitutes an important geothermic pole. The results highlighted the salinization of several irrigated areas in particular that of Hamma 1 bis. This salinization of the soils appears related to the duration of the irrigation of the same greenhouse and is reflected on the nature of the crops. Beyond fourth year of irrigation, the soil salinity becomes excessively high especially on the surface. To manage and reduce the effect of salinity, several practices are used individually by each farmer on the level of his greenhouses or collectively by several farmers of the same region. It is the sequential use of increasingly tolerant crops to salinity, the sandy amendments, the summer salt leaching or rotation inside the same greenhouse and also the irrigation of bordering new areas.

**Key-words**

Geothermal water, salinity, irrigation, soil, sustainability, Tunisian South, Tunisia.

**RESUMEN****IRRIGACIÓN CON AGUA GEOTERMAL SALADA EN EL SUR DE TÚNEZ**

En el sur desértico tunecino, teniendo en cuenta la escasez de agua, la explotación de las aguas geotermales estuvo una oportunidad para el desarrollo agrícola de cultivos intensivos bajo invernaderos. Rápidamente, problemas de salinidad aparecieron. Para analizar el efecto de esta salinidad sobre la sostenibilidad de este sistema de cultivo, una encuesta fue realizada en la región de Tozeur que constituye un importante polo de la geotermia. Los resultados pusieron en evidencia la salinización de varios perímetros en particular el de Hamma 1 bis. Esta salinización de los suelos aparece ligada a la duración del riego en el mismo invernadero y se repercute sobre el tipo de cultivo. Después del cuarto año de irrigación, la salinidad del suelo está excesivamente elevada sobre todo en superficie. El aumento de la salinidad desde la primera irrigación se acompañó por la práctica de cultivos más y más tolerantes a la salinidad. Para gestionar y reducir el efecto de la salinidad, se usaron varias medidas individualmente por cada agricultor al nivel de sus invernaderos o colectivamente por varios agricultores de una misma región: utilización secuencial de cultivos más y más tolerantes a la salinidad, enmiendas arenosas, lixiviación estival de los sales, rotación al interior del mismo invernadero y desarrollo del irrigación en nuevas regiones limítrofes.

**Palabras clave**

Agua geotermal, salinidad, irrigación, suelo, sostenibilidad, sur de Túnez.

**B**ien que la majorité des pays du monde se soit intéressée à l'eau géothermale comme une source d'énergie se prêtant à une exploitation industrielle et au chauffage (Lund, 2009), peu de pays qui souffrent de manque de ressources hydrauliques, comme la Tunisie (Ben Mohamed, 2003) et l'Algérie (Ouali *et al.*, 2006), ont exploité l'eau géothermale pour l'irrigation après son refroidissement (PNUD/TUN, 1991). Les sources naturelles d'eau géothermale du Sud tunisien et algérien ont servi depuis des millénaires à l'irrigation des oasis (Baccouche, 1988). Cependant, l'utilisation intensive de ces eaux pour l'irrigation des serres remonte à une vingtaine d'années seulement. Dans le contexte de la raréfaction des ressources hydriques, notamment dans le Sud tunisien, la réalisation de forages profonds dans la nappe du Continental Intercalaire a été exécutée principalement pour la sauvegarde des oasis existantes et a dégagé un potentiel géothermique important (Said, 1998). Ainsi, la Tunisie dispose de ressources thermales importantes lui permettant de procéder au chauffage et à l'irrigation des cultures sous serres à un coût nettement moindre à celui obtenu par le chauffage classique. Par ailleurs, les produits des serres chauffées par la géothermie, gagnant en précocité et livrés en contre saison et selon un calendrier de production judicieusement établi, permettent un meilleur positionnement sur le marché européen et des marges commerciales intéressantes.

Depuis son introduction, la géothermie a connu une évolution spectaculaire. Les superficies emblavées se sont multipliées au cours des années, passant à plus de 96,2 ha (2004) dont environ 36 ha à Gabès, 38,4 ha à Kébili et 21,8 ha à Tozeur (Said, 2002). Plus de la moitié de cette superficie est cultivée en continu (54 ha), 32 ha en cultures d'arrière saison et 40 ha en primeurs. La géothermie a pu assurer au Sud tunisien un développement agricole considérable caractérisé par un coût d'opportunité de l'énergie de chauffage très faible. Elle permet de valoriser des ressources énergétiques qui seraient autrement perdues, un bilan en devise nettement positif, un taux de rentabilité élevé de l'ordre de 28 % et la création d'emplois (DG/PA, 1993). Cette activité est pratiquée actuellement (2004) par 330 agriculteurs et procure environ 300.000 jours de travail par campagne.

La géothermie, utilisée comme source hydrique et énergétique gratuite, a permis un développement considérable du domaine horticole tunisien dont la production venant des serres froides ne permet pas d'atteindre un niveau qualitativement satisfaisant et quantitativement suffisant (Verlodt, 1983). Vu les perspectives qu'elle a pu ouvrir, la production des serres géothermales est devenue une production intensive qui ne prend pas en considération la rareté des ressources naturelles, en l'occurrence l'eau et le sol qui doivent être gérés avec soin pour assurer un développement durable. En effet, et après quelques années, l'irrigation avec l'eau géothermale salée induit la salinisation excessive des sols

et affecte la production des cultures. L'objectif de ce travail est d'analyser cette salinisation pour contribuer à la mise œuvre d'une valorisation durable des eaux géothermales salées.

Les sources géothermales du Sud tunisien sont des exutoires de nappes profondes à l'occasion de failles. Ces eaux sont captées chaudes. Elles ont comme origine des nappes souterraines baignant dans des aquifères de nature très variable allant du calcaire du crétacé et du jurassique jusqu'aux sables du Miocène (Mamou, 1995). On distingue trois nappes :

- la nappe du Continental Intercalaire (CI) dont l'extension dépasse les frontières tunisiennes et qui constitue la nappe la plus profonde. Elle fournit les eaux les plus chaudes (67-70°C) et participe avec 70 % du volume d'eau total destiné aux projets de la géothermie.
- la nappe du Complexe Terminal (CT) qui se trouve surtout au niveau du Jérid et de Nefzaoua (*figure 1*).
- la nappe de Djeffara appelée encore nappe côtière qui se trouve sous la plaine côtière de Gabès et de Médenine (Mamou, 1982).

Le débit potentiel des trois nappes du Sud est d'environ 13 m<sup>3</sup>/s. Concernant le Gouvernorat de Tozeur, les potentialités quantitatives proviennent de deux nappes profondes [4] : le CI avec un débit exploité d'environ 242 l/s et le CT avec un débit d'environ 450 l/s (2004).

La production totale de la campagne 2002, toutes cultures confondues, a été de 9400 tonnes. Par ordre d'importance, la tomate, le concombre et le melon sont les trois principales cultures pratiquées. La culture de tomate produit à elle seule environ deux tiers de la production totale et présente la meilleure rentabilité, surtout en culture d'arrière de saison et en culture continue. Cette culture est destinée principalement à l'exportation.

Dans la majorité des pays, les eaux géothermales relativement saumâtres, refroidies après le chauffage, sont rejetées dans la nature. Selon les normes mondiales (Ayers et Westcot, 1985), leur exploitation pour l'irrigation est déconseillée. C'est uniquement dans les régions méditerranéennes du Sud qui souffrent du manque d'eau qu'elles sont exploitées pour l'irrigation (PNUD/TUN, 1991). Vu les opportunités qu'elles ont offertes pour augmenter la production, notamment des cultures des primeurs, il y a intensification de l'irrigation. Cela provoque une salinisation des sols qui menace la durabilité de la production des cultures et aggrave la raréfaction des terres agricoles dans ces milieux désertiques.

Au niveau chimique, les eaux géothermales du Sud tunisien ont une conductivité électrique (CE) située entre 3,2 et 4,5 dS/m, un résidu sec (RS) entre 2,3 et 4,0 g/l et un taux de sodium adsorbé (SAR) entre 5 et 10 avec une forte teneur en Ca, Mg, Na et Cl. Ces eaux possèdent ainsi des faciès géochimiques chlorurés sulfatés calciques et sont à fort pouvoir de salinisation et à faible pouvoir d'alcalinisation (Ben Hassine *et al.*, 1996). Malgré cela, ces eaux permettent l'irrigation de sols sableux

avec des systèmes bien drainants et assurant l'évacuation des sels (Durand, 1983), (tableau 1).

A côté de la salinité initiale des eaux, les engrais chimiques injectés dans l'eau d'irrigation localisée par goutte à goutte élèvent encore cette salinité d'environ 1 à 1,5 g/l de sels nutritifs (Projet d'Utilisation des eaux Géothermales en Agriculture, PUGA (DG/PA, 1995)). Ils entraînent également l'augmentation de la concentration des ions sodium, chlorure, calcium et magnésium dépassant les seuils critiques de leurs utilisations.

## MATÉRIELS ET MÉTHODES

### Localisation et contexte climatique de la région de Tozeur

La région de Tozeur située au Sud-Ouest de la Tunisie (figure 1) est caractérisée par un déficit climatique élevé. Elle possède un climat saharien caractérisé par une faible pluviométrie (102 mm) et une forte évapotranspiration (ETP) (>1600 mm) rendant le processus de lessivage naturel des sels au niveau du sol très lent (Des pluies irrégulières souvent importantes assurent périodiquement ce lessivage naturel).

### Méthodes

#### Enquête régionale

Sur les trois régions de la Tunisie possédant des serres (environ 10 m de large x 3 m de hauteur) irriguées avec les eaux géothermales, en l'occurrence, Tozeur, Kébili et Gabès, seule la région de Tozeur a été retenue pour mener une enquête sur l'effet de l'emploi des eaux géothermales salées. Cette enquête a été entreprise au cours du mois de novembre 2002 avec l'aide des techniciens des cellules techniques de vulgarisation (CTV) qui sont en relation permanente avec les agriculteurs exploitant des serres. L'enquête a porté sur 200 serres réparties sur les 7 pôles géothermiques de la région de Tozeur (El Khaldi, 2004), soit plus de 41,3 % des 46 agriculteurs qui irriguent avec les eaux géothermales et plus de 47,8 % des 418 serres (CRDA TOZEUR, 2002). Généralement, on a retenu par région trois agriculteurs ayant au moins une dizaine de serres. Deux paramètres étroitement liés à la salinité ont été considérés, en l'occurrence la durée d'irrigation des serres et la nature des cultures. Les données recueillies ont fait l'objet d'une analyse des fréquences par paramètre retenu.

#### Etude de cas

Le périmètre Hamma 1 bis créé en 1994, constitue le pôle géothermique le plus important de tout le Gouvernorat de

Tozeur (figure 2 et figure 3). Au niveau du nombre de serres, la région Hamma apparaît comme le plus grand centre d'utilisation des eaux géothermales avec 70 % des serres (tableau 2). Ces serres sont très concentrées dans l'espace couvrant à peine une vingtaine d'hectares.

La région d'El Hamma 1 bis se trouve à la limite d'un matériau quaternaire constitué d'alluvions et de croûtes gypseuses et d'un matériau tertiaire. La carte hydrogéologique met en évidence la présence de nappes souterraines développées. Leur salinité est supérieure à 3 g/l vers Chott Gharsa. Il s'agit de la nappe du Continental Intercalaire (CI) située entre 1500 et 2600 m de profondeur et celle du Complexe Terminal (CT) située entre 100 et 700 m. Concernant les sols de la région, ils sont soit peu évolués d'apport alluvial et éolien à encroûtement gypseux variable à quelques centimètres à environ 1 m de profondeur, faiblement salés (< 2 dS/m), soit calcimagnésimorphes à encroûtement gypseux (CPCS, 1967).

Les serres occupent environ 21 ha. Les principales cultures pratiquées sont la tomate, l'aubergine, le piment, le melon, le concombre, la pastèque et le gombo. Les 15 serres qui ont fait l'objet du suivi appartiennent à cinq agriculteurs. Chacune couvre 500 à 512 m<sup>2</sup> (8,5 m de largeur sur 60 m de longueur). Pour analyser la durabilité de la production des serres géothermales, le facteur âge ou ancienneté de l'irrigation dans la même serre a été retenu comme élément de base. Dans ce sens, on a choisi trois serres par âge de 1 à 6 ans (il n'existe pas de serres d'âge 5 ans).

### Les eaux et le système d'irrigation

Les eaux proviennent de deux forages dans la nappe du CI. La température de l'eau est comprise entre 65 à 70°C. Elle est refroidie avant son utilisation. Chaque agriculteur possède son propre bassin de stockage d'eau. L'apport journalier est d'environ 3 m<sup>3</sup>/jour/serre pendant les périodes chaudes (mai / juin) et 0,8 m<sup>3</sup> pendant les périodes favorables. L'irrigation se fait par goutte à goutte. Les engrais sont dissous dans l'eau et incorporés à l'eau d'irrigation. Un apport de fumure de fond d'origine ovine à raison de 5 tonnes/500 m<sup>2</sup> est pratiqué avant l'installation de chaque culture.

Pour caractériser les eaux d'irrigation, des échantillons ont été prélevés auprès de cinq agriculteurs du périmètre de Hamma 1 bis.

### Suivi de terrain et mesures

Le suivi de terrain a été entamé au mois de décembre 2002, correspondant au début de la campagne culturale des primeurs (culture de tomate pour toute les serres) et c'est poursuivi jusqu'au mois de juin 2003. Il a concerné 15 serres. L'échantillonnage du sol a comporté trois phases :

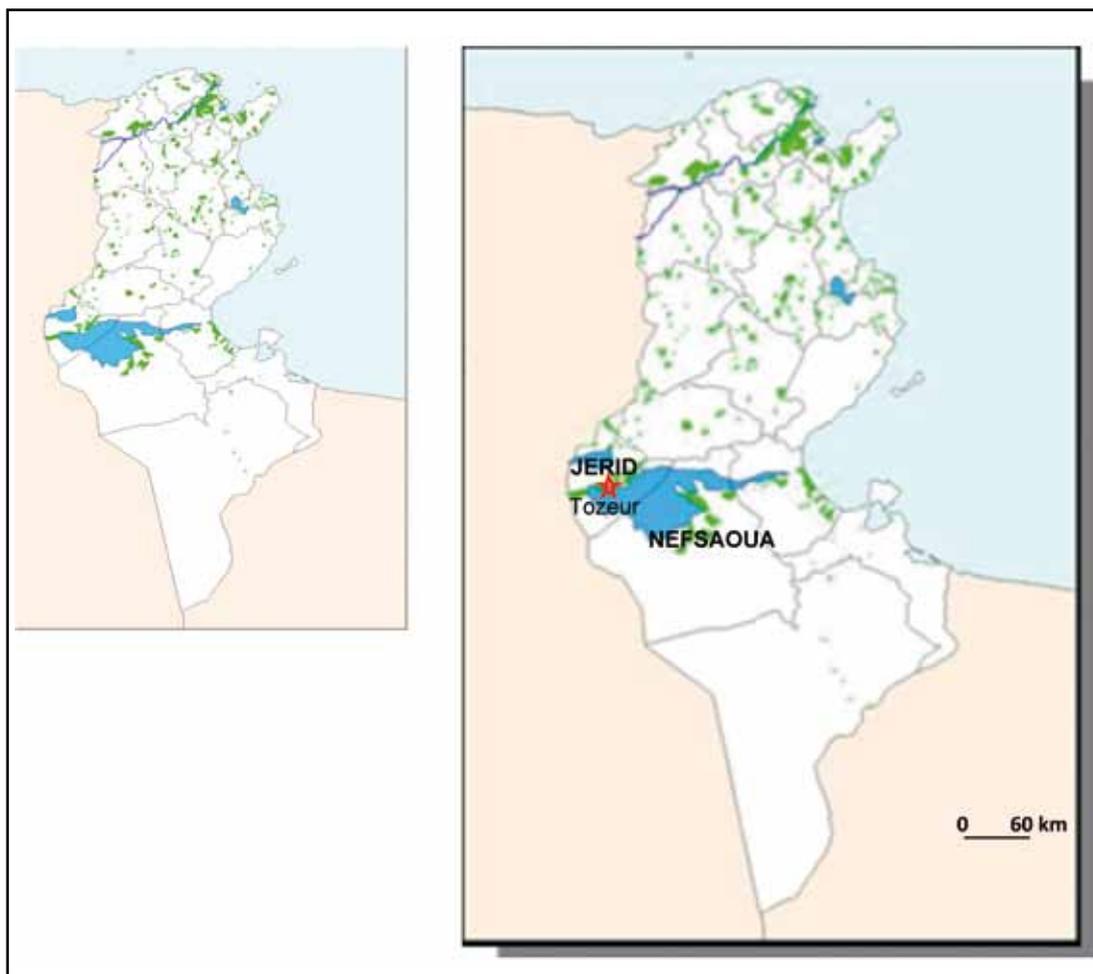
- une phase initiale : l'échantillonnage a été effectué sur plusieurs profondeurs afin de caractériser les sols étudiés et leur état de salinité,

**Figure 1 :**

Localisation des régions du Jérid, Nefsaoua et de Tozeur.

**Figure 1 :**

Localization of Jérid, Nefsaoua and Tozeur regions.

**Tableau 1 :** Composition chimique des eaux géothermales (Ben Hassine et al., 1996).**Table 1 :** Chemical composition of the geothermic waters (Ben Hassine et al., 1996).

Forage	Date	pH	CE dS/m	RS g/l	Bilan ionique (méq/l)							
					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SAR
<b>Hamma CI1b</b>	<b>26-2-96</b>	<b>7,0</b>	<b>3,2</b>	<b>2,3</b>	<b>15,3</b>	<b>3,0</b>	<b>17,0</b>	<b>1,3</b>	<b>14,5</b>	<b>19,6</b>	<b>5,0</b>	<b>5,6</b>
Tozeur CI12	26-2-96	6,9	4,5	3,2	19,6	3,9	28,0	1,3	31,8	20,0	4,0	8,2
Limaguess CI12	27-2-96	7,7	3,5	2,5	15,2	6,0	14,3	1,1	16,4	18,3	4,0	4,4
Douze CI12	27-2-96	7,0	5,5	4,0	16,5	7,0	37,0	1,0	41,0	16,6	5,0	10,8
Oum El Farth	26-3-96	7,4	3,5	2,5	14,2	7,0	15,2	1,1	18,3	16,1	5,0	4,7
Saidane	26-3-96	7,3	3,8	2,9	18,6	6,0	17,5	0,9	18,3	21,8	5,0	5,0
Jemna	4-3-96	7,5	4,0	3,0	12,5	6,0	23,8	1,0	20,4	17,7	5,0	7,8
Chenchou 1	4-3-96	7,5	4,7	3,3	19,5	8,0	16,5	1,0	20,4	22,4	4,0	4,5
Khebayat CF1b	15-3-96	7,9	4,0	2,9	17,9	8,0	12,6	1,0	14,5	24,2	2,0	3,5
Khebayat CF3b	15-3-96	7,9	3,9	2,8	19,2	8,0	12,4	1,0	13,4	21,8	5,0	3,4
Jardin du Sud	15-3-96	7,2	4,4	3,2	20,2	6,0	21,4	1,9	24,6	23,0	4,0	5,9

**Figure 2 :** Localisation du périmètre Hamma 1 bis (Images Google).

**Figure 2 :** Localization of Hamma 1 bis area (Google Images).



**Figure 3 :** Localisation des serres dans le périmètre Hamma 1 bis (Images Google).

**Figure 3 :** Localization of the greenhouses in Hamma 1 bis area (Google Images).



**Tableau 2** : Nombre de serres et d'agriculteurs dans les différents périmètres géothermiques de Tozeur (11/2002).**Table 2** : Number of greenhouses and farmers in the different geothermic areas of Tozeur (11/2002).

Région	Nombre d'agriculteurs		Nombre de serres		% Serres	
	Total	enquêtés	Total	Enquêtées	Total	Enquêtées
Tozeur 1	7	3	56	42	13,4	21,0
Tozeur 2	5	3	32	19	7,7	9,5
Nefta	2	2	35	35	8,4	17,5
Hamma 1	5	3	74	34	17,7	17,0
Hamma 2	10	3	103	35	24,6	17,5
Hamma 1 bis	17	5	118	35	28,2	17,5
Total	46	19	418	200	100	100

Le nombre de serres par agriculteur était de 4 à 20 serres. Généralement, trois agriculteurs possédant plus d'une dizaine de serres soit plus d'une trentaine de serres ont été sélectionnés par région. Cela n'était pas possible dans le cas de la région de Nefta (2 agriculteurs seulement). Il a été également augmenté dans Hamma 1 bis qui a fait l'objet d'une étude approfondie.

- une phase de suivi mensuel : il a intéressé des serres de 1 et 4 ans,
- une phase finale : l'échantillonnage a été réalisé vers le mois de juin 2003 (fin de la campagne de culture).

Pour chaque serre, des échantillons de sol ont été prélevés au niveau de trois endroits : début, milieu et fin de la ligne des goutteurs d'eau à l'intérieur de la serre. Pour chaque profondeur, un échantillon composé a été obtenu par mélange des échantillons des trois lieux. L'échantillon composé est considéré représentatif d'une serre. La profondeur du sol retenue est de 45 cm. Cette profondeur est subdivisée en trois couches: 0-15, 15-30 et 30-45 cm.

### Analyses sur les sols et les eaux

Les échantillons du sol ont subi les analyses suivantes : granulométrie, teneur en gypse et conductivité électrique dans l'extrait de la pâte saturée du sol (CEe). Pour les eaux d'irrigation, la CE, le pH, les sels solubles (Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> et K<sup>+</sup>) et le RS (résidu sec) ont été déterminés.

### Traitement des données

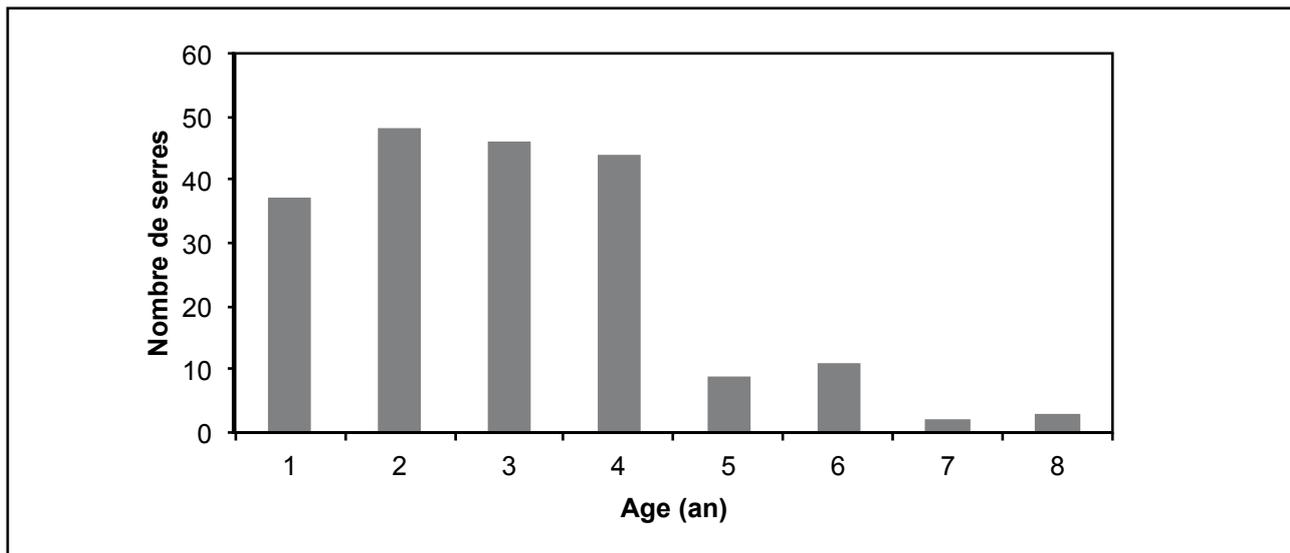
Les données ont fait l'objet d'une analyse statistique sommaire et d'analyses approfondies grâce aux logiciels STATITCF (Beaux et al., 1991) et STATISTICA Ver.5 (STATSOFT-France, 1998). Une analyse de la variance par le test de Fisher-Snedecor au seuil de risque de 5 % a été également réalisée.

## RÉSULTATS

### Tendance régionale de la variation de la salinité

L'enquête entreprise à l'échelle de la région de Tozeur a mis en évidence deux aspects relatifs à l'évolution temporelle de la salinité des sols :

- l'âge des serres : les serres irriguées depuis 1, 2, 3 et 4 années sont les plus fréquentes (environ une quarantaine ; *figure 4*). A partir de la cinquième année, le nombre chute significativement (une dizaine) pour atteindre une valeur très faible à partir de la septième année (2 à 3 serres; *tableau 3*). La salinisation de plus en plus excessive des sols ainsi que le développement de certaines maladies, principalement les nématodes, sont à l'origine de la chute de production des serres. Par ailleurs, l'irrigation des serres géothermales dans la région de Tozeur a connu un essor au début vers la fin des années quatre-vingt. Puis, plusieurs problèmes sont apparus qui ont induit une stagnation relative du nombre de serres et de la surface cultivée qui s'est stabilisée aux environs de 25 ha (CRDA TOZEUR, 2002). Les principaux problèmes sont la baisse de la température diurne dans les serres (Mougou et Verlodt, 1991), la salinisation des sols, la prolifération des nématodes et l'entartrage des conduites d'irrigation. Ce n'est que récemment que le secteur a connu un nouveau départ ;
- la nature des cultures : les principales cultures pratiquées dans les serres sont par ordre d'importance : la tomate, le melon et le concombre (*tableau 4*). Ce sont les principales cultures de primeurs appréciées par les consommateurs. La tomate, qui vient en tête, est une culture continue qui occupe la serre pendant toute la campagne. Compte tenu de sa sensibilité moyenne à la salinité (Ayers et Westcot, 1985), on la

**Figure 4** : Répartition des serres selon la durée d'irrigation (âge) – Tozeur (11/02).**Figure 4** : Distribution of the greenhouses according the duration of irrigation (age) – Tozeur (11/02).**Tableau 3** : Répartition des serres selon la durée d'irrigation et par périmètre (11/2002).**Table 3** : Distribution of the greenhouses according the irrigation duration and by area (11/2002).

Age	Périmètres											
	Tozeur 1		Tozeur 2		Nefta		Hamma 1		Hamma 2		Hamma 1 bis	
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
1	5	11,9	12	63,2	8	22,9	2	5,9	6	17,1	4	11,4
2	14	33,3	4	21,1	13	37,1	10	29,4	1	2,9	6	17,1
3	17	40,8	1	5,3	2	5,7	16	47,1	0	0,0	10	28,6
4	4	9,5	2	10,5	2	5,7	6	17,7	21	60,0	9	25,7
5	0	0,0	0	0,0	2	5,7	0	0,0	7	20,0	0	0,0
6	0	0,0	0	0,0	8	22,9	0	0,0	0	0,0	3	8,6
7	2	4,8	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
8	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	3	8,6
Total	42	100	19	100	35	100	34	100	35	100	35	100

retrouve dans les serres irriguées depuis 2 à 5 ans. Ses besoins en eau varient entre 0,5 l/m<sup>2</sup> en début de culture et 1,1 l/m<sup>2</sup> en pleine croissance (DG/PA, 1995). Le melon arrive en deuxième position. Il n'occupe que les serres neuves irriguées pour la première fois et quelques serres irriguées pour la deuxième année. Cette culture, également de sensibilité moyenne à la salinité, semble toutefois pour la variété cultivée de moindre sensibilité que la variété de tomate utilisée.

## Tendance de la variation de la salinité à l'échelle de Hama 1 Bis

### Salinité des eaux d'irrigation

Les eaux géothermales de Hamma 1 sont neutres à faiblement basiques (7 < pH < 7,8), (tableau 5). Leur résidu sec (RS) varie entre 2,5 et 3,0 g/l, leur conductivité électrique (CE)

**Tableau 4** : Répartition des serres selon les cultures.**Table 4** : Distribution of the greenhouses according the crops.

Cultures	Périmètres													
	Tozeur 1		Tozeur 2		Nefta		Hamma 1		Hamma 2		Hamma 1 bis		Total par culture	
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
Tomate	11	26,2	4	21,1	6	17,1	9	26,5	9	25,7	13	37,1	52	26,0
Melon	7	16,7	4	21,1	12	34,3	4	11,8	12	34,3	6	17,1	45	22,5
Concombre	5	11,9	4	21,1	7	20,0	7	20,6	7	20,0	6	17,2	36	18,0
Comcombre locale (Fekkous)	9	21,4	7	36,8	0	0,0	11	32,4	2	5,7	4	11,4	33	16,5
Aubergine	2	4,8	0	0,0	1	2,9	3	8,8	0	0,0	1	2,9	7	3,5
Pastèque	0	0,0	0	0,0	3	8,6	0	0,0	1	2,9	0	0,0	4	2,0
Piment	8	19,1	0	0,0	4	11,4	0	0,0	3	8,6	2	5,7	17	8,5
Poivron	0	0,0	0	0,0	2	5,7	0	0,0	0	0,0	0	0,0	2	1,0
Gambo	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	1	2,9	3	8,6	4	2,0
Total par périmètre	42	100	19	100	35	100	34	100	35	100	35	100	200	100

**Tableau 5** : Caractéristiques des eaux d'irrigation – El Hamma 1 bis – 10/12/2003.**Table 5** : Characteristics of the irrigation waters – El Hamma 1 bis – 10/12/2003.

Agriculteurs	pH	CE dS/m	RS g/l	Composition ionique (méq/l)							SAR
				Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	
Hakim RADADI	7,8	3,7	2,5	20,3	3,0	20,9	1,4	17,9	27,6	4,0	6,1
Mahmoud RADADI	7,1	4,2	3,0	19,5	2,0	26,6	1,0	14,9	30,0	4,0	8,1
Abd El Kader RADADI	7,0	4,2	2,5	19,3	2,5	25,9	1,1	14,9	30,0	4,0	7,8
Mourad KEBIR	7,0	4,3	3,0	20,0	3,0	25,0	1,1	16,0	32,9	5,0	7,7
Ali JMOUI	7,2	4,2	3,0	20,0	2,5	24,0	1,1	14,0	30,0	4,0	7,2

entre 3,7 et 4,2 dS/m et leur taux d'adsorption du sodium (SAR) entre 6,1 et 8,1. Il s'agit d'eaux à faciès géochimique sulfatées chlorurées sodiques. Leur composition cationique est à Na<sup>+</sup> dominant, suivi de près par le Ca<sup>2+</sup>. La composition anionique est à sulfate dominant. L'élément chlore ne se trouve qu'en deuxième position.

### Salinité des sols irrigués

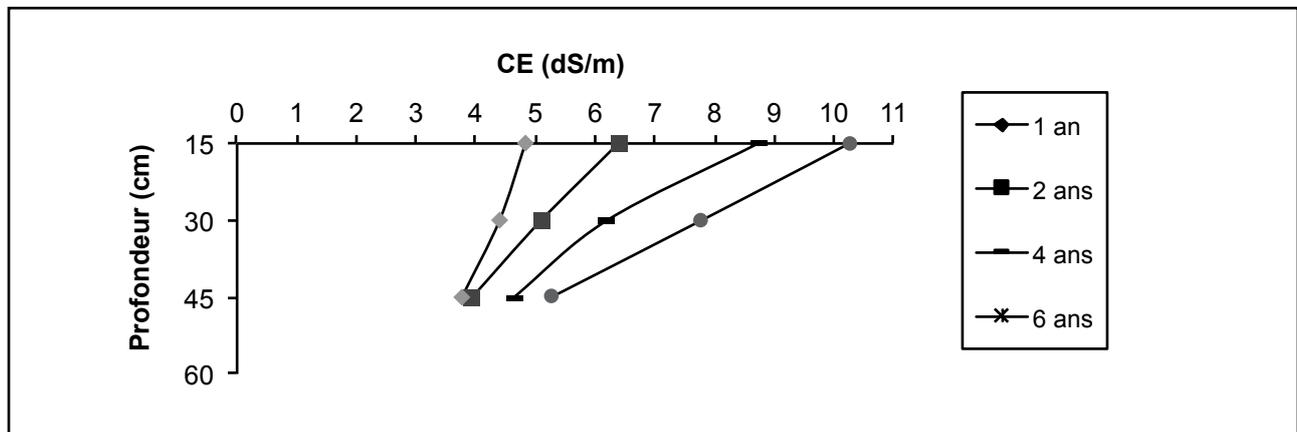
Les sols de Hamma 1 bis sont constitués de 80 à 95 % de sable, 1,5 à 8 % de limon et 3 à 7 % d'argile. Ils sont riches

en gypse: environ 3,8 à 6,4 % ayant un pH compris entre 7,7 et 8,6 et une salinité initiale (CEe) est de l'ordre de 3,5 dS/m. Les teneurs en matière organique sont très faibles (< 1 %) et la capacité d'échange cationique (CEC) ne dépassent guère 3 méq/100 g essentiellement occupée par Ca<sup>2+</sup>. L'irrigation a entraîné une élévation de la salinité du sol en surface et une augmentation de sa dispersion (*tableau 6*). A la fin du premier cycle d'irrigation, cette salinité a atteint 6 dS/m au niveau de la couche 0-15 cm. La même tendance a été observée dans les couches 15-30 cm et 30-45 cm mais d'une manière plus

**Tableau 6** : Analyse de la variance de la CEe début-fin du cycle de la culture.**Table 6** : Variance analysis of ECE start – end crop cycle.

	CEe moyenne (dS/cm)	Min.	Max.	C.V. (%)
Décembre	6,1 a	3,5	11,3	33,6
Juin	6,9 b	3,5	11,4	28,1

Les moyennes suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil 5 % (test de Newman-Keuls).

**Figure 5** : Profils de la salinité du sol – Tozeur (2003).**Figure 5** : Soil salinity profiles – Tozeur (2003).

modérée (figure 5). Pour les serres de 4 ans, la salinité est restée assez constante entre 8 et 10 dS/m au niveau de la couche 0-15 cm. Elle a atteint dans certaines serres irriguées depuis 6 ans, la valeur critique de 11,5 dS/m. La variabilité de la CEe était très faible avant l'irrigation ( $CV = \text{Coefficient de Variation}$ ;  $CV < 5\%$ ), faible à moyenne après le premier cycle d'irrigation ( $10\% < CV < 17\%$ ) et moyenne à élevée après 4 années d'irrigation ( $33\% < CV < 36\%$ ). Une analyse de la variance de la salinité a été entreprise en utilisant le test de Fischer au seuil de 5. La différence entre la salinité initiale et celle à la fin d'un cycle d'irrigation était hautement significative. Il en est de même pour l'âge des serres (nombre de cycles successifs d'irrigation) et la profondeur du sol (tableau 7).

Le bilan salin égal au stock de sels final (Sf) – stock de sels initial (Si), peut être quantifié par unité d'espace selon la formule suivante (Cruesi, 1970)

$$S = C \cdot Da \cdot P \cdot E \cdot 100$$

Avec :

S : stock salin dans une tranche de sol (Kg/ha)

C : concentration de la solution du sol (g/l) =  $CEe \cdot 0,7$

Da : densité apparente ( $g/cm^3$ )

P : pourcentage de saturation (%)

E : épaisseur du sol (m)

Ce bilan révèle un régime salin additif correspondant à une augmentation du stock de sels. Il est plus marqué au niveau de la couche superficielle. Ceci traduit un lessivage des sels réduit engendré par un régime d'irrigation inadapté à la qualité de l'eau. Au niveau de la couche 0-15 cm, le stock salin évolue d'une manière décroissante avec l'âge (tableau 8). En effet, l'irrigation à l'eau géothermale a induit une augmentation du stock d'environ 29 % au niveau des serres de 1 an, 8 % au niveau des serres de 2 ans et devenait négligeable après 6 ans d'irrigation. Pour une serre de 500 m<sup>2</sup> nécessitant un apport de 0,8 à 3 m<sup>3</sup> par jour (moyenne exigée par la plupart des cultures des primeurs), 2,4 à 9 kg de sels sont apportés par jour ce qui correspond à 470 à 1764 kg/serre/saison agricole soit environ 1 à 3 kg/m<sup>2</sup>.

## DISCUSSION ET CONCLUSION

Compte tenu du contexte saharien, de la salinité élevée des eaux géothermales et du régime de culture intensif (surface cultivée en permanence et irrigation continue), les problèmes de salinisation apparaissent très rapidement dans les serres irriguées par ces eaux. Généralement, la mise en irrigation

**Tableau 7** : Analyse de la variance : Test de Fischer au seuil de 5%.**Table 7** : Variance analysis: Fisher test at the level 5 %.

Source de variation	Test F		Probabilité	
	1,4 (suivi mensuel)	2,3 et 6 (suivi semestriel)	1,4 (suivi mensuel)	2,3 et 6 (suivi semestriel)
Age (durée d'exploitation)	102,56	35,84	0,0000	0,0000
Date (mensuelle ou semestrielle)	<b>0,98</b>	8,45	<b>0,4437</b>	0,0061
Profondeur du sol	<b>47,70</b>	56,61	<b>0,0000</b>	0,0000
Age*date	<b>0,29</b>	0,22	<b>0,9376</b>	0,8021
Age *profondeur	<b>17,17</b>	4,15	<b>0,0000</b>	0,0073
Date*profondeur	<b>0,10</b>	0,94	<b>0,9900</b>	0,4008
Age*date*profondeur	<b>0,03</b>	0,13	<b>0,9900</b>	0,9686

**Tableau 8** : Le bilan salin pour un cycle cultural (en %) pour différents âges et profondeurs.**Table 8** : Salt balance for one crop cycle (in %) for different ages and depths.

Prof. (cm)	1 an	2 ans	3 ans	4 ans	6 ans
0-15	29,4	8,2	7,3	6,0	0,1
15-30	34,6	40,0	16,2	14,9	17,2
30-45	17,8	23,3	25,9	2,4	6,7

d'une nouvelle région se traduit par l'apparition au bout de quelques années (4 à 5 années), d'une salinisation assez grave. Cette salinisation affecte la couche de surface puis progresse au cours du temps pour affecter les couches profondes. Les effets de cette salinisation se répercutent sur la nature des cultures et les pratiques culturales.

Pour y remédier, chaque agriculteur puise dans son expérience personnelle, les solutions préconisées par ses voisins ainsi que les consignes des services techniques, pour concevoir des formes adaptées à son contexte. Ainsi, les agriculteurs apparaissent comme des participants actifs au développement de systèmes de gestion appropriés et les créateurs principaux de solutions techniques de leurs problèmes. Leurs pratiques sont généralement une combinaison de techniques agronomiques et de gestion qui dépendent largement de la disponibilité en eau, des conditions climatiques, des cultures et des moyens financiers. Ces formes de gestion de la salinité développées par les agriculteurs eux-mêmes méritent d'être étudiées pour les réhabiliter et les transférer vers d'autres agriculteurs et périmètres géothermiques. En particulier, on trouve, par ordre d'importance décroissant (*tableau 9*)

- la rotation des cultures : c'est une technique très répandue. Dans le contexte des périmètres géothermiques, il s'agit d'une succession de cultures de plus en plus tolérantes à la salinité cultivées sur le même sol. Dans la région de Tozeur, cette succession est généralement la suivante : melon seulement la première année quand le sol est vierge ou moins fréquemment la deuxième année, tomate pendant deux à trois années, puis concombre pour une à deux années ;
- la rotation des serres : c'est également une pratique très répandue en Tunisie pour gérer la salinité. Au bout de quelques saisons agricoles, la serre est démontée et remontée dans l'espace entre les serres. Le sol salinisé est ainsi mis en repos pour une période de quelques années en comptant sur les rares pluies pour lessiver les sels. Malgré leur rareté et leur irrégularité, deux à trois pluies d'intensité supérieure à 10 mm surviennent presque chaque année ;
- l'amendement sableux : il s'agit d'une technique physique qui consiste à apporter des matériaux sableux ramenés des dunes limitrophes. Le sol enterré ainsi celui précédemment cultivé et salinisé. L'apport d'un sol sur une épaisseur d'environ 30 cm résout ainsi le problème de la salinisation. Il diffère de l'amendement sableux pratiqué dans les oasis qui est

**Tableau 9** : Techniques pratiquées par les agriculteurs du périmètre Hama 1 bis pour la gestion de la salinité.**Table 9** : *Technics used by the farmers of Hama 1 bis area for salinity management.*

Techniques	Importance	Succès	Contraintes
Rotation des cultures	Très répandue	Court et moyen terme	Impossible après salinisation excessive du sol
Rotation des serres	Très répandue	Long terme	Disponibilité de ressources en sol Opération peu coûteuse
Amendement sableux	Très répandu	Court et long terme	Disponibilité de ressources en sol Opération coûteuse
Lessivage estival des sels	Peu répandu	Court et moyen terme	Manque de vulgarisation
Déplacement vers une zone vierge	Peu répandu	Court terme	Disponibilité de terrain vierge de l'Etat
Culture hors sol	Répandu	Court et long terme	Disponibilité du substrat Très coûteuse
Rotation des sols	Peu répandue	Court terme	Impossible après salinisation excessive du sol

préconisé pour réduire l'effet de la remontée de la nappe et du mauvais drainage ;

- le lessivage estival des sels : il s'agit d'une technique hydraulique pratiquée par certains agriculteurs pour lutter contre les nématodes. A la fin du cycle cultural et en période estivale de forte chaleur vers les mois de juillet –août, ils inondent le sol de la serre (environ 10 cm de hauteur en deux à trois fois) par de l'eau chaude (>60 °C) causant la mortalité des nématodes dans la couche superficielle du sol. Cette pratique entraîne involontairement la lixiviation des sels permettant la remise en culture du sol désalinisé. Quand ce lessivage est inefficace à cause d'une quantité d'eau appliquée insuffisante pour entraîner les sels suffisamment en profondeur, ou d'un état de surface battant peu perméable, la désalinisation est incomplète, ce qu'atteste l'évolution progressive de la salinité du sol même dans les serres traitées. La combinaison de cette forme d'irrigation de surface et de l'irrigation localisée permet d'éviter l'accumulation excessive des sels dans la zone racinaire ;

- le déplacement vers une zone vierge : il est peu fréquent. Il est possible dans quelques régions désertiques où existent des sols proches de la source d'eau et aptes à l'irrigation moyennant un terrassement. La salinisation est contournée par la mise en valeur d'un sol vierge. C'est une pratique individuelle ou collective ;

- la culture hors sol sur un substrat plus ou moins inerte

(perlite, sable, etc): c'est une pratique utilisée surtout dans la région de Gabès ;

- la rotation des sols : c'est une technique peu pratiquée. il s'agit de cultiver dans l'interligne des cultures de l'année précédente dans la même serre. Le sol salinisé par l'irrigation localisée est mis en repos au profit du sol situé à 50 cm de celui-ci et qui a été faiblement affecté par l'irrigation.

Les pratiques précédentes constituent un moyen pour réduire la salinité. Elles ont très souvent réussi à gérer la salinité et à améliorer la production agricole. Entre les années 1980 et 2000, chaque nouvelle création de périmètre géothermique a souffert de la salinité durant les 10 premières années. Progressivement, des formes de gestion de la salinité adaptées ont été préconisées par les agriculteurs. Dans les périmètres qui ont déjà une trentaine d'années d'exploitation, une certaine durabilité semble s'instaurer. Toutefois, cette durabilité serait mise en cause si la ressource en eau se raréfie et/ou se dégrade ou encore si les pluies se faisaient plus rares (changement climatique et aridification/désertification de ces milieux). Par ailleurs, aucune étude technique ou économique n'a à ce jour été entreprise sur ces formes de gestion de la salinité. Toutefois, l'instauration d'un système intensif et durable de cultures des primeurs s'avère difficile. De ce fait, satisfaire l'intensification du secteur des primeurs et assurer la durabilité des caractéristiques des sols restent un défi à relever.

**BIBLIOGRAPHIE**

- Ayers R.S. et Westcot D.W., 1985 - Water quality for agriculture. Bulletin FAO for irrigation and drainage paper n° 29.1, 174 pages.
- Baccouche M., 1988 - Influence de différents systèmes de chauffage géothermique sur la distribution des températures et sur la croissance et le développement du melon et de tomate sous abris plastiques. Mémoire de fin d'études de cycle de spécialisation. INAT Tunis; 80 pages.
- Beaux M. F., Gouet H., Gouet J.P., Morghem P., Philippeau G., Tranchefort J. et Verneau M., 1991 - Manuel d'utilisation du Logiciel STATITCF. Imprimerie Institut Technique des Céréales et des Fourrages - France.
- Ben Hassine H., Zidi Ch., Bouksila F. et Mtimet A., 1996 - Les cultures sous serres irriguées par les eaux géothermales dans le Sud Tunisien (Tozeur, Kébili et Gabès). Document méthodologique des données de base (eau et sol). Direction des Sols – Tunisie, 32 pages.
- Ben Mohamed M., 2003 - Geothermal resource development in agriculture in Kebili region, South Tunisia. Revue Geothermics. European geothermal conference (EGC 2003). Ed. Elsevier, 32, 4-6, pp. 505-511.
- CPCS. 1967 - Classification des sols. Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols. 96 pages. Paris.
- CRDA TOZEUR. 2002 - Données brutes sur le nombre de serres et les cultures pratiquées.
- Crusei., 1970 - Recherche et formation en matière d'irrigation avec des eaux salées. Rapport technique : 1962-1969. PNUD/UNESCO : 256 pages.
- DG/PA, 1993 - Ministère de l'Agriculture Tunisie. Stratégie nationale d'utilisation des eaux géothermales en agriculture, 30 pages.
- DG/PA, 1995 - Ministère de l'Agriculture Tunisie. Projet géothermie : Technologie et géothermie, 30 pages.
- Durand J.H., 1983- Les sols irrigables. Etude pédologique. Edition ACCT-PUF, 217 pages.
- EL Khaldi R., 2004 - Durabilité du système de production des cultures en serres géothermales : effet de l'irrigation avec l'eau salée dans le périmètre Hamma 1 bis (Tozeur). Mémoire de Mastère INAT; 109 pages.
- Lund J. W., 2009 - Development and utilization of geothermal resources. Proceedings of ISES World congress. Ed. Springer Berlin Heidelberg, pp. 87-95.
- Mamou A., 1982 - Caractéristiques hydrogéologiques des nappes profondes du Sud. Journées scientifiques des régions arides 22/02-01/03/1982, 12 pages.
- Mamou A., 1995 - Incidence de l'exploitation des nappes du Sud Tunisien dans les oasis sur la qualité chimique de leurs eaux. In « Sols de Tunisie N° 15 » bulletin de la Direction des Sols. Direction des Sols – Tunisie, pp. 12-25.
- Mougou R. et Verlodt H., 1991 - Le pilotage du chauffage des serres par les eaux géothermales. Revue de l'INAT, 6, 2, pp. 103-115.
- Ouali S., Khallaf A. et Baddari K., 2006 - Etude géothermique du Sud de l'Algérie. Revue des énergies renouvelables, 9, 4, pp. 297-306.
- PNUD/TUN 1991 - Les documents techniques de l'utilisation de la géothermie dans le chauffage des cultures sous serres : Ministère de l'Agriculture – Tunisie, DG/PA Rapport de synthèse, 8, pp. 499-542.
- Said A., 1998- Utilisation des eaux géothermales dans la production des cultures sous serres chauffées dans le gouvernement de Gabès : Diagnostic, contraintes et perspectives. CRDA Gabès, 12 pages.
- Said M., 2002 - Les cultures sous abri serres chauffées par les eaux géothermales : Situation actuelle, contraintes et méthodes de développement. CRDA Gabès, 7 pages.
- STATSOFT-FRANCE. 1998 - Logiciel de statistique, analyses des données Statistica version V. Statsoft, inc. USA, 180 p.
- Verlodt H., 1983 - Amélioration du bilan thermique sous abris serres. *Tropicultura*, 2, pp. 39-44.

