



LR VENC Tunis



**CRDA
Kairouan**



Institut de recherche
pour le développement

IRD Paris

**Caractérisation, fonctionnement et remédiation des sols argileux salés,
sous conditions naturelles et irriguées avec les eaux salées
dans la plaine du Sisseb-Kairouan (Tunisie Centrale)**

Rapport d'avancement 2015



Bessma ZARAI et Malek HADJ SALEM

**Mohamed HACHICHA, Hend ASKRI (INRGREF)
Jean-Pierre MONTOROI, Georges NIZINSKI (IRD)
*Encadrants scientifiques***

**Mohamed LASSOUED (INRGREF)
*Contribution technique***

Convention INRGREF/IRD – Convention INRGREF/CRDA Kairouan

Octobre 2015

Table des Matières

I.	INTRODUCTION	3
II.	LA REGION DE KAIROUAN	4
1.	Climatologie	4
2.	Géologie	6
3.	Hydrologie	6
4.	Pédologie	6
III.	EXPLOITATION AGRICOLE DE M. HABIB SEBRI	7
1.	Localisation	7
2.	Occupation du sol et système d'exploitation agricole	8
IV	ACTIVITES SCIENTIFIQUES EN 2015	10
1.	Sites expérimentaux	10
2.	Caractérisations climatologique, pédologique et hydrogéologique du site expérimental S1	11
2.1.	Description du sol	11
2.2.	Distribution verticale de la salinité du sol	13
2.3.	Suivi météorologique local	14
2.4.	Suivi hydrique du sol	15
2.5.	Suivi hydro-salin du sol	16
2.6.	Suivi piézométrique de la nappe superficielle	17
2.7.	Suivi de la qualité chimique des eaux d'irrigation	19
3.	Distribution spatiale des propriétés hydro-salines du sol du site expérimental S2	20
3.1.	Cartographie de la salinité globale du sol	20
3.1.1.	Cartographie de la salinité globale en surface (0-1,8 m)	20
3.1.2.	Suivi par la méthode des extraits aqueux des échantillons de sol	21
3.1.3.	Cartographie de la salinité globale en profondeur (0-6 m)	24
3.2.	Cartographie de la topographie	25
3.3.	Suivi de la qualité chimique d'une nappe localisée à faible profondeur	26
4.	Suivi phénologique, morphologique et physiologique de la plantation de grenadiers des sites expérimentaux S1 et S2	27
4.1.	Observations phénologiques	27
4.2.	Développement morphologique des grenadiers	28
4.3.	Développement morphologique du feuillage des grenadiers	32
4.4.	Suivi de l'évolution stomatique des feuilles	33
4.5.	Collecte des données nécessaires à la modélisation	35

I. INTRODUCTION

En 2014, un programme de recherche intitulé « *Caractérisation, fonctionnement et remédiation des sols argileux salés, sous conditions naturelles et irriguées avec les eaux salées dans la plaine du Sisseb-Kairouan (Tunisie Centrale)* » a été proposé dans le cadre des conventions IRESA-INRGREF/IRD-UMR IEES-Paris et INRGREF/CRDA-Kairouan.

En 2015, deux projets de thèse conjoints ont été initiés pour mener des opérations de recherche relatives à l'étude du système « *Sol-Eau-Plante* » au sein du laboratoire de Recherche « *Valorisation des Eaux Non Conventionnelles* » (LR VENC, INRGREF, Tunis) et de l'Unité Mixte de Recherche « *Institut d'Ecologie et des Sciences de l'Environnement de Paris* » (UMR IEES-Paris, IRD, Bondy).

L'un des projets privilégie la composante « *Sol-Eau* » et a pour objectif l'étude de la « *Remédiation des sols argileux salés sous conditions naturelles et irriguées avec les eaux salées dans la plaine du Sisseb-Alem, région de Kairouan (Tunisie Centrale)* ». Bessma ZARAI, officiellement inscrite en Doctorat à l'INA de Tunis, réalise l'étude et est encadrée par Mohamed HACHICHA (INRGREF) et Jean-Pierre MONTOROI (IRD).

Le second projet concerne plus spécifiquement la composante « *Eau-Plante* » et a pour objectif l'étude de l'« *Optimisation de l'utilisation des ressources en eau d'une plantation de grenadier (Punica granatum L.) dans un sol argileux hypersalin et sodique, en milieu semi-aride (Sisseb-Kairouan)* ». Malek HADJ SALEM conduit l'étude et est encadrée par Mohamed HACHICHA, Hend ASKRI (INRGREF) et Georges NIZINSKI (IRD).

Le présent rapport présente brièvement les activités scientifiques réalisées en 2015 dans une exploitation agricole de la région de Kairouan.

II. LA REGION DE KAIROUAN

1. Climatologie

La région appartient au climat aride supérieur fortement influencé par la mer Méditerranée. Les conditions climatiques sont très variées avec de nets écarts journaliers et saisonniers. On distingue principalement deux saisons :

- ✓ une saison sèche allant d'avril à septembre et caractérisée par des températures élevées et des pluies quasi-absentes, notamment en été.
- ✓ une saison plus ou moins pluvieuse allant du mois d'octobre à mars et caractérisée par des températures basses, surtout en hiver.

Les principales données climatiques, obtenues sur la période 2004-2010 à la station météorologique de Kairouan (réseau national) sont présentées dans le tableau 1. Les données de l'année 2015 proviennent du site internet « www.infoclimat.fr ».

Tableau 1. Moyennes mensuelles et annuelles climatiques sur la période 2004-2010.
La valeur annuelle de P et ET_0 est le cumul des moyennes mensuelles.
 ET_0 est calculée à partir de la formule de Penman-Monteith
(station météorologique de Kairouan).

	T °C	T-Max °C	T-Min °C	Hr %	Pluie mm mois ⁻¹	u m s ⁻¹	Rg W m ²	ET ₀ mm j ⁻¹
Janvier	10,9	16,9	5,5	82,0	43,7	3,0	133,3	1,46
Février	12,1	18,0	6,3	74,5	13,1	3,9	151,4	2,39
Mars	14,3	21,0	7,7	72,7	29,8	4,1	186,5	3,08
Avril	18,0	24,7	11,6	73,3	27,3	4,0	214,6	3,87
Mai	22,5	30,1	14,8	64,0	20,7	3,8	304,1	6,33
Juin	26,3	34,4	18,2	59,8	13,7	3,4	278,7	7,67
Juillet	29,8	38,2	21,0	55,5	2,2	3,2	345,9	9,07
Août	24,4	31,1	18,0	51,7	13,3	2,3	240,5	5,75
Septembre	21,2	26,8	16,1	60,2	32,5	2,0	206,7	3,90
Octobre	17,9	23,1	13,0	67,4	7,8	1,7	175,4	1,91
Novembre	12,9	18,7	7,5	63,6	18,5	1,8	121,0	1,61
Décembre	9,7	14,8	5,3	68,3	26,8	1,9	85,7	0,81
Moyenne annuelle	18,3	24,8	12,1	66,1	20,8	2,9	203,6	3,99
Total annuel					249,3			1455,6

T Temp. moyenne
T-Max Temp. maximale
T-Min Temp. minimale
Hr Humidité relative moyenne
Pluie Précipitation totale
u Vitesse du vent moyenne
Rg Rayonnement global
ET₀ Evapotranspiration réelle

Pluviométrie

Dans l'ensemble, la région de Kairouan est très peu arrosée. Toutefois, la pluviométrie présente de grandes irrégularités qui se distinguent aussi bien dans le temps que dans l'espace. La pluviométrie moyenne annuelle est d'environ 250 mm, dont 120 mm en automne, 4 mm en hiver et 63 mm au printemps (source : www.infoclimat.fr) ce qui est attesté par la valeur calculée sur la période 2004-2010 qui est de 249,3 mm (Tableau 1). La répartition mensuelle de la pluviométrie 2015 est présentée dans la figure 1. Au premier semestre 2015, le maximum des précipitations cumulées est de 45 mm au mois de février tandis que le minimum est de 5 mm au mois juin. Moyennées sur le mois, la hauteur des précipitations est inférieure à 12 mm. Les cumuls de pluies les plus forts ont lieu en février et mars tandis qu'il n'a pas plu en avril et mai.

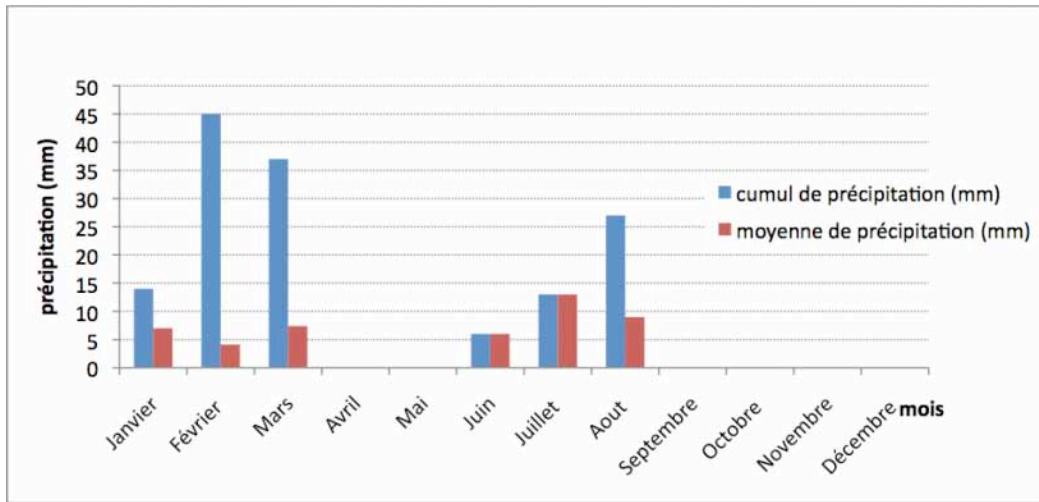


Figure 1. Répartition des précipitations moyennes mensuelles et en 2015 (source : www.infoclimat.fr)

Régime des vents

Les vents dominants les plus fréquents viennent du nord-ouest, du nord et du nord-nord ouest en hiver et du nord-est et du sud en été.

Les vents froids d’hiver proviennent généralement du nord-ouest tandis que les vents chaud et sec d’été (sirocco) souffle du sud vers l’ouest, plus de 60 jours par an.

Température

La température moyenne annuelle est de 17,9°C. La moyenne des maxima du mois le plus chaud (juillet) atteint 37,8°C tandis que celle des minima du mois le plus froid (janvier) est de 10,6°C.

Comme pour la pluviométrie, la température de la région kairouanaise se caractérise par une grande variabilité entre les saisons. En analysant les données de température de la station météorologique de Kairouan pendant l’année 2015, on constate que la température moyenne mensuelle varie entre les valeurs 12°C et 31°C (Figure 2).

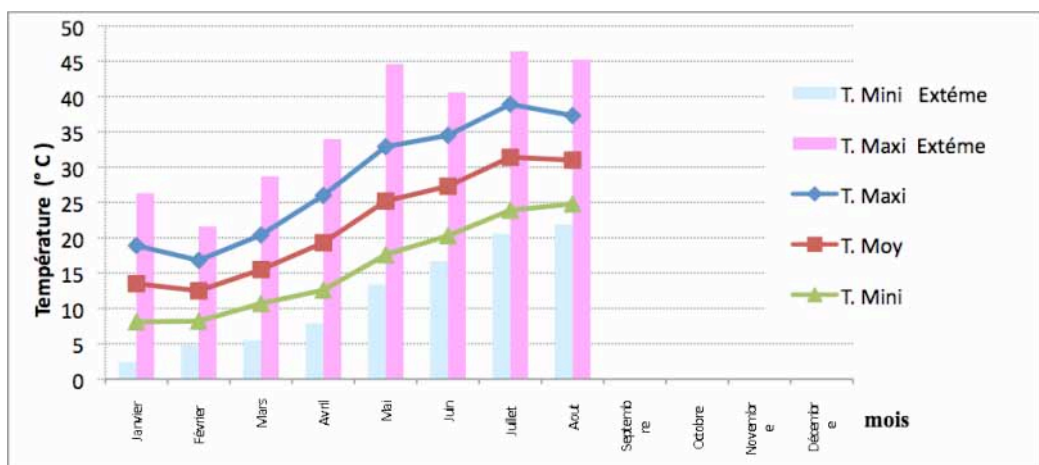


Figure 2. Variation de la température durant l’année 2015 (source : www.infoclimat.fr)

Généralement, les mois les plus froids sont décembre, janvier et février, avec des températures moyennes mensuelles inférieure à 15 °C. Les mois les plus chauds sont juillet et août, avec une température moyenne de l’ordre de 30 °C.

2. Géologie

Le bassin de Sisseb-El Alem est constitué par des séries sédimentaires allant du Trias jusqu'au Quaternaire avec une fosse synclinale subsidente au nord de Kairouan. La plaine de Sisseb est caractérisée par une morphologie très variée entre les bordures de la plaine où dominent les processus d'érosion et la plaine elle-même où s'accumulent les matériaux érodés selon des granulométries variables.

On observe trois formations bien distinctes :

- . des alluvions lacustres et marins : environ 10.000 ha.
- . des alluvion récents de l'oued Nebhana : environ 2.000 ha
- . un plissement recouvert de dépôts sableux : environ 500 ha.

3. Hydrologie

La plaine de Sisseb-El Alem est la dernière unité hydrologique avant l'exutoire final, la sebkha Kelbia, dans le bassin versant de l'oued Nebhana qui fait environ 855 km².

En 1980, il n'existait que 10 points d'eau avec quelques sources d'eau très saumâtre à la limite sud-est. Au nord-ouest, des aquifères existaient au niveau de formations sableuses et de galets. Les niveaux aquifères deviennent de plus en plus argileux et minces vers le sud-est. Au sud, l'aquifère est enfoui sous un niveau argileux peu perméable. L'épaisseur moyenne de la formation aquifère au nord est de l'ordre de 12 à 15 m. Elle s'amincit et se colmate en allant vers le sud-est.

4. Pédologie

La plaine Sisseb-El Alem est caractérisée par un ralentissement de la minéralisation de la matière organique dans les sols salés dont la teneur en matière organique est inférieure à 2%. Les sols sont généralement stratifiés, argileux en surface avec essentiellement de la montmorillonite mélangée avec de la kaolinite, de l'illite et du quartz à l'état de traces. Les argiles sont héritées des alluvions. Trois principales unités pédologiques sont identifiables : les sols peu évolués faiblement salés en amont, les sols salins à complexe calcique au centre de la plaine et les sols salins à complexe sodique dans les positions basses.

Dans les années 80, avant la réalisation d'un grand aménagement hydro-agricole tel que le barrage du Nebhana, la plaine du Sisseb était fréquemment inondable.

III. EXPLOITATION AGRICOLE DE M. HABIB SEBRI

1. Localisation

L'exploitation agricole de M. Habib SEBRI a été choisie car les infrastructures sont nouvelles et datent de 2011. Une agriculture pluviale et irriguée y est développée dans des conditions environnementales très contraignantes.

L'exploitation, située à environ 15 km au nord de la ville de Kairouan, est orientée selon un axe nord-sud et fait environ 4,5 km de long sur 1 km de large, soit une superficie d'environ 450 ha ou 4,5 km². Elle se situe, géographiquement, dans la plaine alluviale du Bas Sisseb-El Alem et, administrativement, dans le Gouvernorat de Kairouan et la Délégation de Sbikha (Figure 3).

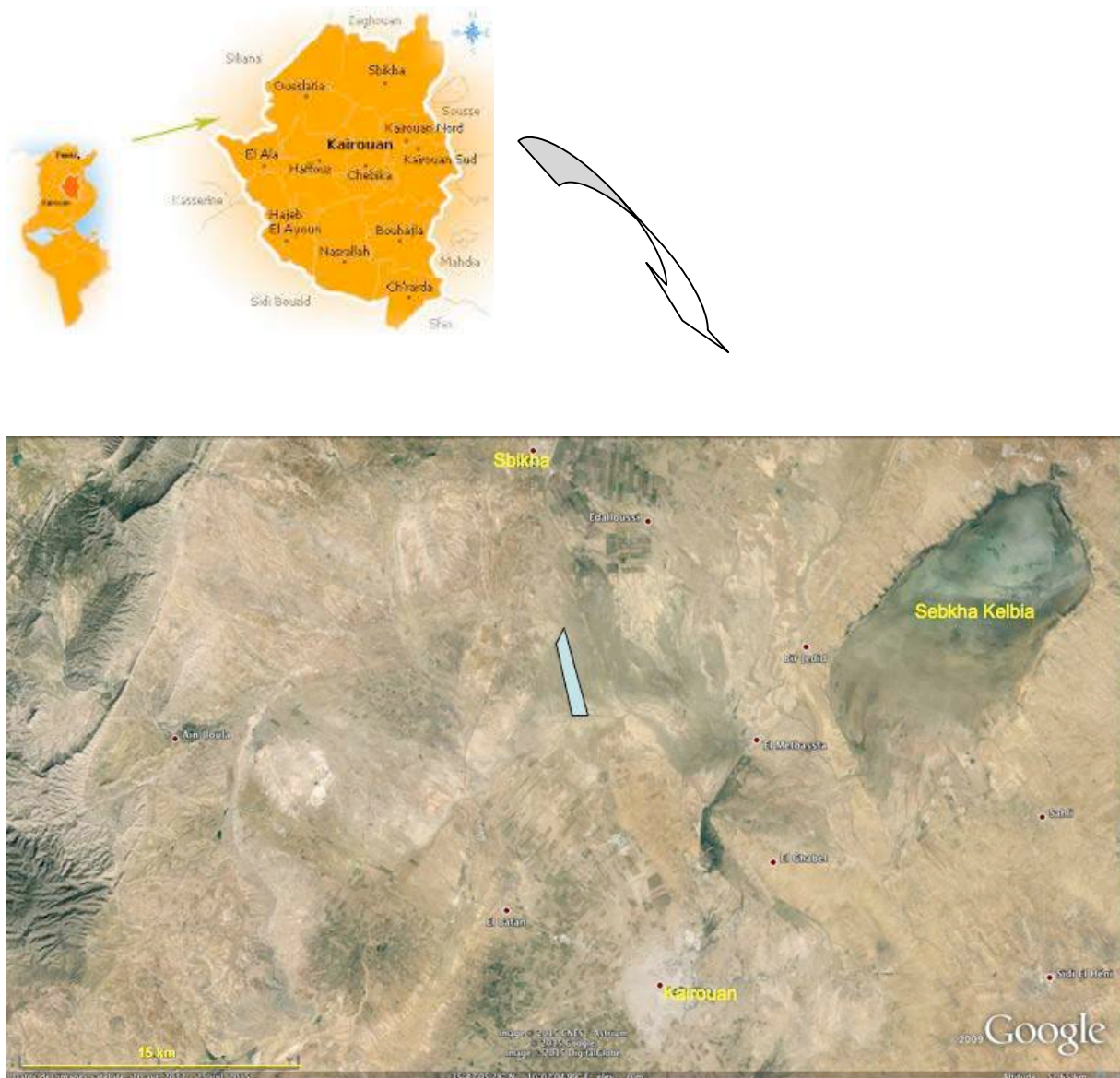


Figure 3. Localisation de l'exploitation agricole dans le gouvernorat de Kairouan

2. Occupation du sol et système d'exploitation agricole

L'exploitation agricole a été cultivée en l'orge en 2010. Puis, durant deux années consécutives, elle a été plantée en pomme de terre, variété *Spunta* (Figure 4a). Depuis janvier 2013, une plantation d'environ 108 ha de grenadiers, variété *Gabsi*, a été installée avec un espacement de 4 m entre les lignes et de 2 m sur la même ligne. En janvier 2014, une seconde plantation de 108 ha a été ajoutée puis une troisième de 162 ha, en janvier 2015, soit un total actuel de 378 ha de grenadiers en production (Figure 4b).



Sol préparé avant la mise en culture
(2010)



Culture d'orge
(fin 2010)



Culture de pomme de terre en billons
avant et pendant la récolte (2011)

Figure 4a. Quelques aspects relatifs à l'occupation des sols dans l'exploitation agricole de M. SEBRI



en janvier 2013
(âge des plants = 1 an)



en septembre 2013
(âge des plants = 1,5 an)



Etat de la plantation en avril 2015
(âge des plants = 3 ans)

Figure 4b. Evolution de la plantation de grenadiers dans l'exploitation agricole de M. SEBRI

L'eau d'irrigation provient de 6 sondages profonds par captage des eaux souterraines à environ 100 m de profondeur. Celles-ci subissent un traitement préalable à l'aide d'un dispositif électromagnétique Aqua 4D de Planet Horizon. Ensuite, elles sont stockées dans un bassin de 4.500 m³ avant leur utilisation au champ. Un réseau souterrain achemine l'eau d'irrigation vers les parcelles de l'exploitation. Chaque parcelle de 9 ha (200 m x 450 m) est alimentée à l'aide d'une vanne et d'un dispositif goutte à goutte à la surface du sol.

IV ACTIVITES SCIENTIFIQUES EN 2015

1. Sites expérimentaux

Deux sites expérimentaux ont été retenus dans l'exploitation agricole de M. Habib SEBRI (Figure 5) :

. Le **site S1** ($35^{\circ}50'10,34''\text{N}$ / $10^{\circ}2'5,9''\text{E}$) est localisé dans la partie nord, près de la piste traversant l'exploitation sur sa longueur. Il a été choisi près d'un forage abandonné dans une parcelle de grenadiers âgés de 3 mois.

Les caractérisations climatologique, pédologique et hydrogéologique y seront réalisées par Bessma ZARAI, notamment à l'aide d'observations et analyses stationnelles et de suivis temporels.

. Le **site S2** ($35^{\circ}48'32,96''\text{N}$ / $10^{\circ}2'34,75''\text{E}$) est localisé plus au sud dans une petite partie d'une parcelle de grenadiers âgés de trois ans couvrant environ $7.032,67\text{ m}^2$.

Des travaux de cartographie des propriétés hydro-salines du sol y seront menés par Bessma ZARAI en relation avec ceux de Malek HADJ SALEM sur la physiologie des grenadiers.



Figure 5. Localisation des sites expérimentaux S1 et S2 dans l'exploitation agricole

2. Caractérisations climatologique, pédologique et hydrogéologique du site expérimental S1

2.1. Description du sol

Méthodologie :

Un sondage à la tarière manuelle a été réalisé, le 17 mars 2015, jusqu'à 6 m de profondeur en prélevant le sol tous les 0,20 m (Figure 6). Les caractéristiques du sol ont été observées sur le terrain en décrivant la structure, la texture, l'humidité, la couleur, la présence de taches d'oxydo-réduction et de minéraux (gypse, calcaire...).

Des échantillons de sol ont été apportés au laboratoire de l'INRGREF à Tunis pour les observer et les préparer (séchage à l'air, broyage et tamisage à 2 mm) avant les analyses physico-chimiques.



Figure 6. Prélèvement des échantillons de sol par sondage à la tarière manuelle jusqu'à 6 m de profondeur

Résultats :

Les principales caractéristiques, déduites des observations faites sur les échantillons prélevés (Tableau 2), sont :

- . Etat hydrique : le sol est sec depuis la surface jusqu'à 40 cm de profondeur. Il devient ensuite humide jusqu'à 5 m puis très humide jusqu'à 6 m.
- . Couleur : elle est généralement brun jaunâtre clair avec des passées jaune pâle et brun olive clair. Une coloration gris foncé apparaît en profondeur à 5,80 m.
- . Texture : elle est argilo-limoneuse pour tout le profil à l'exception de la couche 1,80-2,60 m qui est limono-argileuse.
- . Structure : elle est polyédrique subanguleuse peu nette dans la couche 0-60 cm puis devient plus nette jusqu'à 5 m et massive en profondeur.
- . Matière organique : des débris végétaux sont observables en surface (0-40 cm) et au niveau des couches 80-160 cm, 2,60-3,20 m et 3,40-3,60 m.

. Pédotraits : les accumulations de calcaire et de gypse ainsi que les taches d'oxydoréduction sont observables. L'accumulation de calcaire, qui se manifeste sous forme de taches peu fréquentes sur l'ensemble du profil, apparaît sous forme de pseudo-mycéliums au niveau de la couche 60-80 cm. Le gypse, absent dans la partie supérieure du profil (0-60 cm), est présent sous forme de nodules peu fréquents de 60 cm à 160 cm et de 1,80 m à 3,40 m puis est plus fréquent en profondeur. Les taches d'oxydo-réduction apparaissent à partir de 1,80 m, puis sont de plus en plus fréquentes en profondeur .

Tableau 2. Principales caractéristiques du sol observées le 20/03/2015

Couche (cm)	Etat hydrique	Couleur	Texture	Structure	MO	Accumulation de calcaire	Accumulation de gypse	Oxydo-réduction		
0-40	Sec	Brun jaunâtre (10 YR 5/6)	AL	Polyédrique subanguleuse peu nette	Peu fréquente	-	-	-		
40-60	Peu Humide	Brun (10YR 5/3)			Taches, peu fréquente	-				
60-80					Pseudo-mycélium, peu fréquente	Nodules, peu fréquente				
80-160	Humide	Brun olive clair (2,5Y 5/4)	LA	Polyédrique anguleuse nette	Débris végétaux, peu fréquente	-	-	-		
160-180		Brun jaunâtre clair (2,5 Y 6/4)			-	-	-	-	-	
180-220					-	-	-	-	-	
220-260					-	-	-	-	-	-
260-320					Débris végétaux (racine), peu fréquente	Taches, peu fréquente	Taches, peu fréquente	Quelque taches		
320-340		-			-	-	-	-	-	
340-360		Débris végétaux, peu fréquente			Taches grises, fréquente	-	-			
360-380		Brun jaunâtre clair (2,5Y 6/4)			Taches, fréquente	-	-			
380-440		Brun jaunâtre clair (2,5Y 6/3)			-	-	-			
440-460		Brun jaunâtre clair (2,5Y 6/4)			Taches, fréquente	Tache grise	-			
460-480	Jaune pâle (2,5Y 7/4)	Nodules, fréquente	Quelque taches	-						
480-500	Brun jaunâtre clair (2,5Y 6/3)	Grains, fréquente	Peu fréquente	-						
500-560	Très Humide	Brun olive clair (2,5Y 5/3)	Massive	-	Taches	Taches, fréquente	Très fréquente			
560-580		Gris foncé (5Y 4/1)			Taches, fréquente	Réduction, très fréquente				
580-600					Taches, fréquente	Peu fréquente				

AL : Argilo-limoneux ; LA : Limono-argileux

Les analyses physico-chimiques sont en cours de réalisation.

Des analyses diffractométriques (nature des argiles), des mesures rétractométriques (courbes de retrait) et des expérimentations au laboratoire (comportement du sol au dessalement) sont planifiées.

2.2. Distribution verticale de la salinité du sol

Méthodologie :

Des mesures de la conductivité électrique (CE) sur extrait aqueux (pâte saturée et dilution 1/5) ont été effectuées sur les échantillons de sol prélevés à différentes profondeurs jusqu'à 6 m.

Résultats :

Le profil salin jusqu'à 6 m de profondeur met en évidence des salinités du sol très élevées, particulièrement vers 2 m de profondeur (Figure 7). L'allure du profil salin coïncide avec celles des profils de concentration en sodium et en chlorures (Figure 8).

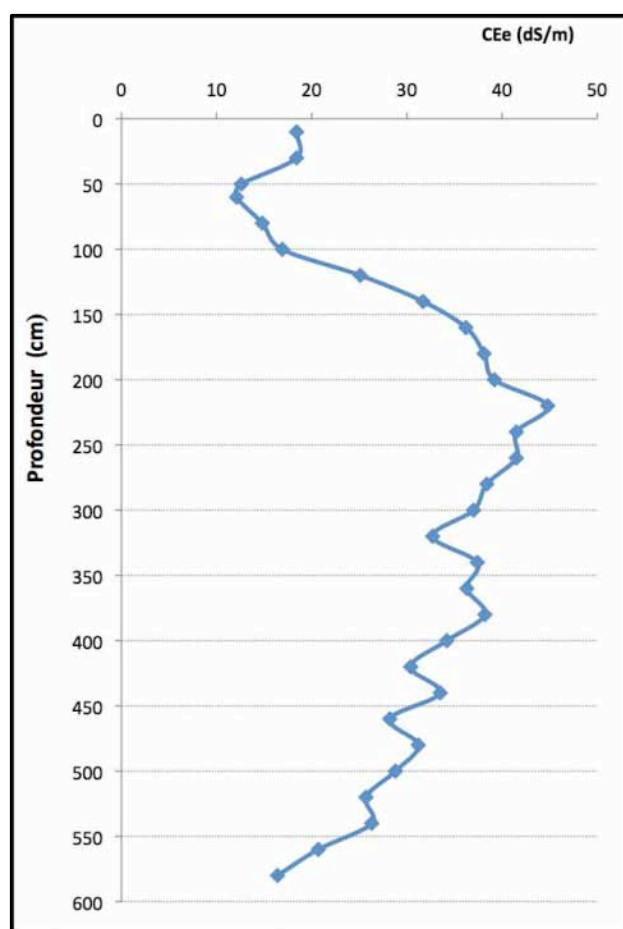


Figure 7. Distribution verticale de la salinité du sol (site S1, mars 2015)
CEe : conductivité électrique sur extrait en pâte saturée

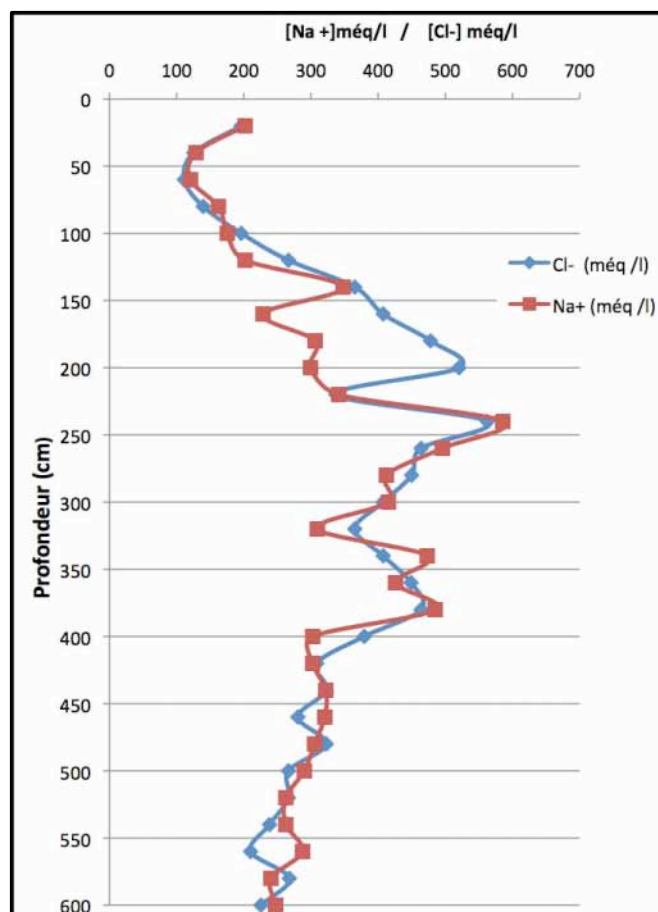


Figure 8. Distribution verticale du Na⁺ et Cl⁻ du sol (site S1, mars 2015)

2.3. Suivi météorologique local

Méthodologie :

Une mini-station météorologique a été installée le 21 janvier 2015 (Figure 9). La station de la marque WatchDog 2000 Series comprend les capteurs listés dans le tableau 3.

Tableau 3. Caractéristiques des capteurs de la mini-station WatchDog 2000 Series

Paramètre mesuré	Gamme de mesure	Précision
Pluviométrie	Résolution : 0,01'' (0,25 cm)	± 2%
Humidité relative	20% à 100%	± 3%
Température	- 20°C à + 70°C	± 0,6°C
Rayonnement solaire	1-1250 W m ⁻²	± 5%
Vitesse de vent	0-175 mph	± 5%
Direction du vent	incrément de 2°	± 7%

Le logiciel Specware 9 Pro de Spectrum Technologies permet le réglage de la station, l'enregistrement des données climatiques au pas de temps horaire et leur transfert vers un ordinateur portable par l'intermédiaire d'un câble.

Résultats :

L'acquisition et le traitement des données sont en cours.

2.4. Suivi hydrique du sol

Méthodologie :

Pour suivre les variations de la teneur en eau du sol, le site S1 a été équipé d'un dispositif de sondes TDR (Time Domain Reflectometry) commercialisé par Soilmoisture Equipment Corp., Santa Barbara, USA (Figure 9).

Les sondes sont formées de 3 tiges de 20 cm de longueur, de type « *Buriable* » (modèle 6005TCL) et adaptées à la salinité. Elles ont été installées sur le terrain le 6 mars 2015 en les plaçant au fond d'un tube PVC hermétique et enfoui aux profondeurs suivantes : 0,10 m, 0,5 m, 1 m, 1,5 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m et 6 m.

Les mesures se font manuellement au cours du temps en connectant chaque sonde au lecteur portable TRASE System 1 (Figure 10).

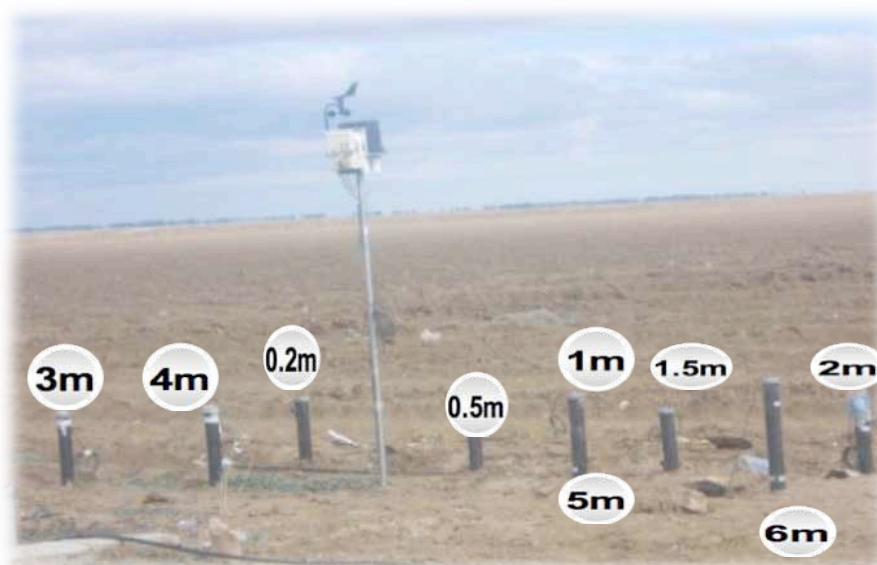


Figure 9. Mini-station météorologique et dispositif de sondes TDR du site S1



Figure 10. Lecteur portable TRASE System 1 pour la mesure de l'humidité du sol à l'aide des sondes TDR

Résultats :

Le suivi temporel des teneurs en eau volumétriques fait apparaître trois couches (Figure 11) :

- une couche supérieure, située entre 0 et 1,5 m, avec une gamme de variation très importante en surface (de 20% à 40%) et de moins en moins importante vers la profondeur.
- une couche intermédiaire, entre 1,5 et 3,5 m, où la variation est nulle.
- une couche inférieure, entre 3,5 m et 6 m, avec une gamme de variation importante.

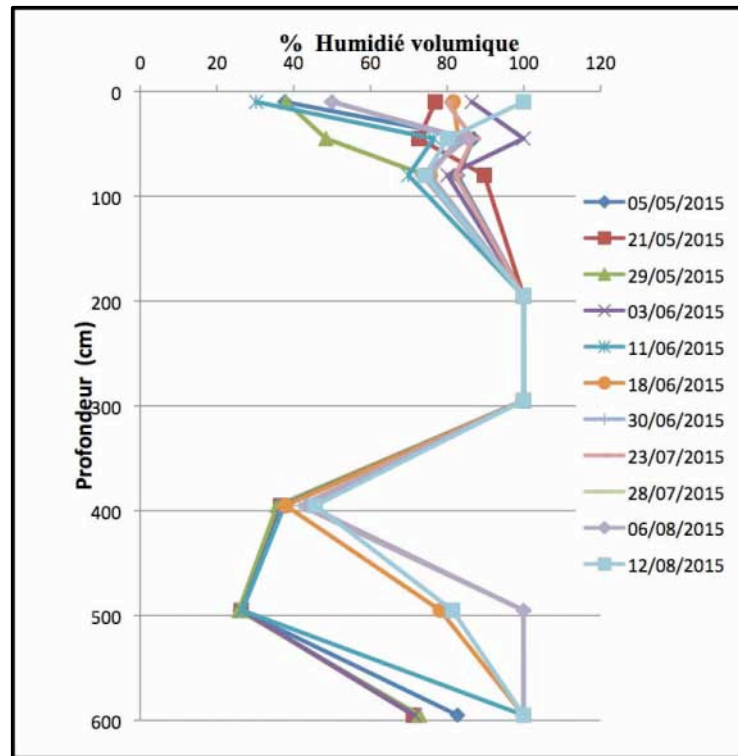


Figure 11. Distribution de la teneur en eau du sol (site S1, du 05/05 au 12-08-2015)

2.5. Suivi hydro-salin du sol

Méthodologie :

Deux sondes 5TE de Decagon Devices Inc (USA), mesurant chacun la teneur en eau, la salinité (conductivité électrique apparente) et la température du sol, ont été installées le 20 juillet 2015 à 0,10 m et 1 m de profondeur (Figure 12a). Le volume de sol mesuré est d'environ 0,7 L. Les sondes sont connectées à un enregistreur de données Em50 (Decagon Devices Inc) qui a été programmé pour réaliser une lecture toutes les 4 h (Figure 12b). Le transfert des données sur un micro-ordinateur portable se fait périodiquement sur le terrain à l'aide du logiciel « ECH2O Utility ».

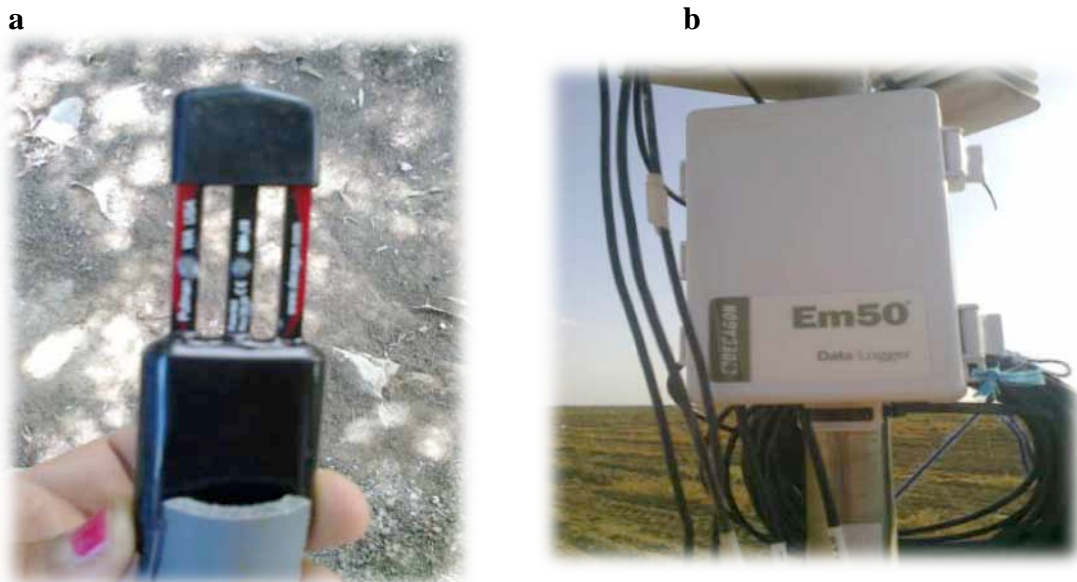


Figure 12. a : Sonde 5TE ; b : Enregistreur de données Em50

Résultats :

L'acquisition et le traitement des données sont en cours.

2.6. Suivi piézométrique de la nappe superficielle

Méthodologie :

Le CTD Diver de Schlumberger Water Services (SWS) a été installé dans un forage profond (> 50 m) situé près de la station de mesures S1. Il permet de mesurer le niveau de la nappe phréatique et sa salinité (Figure 13). En plus des capteurs de pression et de température, l'instrument est muni d'un capteur à quatre électrodes servant à déterminer la conductivité électrique (Tableau 4). La date et l'heure, le niveau d'eau, la température et la conductivité sont enregistrés à chaque mesure. Le CTD Diver est composé d'un boîtier céramique qui résiste aux agressions chimiques. En même temps que le CTD Diver, on utilise un BaroDiver qui enregistre la pression atmosphérique de l'air dans le forage. La mesure du niveau d'eau est obtenue en compensant la mesure de pression du CTD Diver par la mesure atmosphérique du BaroDiver.



Figure 13. Le CTD Diver avant mise en place sur le site S1 au fond du forage (arrière-plan)

Le logiciel « *Diver-Office* » et un adaptateur spécifique au CTD Diver permettent de le programmer, d'afficher les données acquises et de les transférer sur un micro-ordinateur portable.

Tableau 4. Spécifications techniques du CTDiver

<i>Dimensions</i>	Ø22 mm x 183 mm
<i>Capacité de la mémoire</i>	16,000 mesures (mémoire non volatile)
<i>Fréquence des mesures</i>	De 0,5 seconde à 99 heures
<i>Matériau du boîtier</i>	Céramique (ZrO ₂)
<i>Plage de température</i>	De -20°C à 80°C Précision ±0,1°C Résolution 0,01°C
<i>Conductivité électrique</i>	Gamme de mesure de 0 à 80 mS/cm Précision ±1 % de la valeur mesurée Résolution 0,1 % de la valeur mesurée
<i>Durée de vie des piles</i>	10 ans (en fonction de l'utilisation)
<i>Poids</i>	150 g

Au cours du suivi piézométrique, des prélèvements d'eau de la nappe sont effectués périodiquement pour analyser leur composition chimique au laboratoire (pH, CE et sels solubles).

Résultats :

L'acquisition et le traitement des données piézométriques sont en cours.

Les premiers résultats des analyses physico-chimiques montrent que la nappe superficielle a une salinité très élevée de l'ordre de 22,5 dS m⁻¹ (ou 36 g L⁻¹) et que le faciès chimique est chloruré-sodique (Tableau 5).

Tableau 5. Analyse physico-chimique de la nappe superficielle du site S1 (moyenne de 10 échantillons entre janvier et août 2015)

		Moyenne	ET
pH		8,4	0,5
CE (dS m⁻¹)		22,5	3,2
Anions (méq L⁻¹)	Cl⁻	207,2	52,7
	HCO₃⁻	7,7	2,15
	SO₄⁻	48,1	15,1
Cations (méq L⁻¹)	Ca²⁺	8,9	2,6
	Mg²⁺	27,9	6,0
	K⁺	1,1	0,1
	Na⁺	228,4	59,4
Résidu sec (g L⁻¹)		36,0	21,9
SAR		53,6	13,7

2.7. Suivi de la qualité chimique des eaux d'irrigation

Méthodologie :

Concernant les eaux d'irrigation, un échantillon d'eau est périodiquement amené au laboratoire pour effectuer les différentes analyses chimiques : pH, CE et sels solubles. Concernant la gestion des irrigations, le système goutte à goutte est employé avec un débit des goutteurs de 4 L h^{-1} . Les données sur la fréquence des irrigations, leur durée et la surface totale irriguée permettront d'estimer la dose d'irrigation pour la portion de parcelle de grenadiers et d'en déduire la quantité d'eau. La dose est en moyenne de l'ordre de 76 mm.

Résultats :

La moyenne de plusieurs échantillons montre que la salinité de l'eau d'irrigation est d'environ $4,4 \text{ dS m}^{-1}$, soit 2 g L^{-1} (Tableau 6) et le SAR de 12,2.

Etant moyennement salé et relativement peu alcalinisante, la qualité chimique de l'eau est favorable pour une irrigation de cultures qui s'adaptent à la salinité, comme c'est le cas pour l'exploitation agricole de M. SEBRI.

Tableau 6. Analyse physico-chimique de l'eau d'irrigation
(moyenne de 4 échantillons)

	Moyenne	ET
pH	7,9	0,3
CE (dS m^{-1})	4,4	0,4
Anions (még L^{-1})	Cl⁻	31,3
	HCO₃⁻	7,4
	SO₄⁻	14,9
Cations (még L^{-1})	Ca²⁺	6,9
	Mg²⁺	6,8
	K⁺	0,21
	Na⁺	37,5
Résidu sec (g L^{-1})	2,9	0,6
SAR	12,2	2,7

3. Distribution spatiale des propriétés hydro-salines du sol du site expérimental S2

Le suivi de la salinité des sols est réalisé par deux méthodes :

- . Suivi spatial de la salinité par les méthodes géophysiques en mesurant in situ la salinité globale (ou apparente) des sols pour les couches de surface (0-1,8 m) et les couches profondes (0-6 m) ;
- . Suivi vertical de la salinité par la méthode des extraits aqueux sur des échantillons de sol : extrait de la pâte saturée et extrait dilué au 1/5.

3.1. Cartographie de la salinité globale du sol

La méthode géophysique basée sur l'induction électromagnétique a été utilisée à l'aide de deux appareils de mesure commercialisés par Geonics (Mississauga, Canada).

3.1.1. Cartographie de la salinité globale en surface (0-1,8 m)

Méthodologie :

Des mesures de conductivité électrique globale en surface ont été réalisées en avril 2015 à l'aide d'un EM38 (Figure 14). L'appareil a été utilisé en mode vertical et horizontal en le posant à la surface du sol. Sur la parcelle S2 d'environ 7.000 ha, 20 rangs de grenadiers, faisant environ 90 m de long et espacés de 4 m, ont été prospectés. La mesure est faite au pied des plants de grenadiers tous les 3 plants, soit 218 points de mesure au total.

Les mesures, notées manuellement, intègrent pour chaque mode des volumes de sol différents qui correspondent approximativement à des profondeurs de 1,2 m en mode horizontal et 1,8 m en mode vertical. Les données sont traitées à l'aide du logiciel « *Surfer* » de Golden Software.



Figure 14. EM38 en mode horizontal

Résultats :

Les distributions spatiales de la conductivité électrique globale du sol en mode horizontal (EMH) et en mode vertical (EMV) sont présentées dans la figure 15.

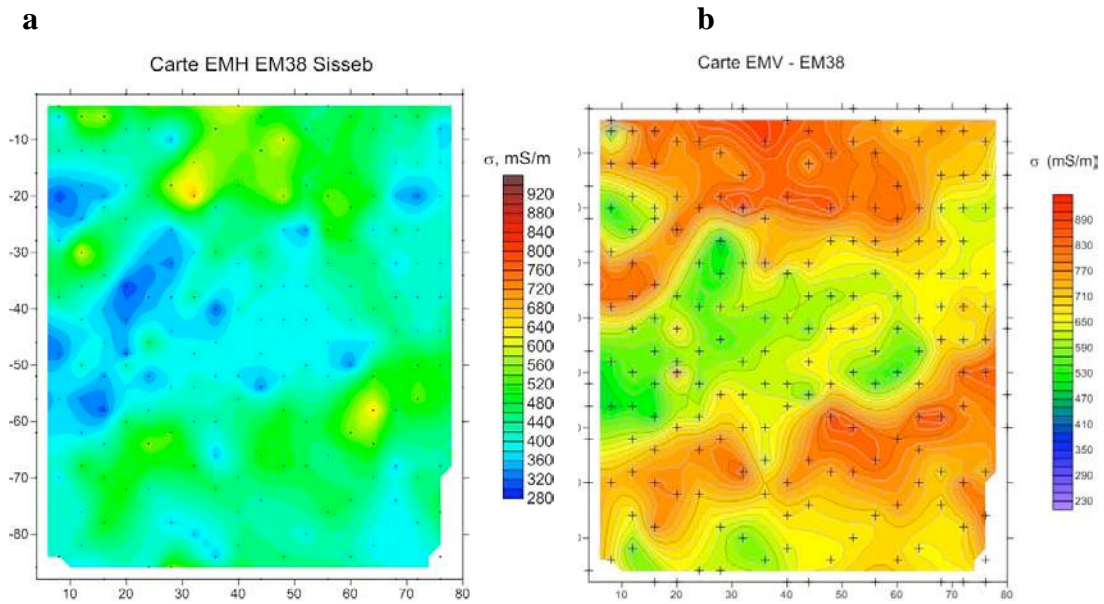


Figure 15. Carte de la conductivité électrique globale du sol en surface (a) en mode horizontal (EMH) ; (b) en mode vertical (EMV)

3.1.2. Suivi par la méthode des extraits aqueux des échantillons de sol

Méthodologie :

Pour valider les mesures de EMV et EMH, 6 échantillons sol ont été prélevés au niveau de chacun des 7 sondages faits, le 7 avril 2015, tous les 0,20 m jusqu'à 1,2 m de profondeur (Figure 16). L'emplacement des sondages a été choisi pour être représentatif de la gamme de salinité mesurée par l'EM38. La CE sur extraits aqueux (pâte saturée et 1/5) et la teneur en eau ont été déterminées.

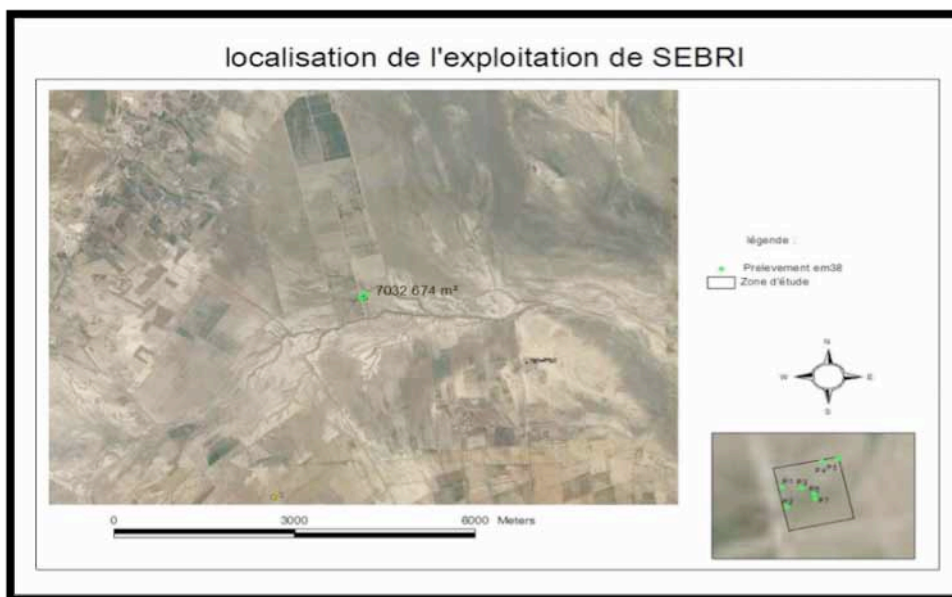


Figure 16. Localisation des sondages pour le prélèvement d'échantillons de sol.

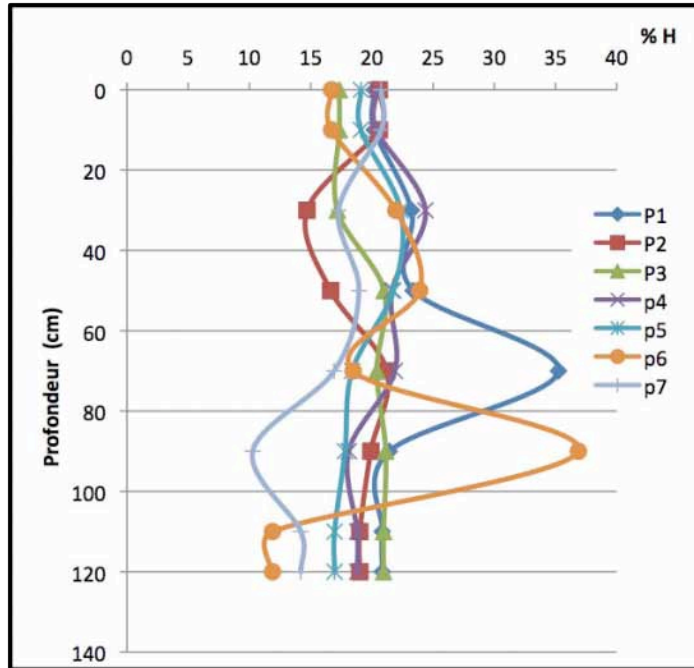
Résultats :

Relation entre la conductivité électrique et l'humidité pondérale

Les valeurs absolues de l'humidité pondérale varient de 10,3% à 36,9%. La gamme de variation des valeurs moyennes par sondage est de 16,4% à 24%, tandis que, par strate, elle est de 17,5% à 21,8% (Figure 17a).

Les valeurs absolues de la conductivité électrique sur extrait saturé varient de 5,1 dS m⁻¹ à 48,2 dS m⁻¹, la variabilité étant plus forte en profondeur qu'en surface (Figure 17b). Les valeurs moyennes par strate augmentent avec la profondeur, de 9,7 dS m⁻¹ à 26,7 dS m⁻¹, la valeur de surface étant de 15 dS m⁻¹.

(a)



(b)

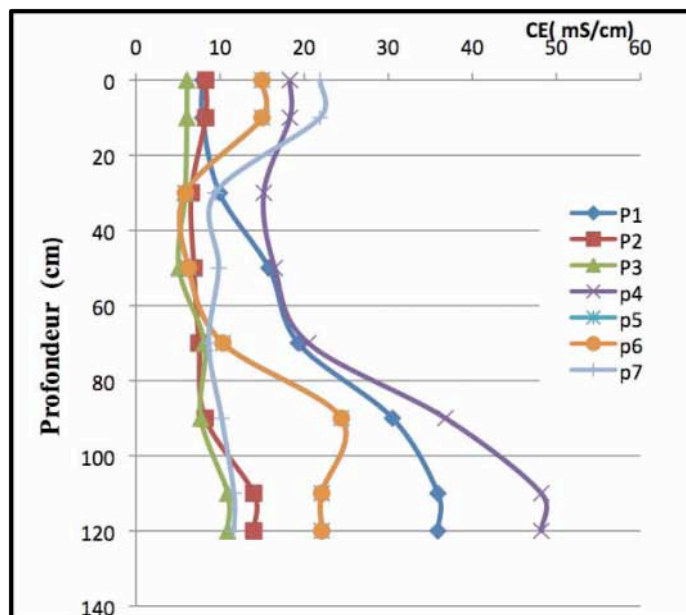


Figure 17 .Distribution verticale de
(a) la teneur en eau ; (b) la conductivité électrique sur extrait saturé

Relation entre les valeurs EMH/EMV et CEe

Pour chaque sondage de la parcelle S2, des mesures de EMV et EMH ont été faites et une corrélation significative a été obtenue entre les deux variables. Comme la mesure de EMH est relative à la salinité de surface qui a un intérêt agronomique, elle a été retenue pour le reste du traitement des données.

Pour chaque profil de CEe (extrait saturé), une valeur moyenne a été calculée à partir des valeurs mesurées aux six profondeurs. La droite de régression linéaire entre les sept valeurs de CEe, variant de 7,3 dS m⁻¹ à 27,7 dS m⁻¹, et celles de EMH, variant de 350 mS m⁻¹ à 500 mS m⁻¹, est donnée par la figure 18.

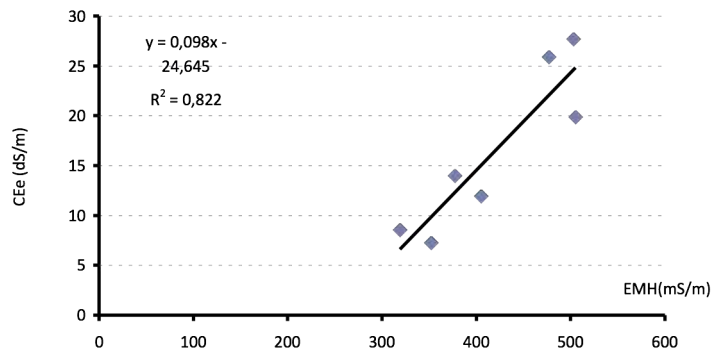


Figure 18. Corrélation entre CEe (dS/m) et EMH (mS/m)

La relation linéaire ainsi obtenue, soit $CEe = 0,098 \times EMH - 24,65$ permet de convertir la carte de EMH en carte de salinité du sol (CEe) (Figure 19). Une analyse statistique des données utilisées pour la cartographie est présentée dans le tableau 7. On observe une grande variabilité de la salinité qui passe de 3,2 dS m⁻¹ à 48,1 dS m⁻¹ avec un coefficient de variation moyen de 43%. La carte de salinité du sol montre que les zones de salinité les plus élevées se localisent dans les parties nord et sud-est du site S2.

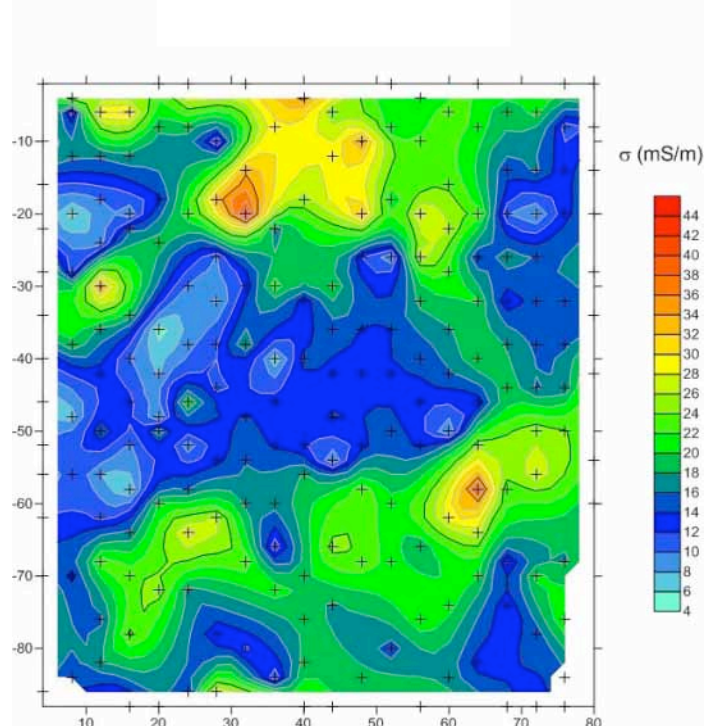


Figure 19. Carte de la salinité du sol exprimée en conductivité électrique sur extrait saturé (CEe en dS m⁻¹)

Tableau 7 . Analyse statistique sommaire de EMH, EMH/EMV et CEe (avril 2015)

	EMH	EMV/EMH	CEe(dS m⁻¹)
Nombre de mesures	218		
Valeur moyenne	431,9	1,6	19,0
Valeur maximale	681,0	2,2	48,1
Valeur minimale	297,0	1,6	3,2
Médiane	425,5	1,6	18,2
Ecart-Type	69,3	0,2	8,1
CV (%)	16,1	10,4	42,7

3.1.3. Cartographie de la salinité globale en profondeur (0-6 m)

Méthodologie :

Des mesures de conductivité électrique globale en profondeur ont été réalisées le 21 mai 2015 à l'aide d'un EM31 aux mêmes points de mesures que celles faites avec l'EM38 (Figure 20). L'appareil a été utilisé en mode vertical et horizontal à 1 m de hauteur. Les mesures intègrent pour chaque mode des volumes de sol différents qui correspondent approximativement à des profondeurs de 3 m en mode horizontal et 6 m en mode vertical. Les données sont enregistrées automatiquement par l'appareil au cours de la prospection.

La campagne de mesures ayant eu lieu à une date différente de celle relative à l'EM38, les conditions d'humidité du sol ont varié ce qui doit être pris en compte dans l'interprétation des résultats. Pour valider les mesures, des échantillons de sol ont été prélevés au cours d'un sondage fait jusqu'à 6 m de profondeur. La CE sur extraits aqueux (pâte saturée et 1/5) et la teneur en eau seront déterminées.



Figure 20. Mesure de la conductivité électrique apparente en mode vertical par l'EM31

Résultats :

Les distributions spatiales de la conductivité électrique globale du sol en mode horizontal (EMH) et en mode vertical (EMV) sont présentées dans la figure 21.

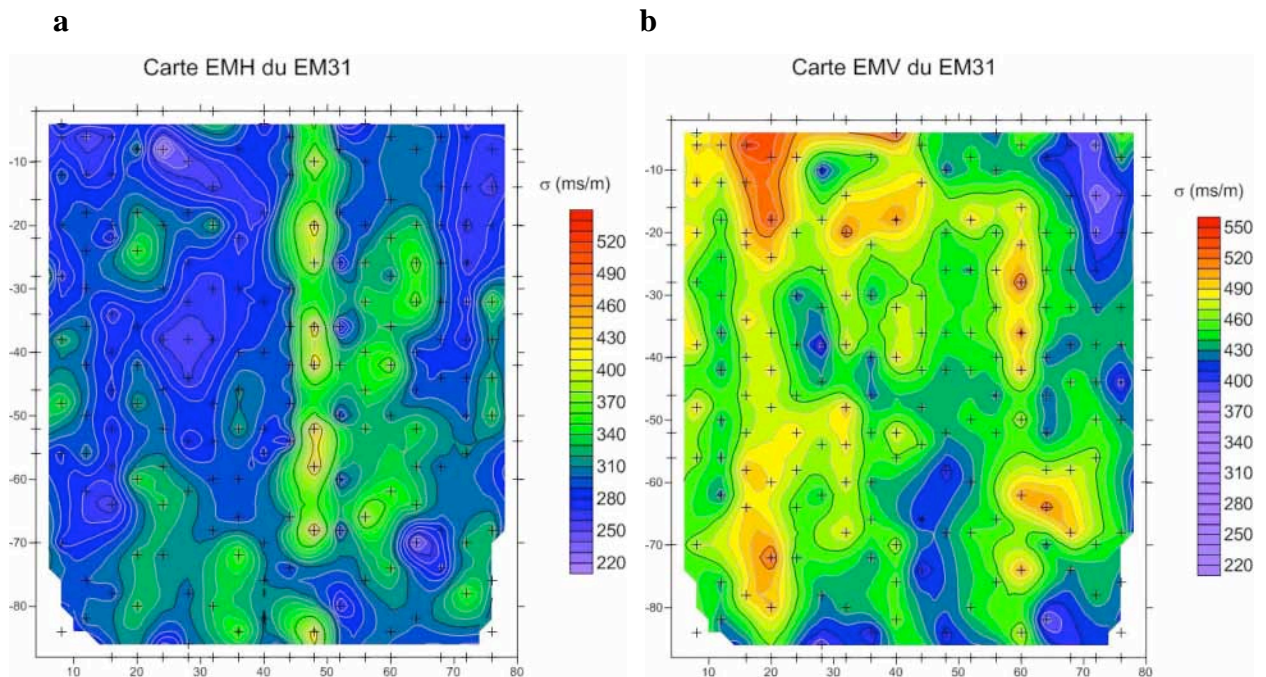


Figure 21. Carte de la conductivité électrique globale du sol en profondeur (a) en mode horizontal (EMH) ; (b) en mode vertical (EMV)

3.2. Cartographie de la topographie

Méthodologie :

Au cours de la campagne de mesures à l'EM38 en avril 2015, le géo-référencement des points de mesures a été réalisé à l'aide d'un GPS Trimble 4600 LS mobile et d'une station fixe de référence. Pour être encore plus précis, l'acquisition des coordonnées géographiques d'un point géodésique permettra un meilleur positionnement de la station fixe et des valeurs altitudinale plus absolues.

Résultats :

Une carte topographique provisoire est illustrée par la figure 22.

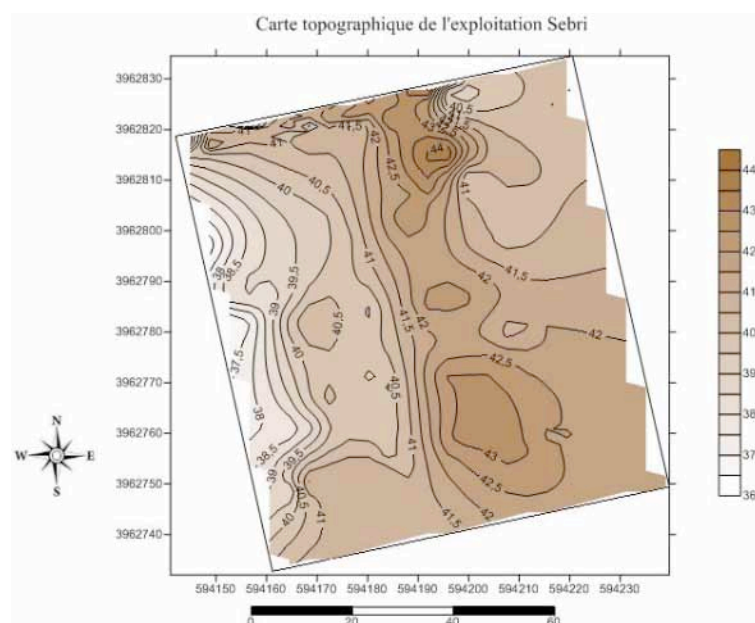


Figure 22. Carte topographique du site S2

En comparant la carte topographique avec la carte de salinité du sol (figure 19), on remarque que les zones basses correspondent aux salinités les moins élevées et inversement.

3.3. Suivi de la qualité chimique d'une nappe localisée à faible profondeur

Méthodologie :

Sur le site S2, lors de l'échantillonnage de sol du 3 juin 2015, on a trouvé une nappe superficielle à environ 1,2 m de profondeur.

Un piézomètre a été installé avec un CTD Diver pour contrôler les fluctuations du niveau de la nappe perchée et de sa salinité. Des prélèvements d'eau ont été faits périodiquement pour analyser la composition chimique.

Résultats :

L'acquisition et le traitement des données sont en cours. Les premiers résultats des analyses physico-chimiques sont données dans le tableau 8. La salinité est très élevée avec une CE de 82,8 dS m⁻¹ (ou 67,7 g L⁻¹). Le faciès chimique est chloruré-sodique et la valeur de 123 pour le SAR est excessivement élevée.

Tableau 8. Analyse physico-chimique de l'eau du piézomètre (moyenne de 3 échantillons)

	Moyenne	ET
pH	7,5	0,04
CE (dS m⁻¹)	82,8	6,4
Anions (méq L⁻¹)	Cl⁻	1211
	HCO₃⁻	16,0
	SO₄⁻	158,7
Cations (méq L⁻¹)	Ca²⁺	30,0
	Mg²⁺	115,0
	K⁺	9,1
	Na⁺	1059,2
Résidu sec (g L⁻¹)	67,7	25
SAR	123,3	19,6

4. Suivi phénologique, morphologique et physiologique de la plantation de grenadiers des sites expérimentaux S1 et S2

La plaine kairouanaise est irriguée avec des eaux moyennement salées sous un climat semi-aride. A long terme, la surexploitation de la nappe profonde va se traduire par une réduction de l'irrigation nécessitant le besoin de bonifier les sols salés et de chercher une stratégie assurant la gestion durable des ressources en eau. Estimer l'évapotranspiration réelle constitue un élément majeur pour établir une gestion économe de l'eau d'irrigation. De nombreuses approches théoriques (hydrologique, micro-météorologique...) ont été élaborées pour estimer l'évapotranspiration réelle d'un couvert végétal.

L'objectif du travail est l'amélioration de la gestion de l'irrigation avec l'eau salée d'une plantation de grenadier cultivée dans un sol argileux hypersalin sous un climat semi-aride. La mise au point et la validation d'un modèle d'évapotranspiration réelle au pas de temps journalier, utilisant l'approche de Penman-Monteith et tenant compte de la spécificité du couvert végétal, est développée et comparé avec la méthode du bilan hydrique.

L'étude est réalisée sur les deux sites expérimentaux S1 et S2 (Figures 23a et 23b).



Figure 23a. Vue de la parcelle de grenadiers âgée d'une année (site S1).



Figure 23b. Vue de la parcelle de grenadiers âgée de 3 ans (site S2).

4.1. Observations phénologiques

L'observation et le suivi des différents stades phénologiques ont été réalisés hebdomadairement par la prise de photos complétée par des observations sur la morphologie et le développement de la végétation.

L'étude, entamée en avril 2015, a comporté d'abord l'observation des stades phénologiques. Les stades de dormance et du début du débournement n'ont pas été observés en raison du démarrage tardif du suivi. Vers la fin du mois d'avril, il y a eu l'apparition et le gonflement des bourgeons floraux (Figure 24). La floraison a eu lieu au début du mois de mai et, enfin, la nouaison a commencé vers la première quinzaine

du mois de juin. Le mûrissement des fruits a eu lieu à partir du mois de juillet. Il faut signaler qu'il existe une hétérogénéité au niveau des pieds de grenadier et une variabilité morphologique au sein du même pied. Ainsi, la rentrée des grenadiers à un stade donné est assez différente entre les arbres. Au niveau d'un même arbre, on observe des structures caractérisant plusieurs stades phénologiques.



Figure 24. Observations phénologiques des grenadiers tout au long la période de suivi :
 (A) : après débourrement ; (B) : début floraison ; (C) : floraison ;
 (D) et (E) nouaison et croissance des fruits ; (F) : mûrissement des fruits

4.2. Développement morphologique des grenadiers

Pour évaluer le développement d'une plantation de grenadiers, une campagne de mesures de la hauteur et du diamètre des plants a été réalisée le 23 avril 2015. Elle a concerné 50 pieds âgés d'un an du site S1 et 218 pieds âgés de 3 ans du site S2. La hauteur a été mesurée à l'aide d'un mètre-ruban gradué et le diamètre à l'aide d'un pied à coulisse (Figures 25a et 25b).



Figure 25a. Hauteur du plant de grenadier (cm)



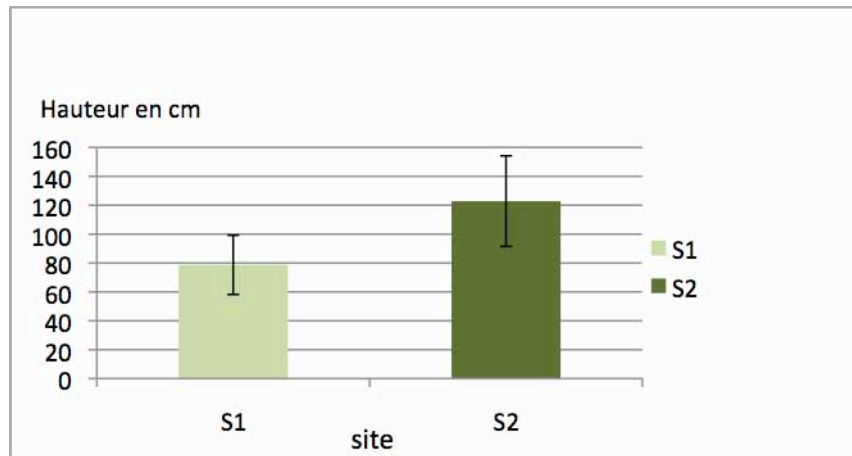
Figure 25b. Diamètre au collet du plant de grenadier (cm)

Sur le site S1, la hauteur moyenne des arbres de l'année est de 78,7 cm avec un coefficient de variation (CV) de 26%. Le diamètre moyen est de 1,2 cm avec un CV de 50,1%. Il existe une grande variabilité morphologique entre les individus. Sur le site S2, la valeur moyenne des hauteurs est de 122,8 cm avec un CV de 25,5 % et celle des diamètres est de 3,3 cm avec un CV de 43,5%. Pour les deux sites, le CV des diamètres est plus élevé que celui des hauteurs (Tableau 9 et Figure 26).

Tableau 9. Analyse statistique des la hauteur et du diamètre des grenadiers

Paramètres	Plantation de l'année		Plantation de 3 ans	
	Hauteur (cm)	Diamètre (cm)	Hauteur (cm)	Diamètre (cm)
Nombre	50	50	218	218
Moyenne	78,7	1,2	122,8	3,3
Médiane	74,2	1,1	132,5	3,2
Min.	22,0	0,2	48,0	0,2
Max.	136,0	3,4	178,0	8,2
CV (%)	26,0	50,1	25,5	43,5

(a)



(b)

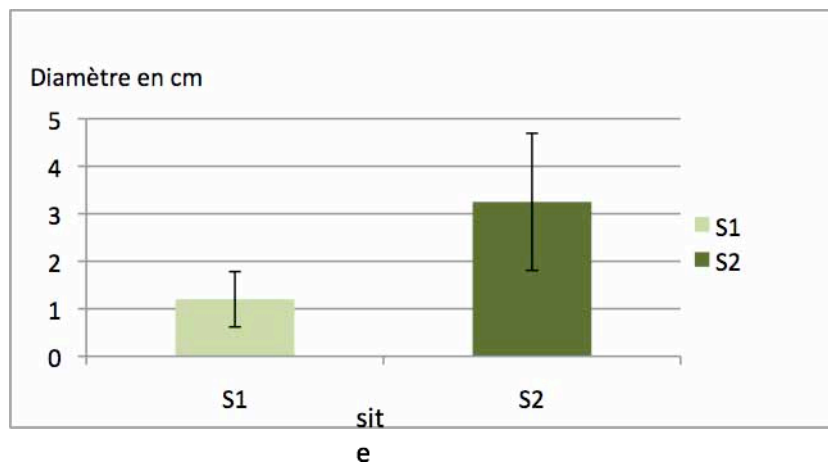


Figure 26. Hauteur moyenne (a) et diamètre moyen (b) des grenadiers des sites S1 et S2, âgés respectivement de 1 an et 3 ans. Les écarts-types sont calculés pour des populations de 50 individus (S1) et 218 individus (S2)

La circonférence moyenne des grenadiers de 3 ans (site S2) est d'environ 10,4 cm tandis que celle des grenadiers âgés d'un an (site S1) est de 3,8 cm. La distribution spatiale de la hauteur des grenadiers de la parcelle S2 est présentée par l'esquisse cartographique obtenue avec le logiciel « *Surfer* » (Figure 27).

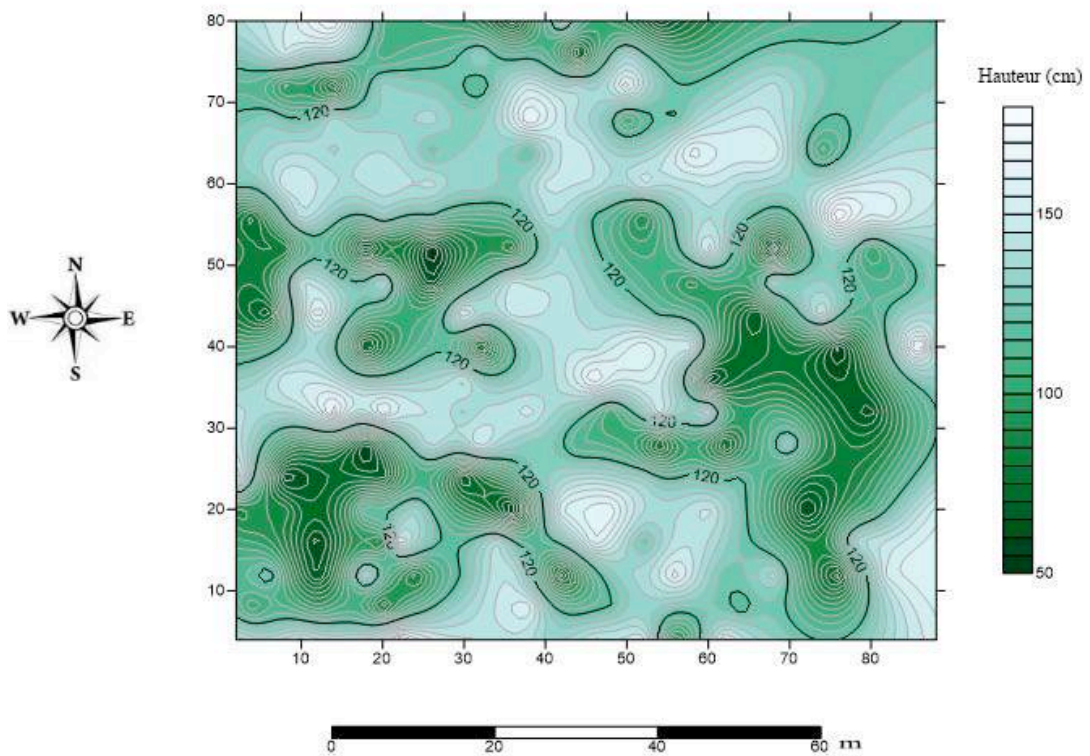


Figure 27. Distribution spatiale de la hauteur des grenadiers du site S2.

En comparant la hauteur des individus, on remarque que 20,6% de l'ensemble des individus étudiés ont une hauteur qui ne dépasse pas 100 cm. Globalement, il existe une hétérogénéité notable entre les grenadiers (Figure 28).

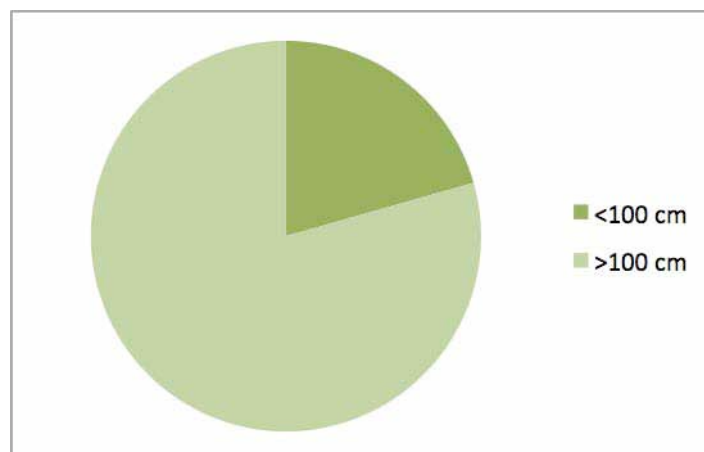


Figure 28. Distribution de la hauteur des grenadiers du site S2.

Comme les plants de grenadiers des sites S1 et S2 sont de la même variété et que, pour chaque parcelle, ils ont le même âge, on peut assimiler les grenadiers d'un an comme étant l'état initial de la plantation et ceux de 3 ans comme étant la résultante de la croissance de cette plantation sur deux années. La croissance annuelle des grenadiers est estimée à partir des mesures de hauteur et de diamètre rapportées à l'année. Les valeurs calculées sont de 22,1 cm an⁻¹ en hauteur et de 1,1 cm an⁻¹ en diamètre (ou 3,3 cm en circonférence). Le taux de croissance sur les deux années est de 56% en hauteur et de 175% en diamètre (ou en circonférence). Autrement dit, les grenadiers ont grandi en hauteur de la moitié de leur hauteur initiale et ont triplé de taille en diamètre ou en circonférence.

4.3. Développement morphologique du feuillage des grenadiers

Des campagnes de mesures périodiques ont été menées, les 21 et 29 mai, les 3, 11 et 30 juin 2015, pour mesurer les caractéristiques morphologiques des feuilles, à savoir leur longueur et leur largeur, les mesures étant faites sur plusieurs rameaux d'un plant (Figures 29 et 30). Comme le vent peut endommager certains rameaux, on n'en a conservé que trois pour les mesures.



Figure 29. Mesure de la longueur et de la largeur des feuilles



Figure 30. Marquage des pieds de grenadier

Globalement, la longueur des feuilles varie de 1,2 cm à 4,6 cm et la largeur de 0,6 cm à 2,4 cm. Les figures 31 et 32 montrent l'évolution de la longueur et de la largeur moyenne de quelques feuilles observées sur trois rameaux de cinq individus choisis préalablement. Durant la période de suivi, la valeur moyenne de la longueur des feuilles varie de 2,7 cm à 2,9 cm et celle de la largeur varie de 1,5 cm à 1,6 cm. En comparant les valeurs mesurées à la première date (21 mai) à celles mesurées à la seconde date (29 mai), l'augmentation maximale de la longueur et la largeur des feuilles est d'environ 2 mm. Certaines mesures de largeur n'ont pas changé tout au long du suivi alors que la plupart des mesures se sont stabilisées dès la 3^{ème} date. Les deux courbes d'évolution de la longueur et la largeur moyennes des feuilles montrent chacune un palier. Il semblerait donc que la période de suivi corresponde à la période d'arrêt de croissance de la plante. Par ailleurs, en extrapolant les courbes d'évolution, on estime que la croissance des feuilles a commencé depuis le mois de février.

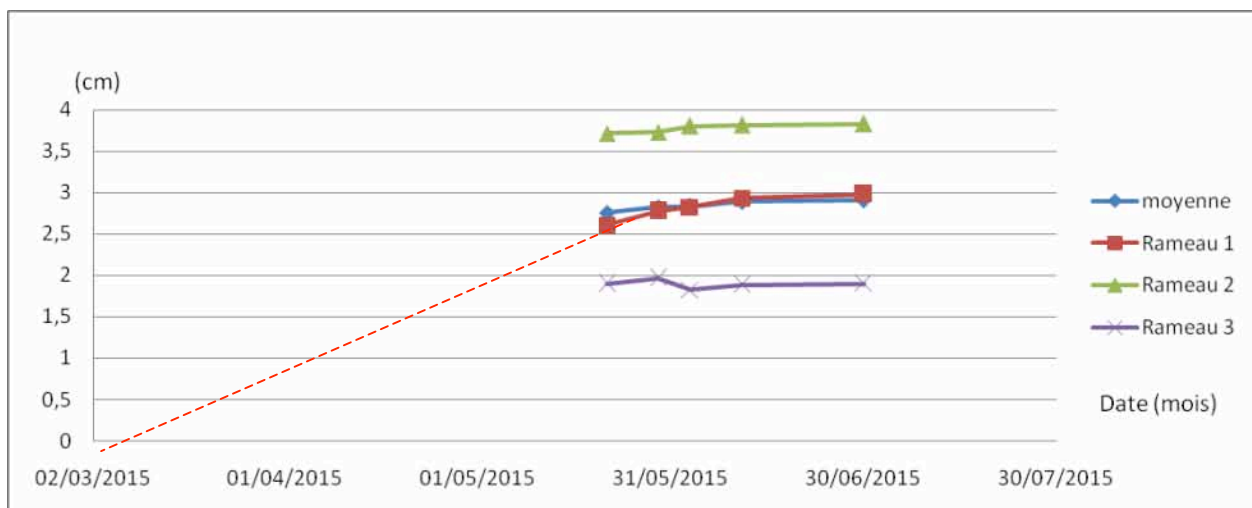


Figure 31. Evolution de la longueur moyenne des feuilles

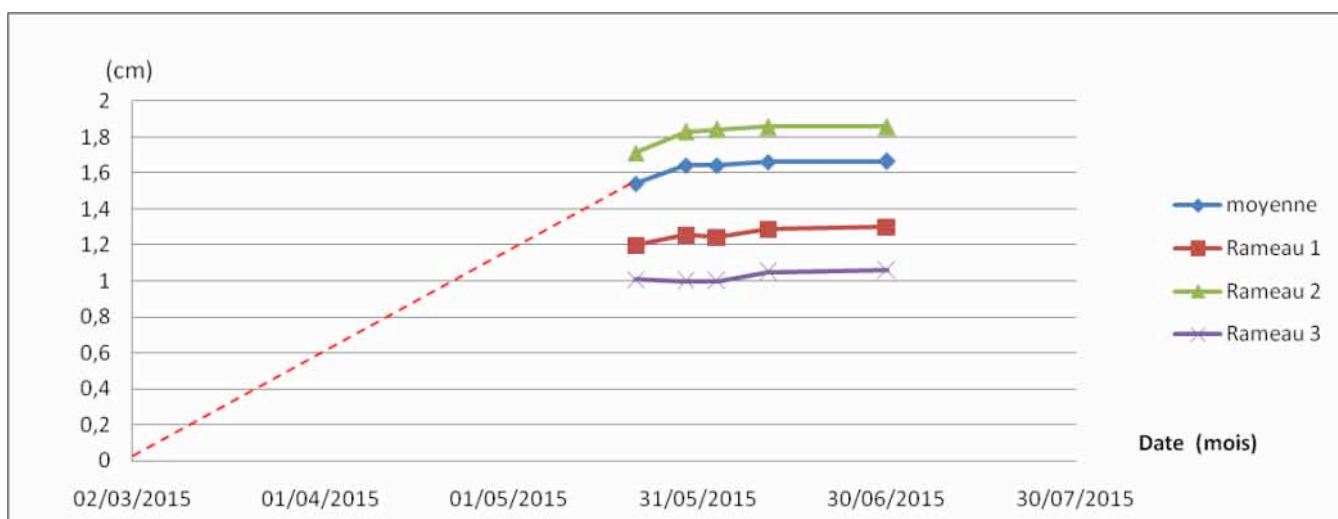


Figure 32. Evolution de la largeur moyenne des feuilles

4.4. Suivi de l'évolution stomatique des feuilles

Dix feuilles prélevées mensuellement sur cinq grenadiers du site S2 ont été envoyées au Laboratoire IRD à Bondy pour effectuer des observations par microscope électronique à balayage (MEB) afin de suivre l'évolution de la structure des stomates en fonction des stades phénologiques.

La figure 33 présente des exemples de photos obtenues à partir d'échantillons localisés systématiquement dans trois parties du limbe de la feuille, à savoir la pointe, le milieu et la base.

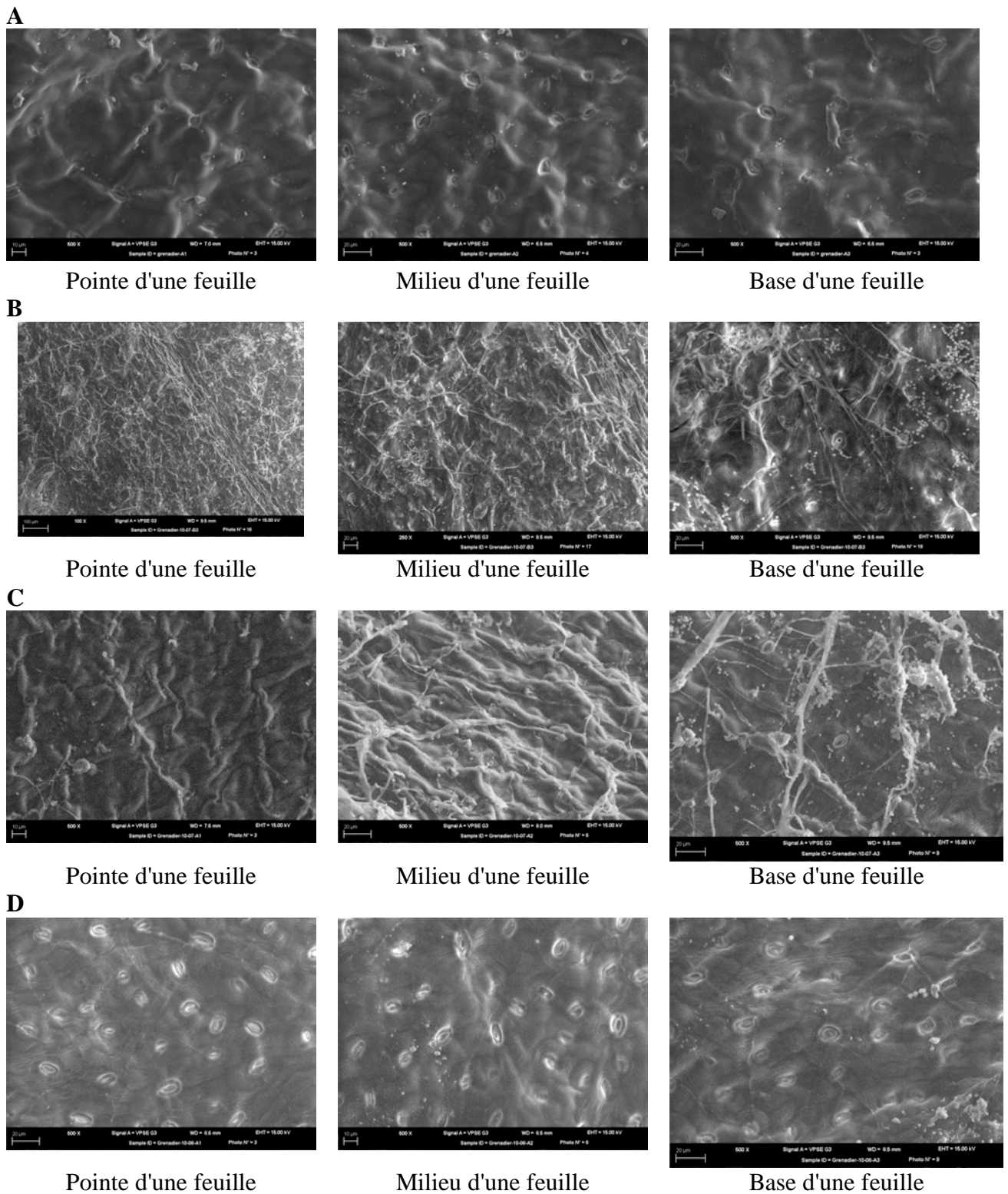


Figure 33. Observations au MEB de feuilles de grenadiers (A) : feuilles du mois de mai ; (B) : feuilles du mois de Juin ; (C) : feuilles du mois de juillet ; (D) : feuilles de mois d'août (photos réalisées à l'IRD Bondy sous la supervision de G. Nizinski).

4.5. Collecte des données nécessaires à la modélisation

L'estimation de l'évapotranspiration réelle constitue un élément majeur pour établir une bonne gestion économe de l'irrigation. De nombreuses théories et approches ont été élaborées en vue d'estimer l'évapotranspiration réelle. Notre étude repose sur deux approches:

- la méthode analytique de Penman-Monteith ;
- l'approche hydrologique du bilan hydrique de Rose et Sharma.

Les deux approches tiennent compte de certains paramètres liés au couvert végétal et d'autres relatifs au contexte climato-édaphique. Les données climatiques sont obtenues de deux manières :

- par une mini-station climatique installée dans la zone d'étude (site S1);
- par l'Institut National de la Météorologie (INM).

Les données édaphiques sont en cours d'acquisition.