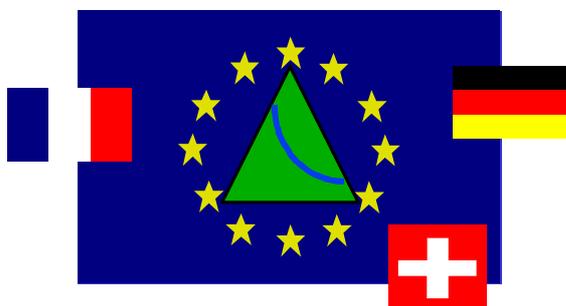


# ITADA

**Institut Transfrontalier  
d'Application et de Développement Agronomique  
Grenzüberschreitendes Institut  
zur rentablen umweltgerechten Landwirtschaft**



## **INTERACTION AZOTE ET IRRIGATION OPTIMISATION ET MAITRISE DES RISQUES**

**RAPPORT FINAL DU PROJET A 1.3 (1996-1999)**

**Etude cofinancée par l'initiative communautaire  
INTERREG II "Rhin Supérieur Centre-Sud"**

# ITADA

**Institut Transfrontalier d'Application et de Développement Agronomique**

Grenzüberschreitendes Institut zur rentablen umweltgerechten Landwirtschaft

Le programme d'actions de l'ITADA était placé sous la maîtrise d'ouvrage du Conseil Régional d'Alsace et cofinancé par :

- le Fonds Européen pour le Développement Régional (programme INTERREG),
- le Ministère de l'Agriculture du Land de Bade-Wurtemberg,
- les Cantons suisses de Bâle Ville, Bâle-Campagne, Argovie et Soleure ainsi que la Coop -Suisse,
- le Conseil Régional d'Alsace,
- l'Agence de l'Eau Rhin Meuse,
- l'Etat français via les Ministères de l'Agriculture et de l'Environnement,
- les Organisations Professionnelles Agricoles alsaciennes.

**Le projet A 1.3 :**

## « INTERACTION AZOTE ET IRRIGATION : OPTIMISATION ET MAITRISE DES RISQUES »

a été réalisé par :

F. Juncker-Schwing (AGPM) :	co -chef de projet	F
D. Lasserre (ITCF) :	co -chef de projet	F
F.J. Kansy (IfUL) :	partenaire	D
Organismes associés :	F : ARAA, INRA, Lycée Agricole de Rouffach	
	D : ALLB Freiburg	

---

Association Générale des Producteurs de Maïs, Colmar (AGPM)  
Institut Technique des Céréales et des Fourrages, Colmar (ITCF)  
Institut für umweltgerechte Landwirtschaft, Müllheim (IfuL)

# SOMMAIRE

<b>POSITION DU PROBLEME</b>	<b>p 5</b>
<b>OBJECTIF</b>	<b>p 5</b>
<b>METHODES</b>	<b>p 7</b>
<b>1. Caractéristiques du site de l'essai</b>	<b>p 7</b>
1.1. Localisation géographique	p 7
1.2. Les caractéristiques pédologiques	p 7
1.2.1. <i>Détermination de la réserve en eau du sol</i>	p 8
1.2.2. <i>Analyse de terre et profil pédologique</i>	p 8
<b>2. Matériel utilisé</b>	<b>p 9</b>
2.1. Le matériel végétal	p 9
2.2. Le choix du tensionic	p 9
2.3. Le matériel d'irrigation	p 10
<b>3. Analyse du dispositif</b>	<b>p 11</b>
3.1. Les 4 régimes hydriques	p 11
3.2. Les 6 modalités de fertilisation	p 11
<b>4. Règles de décision pour piloter l'irrigation</b>	<b>p 14</b>
4.1. Régime hydrique I1	p 14
4.2. Régime hydrique I2	p 14
4.3. Régime hydrique I3	p 14
<b>5. Les mesures réalisées</b>	<b>p 14</b>
5.1. Bilan d'azote	p 14
5.1.1. <i>Reliquats azote du sol</i>	p 14
5.1.2. <i>Azote prélevé par les plantes</i>	p 15
5.2. Bilan hydrique	p 15
5.2.1. <i>Humidité du sol</i>	p 15
5.2.2. <i>Tension du sol</i>	p 15
5.3. Qualité de l'eau	p 15
5.3.1. <i>Pendant le cycle du maïs</i>	p 15
5.3.2. <i>Pendant l'interculture</i>	p 16
<b>6. Les caractéristiques de l'analyse statistique</b>	<b>p 16</b>
6.1. Description du plan factoriel	p 16
6.2. L'analyse statistique	p 17

## RESULTATS

<b>Les résultats agronomiques azote x irrigation à Rouffach (1996-1998)</b>	p 18
Remarque préalable	p 18
<b>1. Caractérisation des années</b>	p 19
1.1 Régimes hydriques	p 19
1.2 Représentativité de l'été 96, 97 et 98 par rapport au climat moyen	p 24
<b>2. Suivi hydrique</b>	p 26
2.1 Evolution de la Réserve Utile	p 26
2.2 Suivis tensiométriques	p 32
2.2.1 <i>Par année</i>	p 32
2.2.2 <i>Déficit hydrique et somme des tensions</i>	p 39
<b>3. Les résultats agronomiques de l'année 1996</b>	p 43
3.1 Rendement, biomasse, azote absorbé	p 43
3.1.1. <i>Rendement</i>	p 43
3.1.2. <i>Biomasse</i>	p 44
3.1.3. <i>Azote absorbé</i>	p.45
3.2 Les reliquats	p 46
3.2.1 <i>Les reliquats théoriques</i>	p 46
3.2.2 <i>Les reliquats réels à la récolte</i>	p 49
3.2.3 <i>Comparaison reliquats théoriques et réels à la récolte</i>	p 50
<b>4. Les résultats agronomiques de l'année 1997</b>	p 51
4.1 Rendement, biomasse, azote absorbé	p 51
4.1.1. <i>Rendement</i>	p 51
4.1.2. <i>Biomasse</i>	p 52
4.1.3. <i>Azote absorbé</i>	p 53
4.2 Les reliquats	p 54
4.2.1 <i>Les reliquats théoriques</i>	p 54
4.2.2 <i>Les reliquats réels à la récolte</i>	p 56
4.2.3 <i>Comparaison reliquats théoriques et réels à la récolte</i>	p 57
<b>5. Les résultats agronomiques de l'année 1998</b>	p 58
5.1 Rendement, biomasse, azote absorbé	p 58
5.1.1. <i>Rendement</i>	p 58
5.1.2. <i>Biomasse</i>	p 59
5.1.3. <i>Azote absorbé</i>	p 60
5.2 Les reliquats	p 61
5.2.1 <i>Les reliquats théoriques</i>	p 61
5.2.2 <i>Les reliquats réels à la récolte</i>	p 62
5.2.3 <i>Comparaison reliquats théoriques et réels à la récolte</i>	p 64
<b>6. L'interaction eau -azote pendant les trois années</b>	p 65
6.1. Les graphiques de corrélation : introduction	p 65
6.2. L'azote absorbé en fonction de la dose d'azote : les CAU	p 65
6.3. Rendement et biomasse en fonction de l'azote absorbé	p 68
6.4. PMG et nombre de grains/m <sup>2</sup> en fonction de l'azote absorbé	p 71
6.5. Tableau récapitulatif	p 74

<b>Simulation du lessivage sur les sites de Rouffach et Hausen</b>	<b>p 75</b>
<b>1. Estimation des quantités lessivées pendant l'été</b>	<b>p 75</b>
1.1. <i>Présentation du modèle</i>	p 75
1.2. <i>Résultats</i>	p 76
1.3. <i>Limites du modèle</i>	p 77
<b>2. Simulation du lessivage hivernal par LIXIM</b>	<b>p 77</b>
2.1. <i>Simulation pendant l'hiver 97-98 à ROUFFACH</i>	p 77
2.1.1. Calage du modèle	p 78
2.1.2. Résultats de simulation	p 78
2.1.2.1. Les résultats concernant l'azote minéralisé cumulé	p 78
2.1.2.2. Les résultats concernant le lessivage	p 79
2.2. <i>Simulation à HAUSEN</i>	p 81
2.2.1. Présentation sommaire de l'expérimentation de Hausen	p 81
2.2.1.1. Conduite de la fertilisation	p 81
2.2.1.2. Conduite de l'irrigation	p 82
2.2.2. Calage du modèle	p 83
2.2.2.1. Hiver 1995-96	p 83
2.2.2.2. Hiver 1996-97	p 84
2.2.2.3. Hiver 1997-98	p 84
2.2.3. Les résultats de simulation	p 85
2.2.3.1. Hivers 1995-96	p 85
2.2.3.1.1. Les résultats concernant l'azote minéralisé cumulé	p 85
2.2.3.1.2. Les résultats concernant le lessivage	p 86
2.2.3.2. Hiver 1996-97	p 88
2.2.3.2.1. Les résultats concernant l'azote minéralisé cumulé	p 88
2.2.3.2.2. Les résultats concernant le lessivage	p 89
2.2.3.3. Hiver 1997-98	p 91
2.2.3.3.1. Les résultats concernant l'azote minéralisé cumulé	p 91
2.2.3.3.2. Les résultats concernant le lessivage	p 92
<b>Conclusion : Récapitulation des résultats de Hausen et Rouffach</b>	<b>p 94</b>
<b>Rentabilité économique de l'irrigation à Rouffach et Hausen</b>	<b>p 96</b>
<b>Conclusion générale</b>	<b>p 97</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>p 98</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>p 110</b>

## **POSITION DU PROBLEME :**

Le maïs est une culture importante dans la plaine du Rhin supérieur, où il valorise bien le contexte agro-climatique de cette région.

Néanmoins, c'est suite au développement de l'irrigation, que les surfaces en maïs n'ont cessé d'augmenter au cours des 30 dernières années. En effet, cette plante d'origine tropicale a de gros besoins en eau pendant la période estivale, et la présence de la nappe phréatique du fossé rhénan, qui constitue une ressource en eau abondante et facilement accessible, a largement contribué à son essor.

La proportion de maïs irrigué représente environ 50 % de la surface totale en maïs de la plaine et 30% de la sole totale en maïs. L'irrigation est surtout concentrée dans la petite région de la Hardt, sur les alluvions caillouteuses et filtrantes du Rhin qui étaient autrefois des prairies pauvres et sèches.

L'irrigation représente un important facteur de régulation du rendement, mais du fait de son développement, allié à l'intensification de la culture, en particulier au niveau de la fertilisation azotée, elle est jugée comme un facteur aggravant les risques d'entraînement des nitrates vers la nappe phréatique.

En Alsace comme dans le Bade-Wurtemberg, la préservation de la qualité des eaux souterraines en matière de nitrates passe, entre autres, par une meilleure gestion de la fertilisation azotée du maïs, mais aussi par une bonne gestion de l'irrigation. Elle doit être pilotée en fonction des besoins de la culture, du climat et des capacités de réserve en eau des sols. Avant tout, elle ne doit pas être excessive, surtout au début à une période où les besoins de la plante sont faibles et à une date proche de l'épandage des fertilisants azotés.

L'interaction entre niveau d'alimentation en eau et niveau de fertilisation est importante et agit à différents niveaux :

- augmentation du potentiel de rendement,
- action sur la mécanisation (rythme - intensité),
- risque d'accroissement du drainage en cas d'excès d'arrosage.

Il est donc nécessaire d'optimiser ces deux « intrants » et de contrôler à la fois le niveau de la production et l'évolution de l'azote du sol.

## **OBJECTIF :**

L'expérimentation mise en place en Alsace et en Bade-Wurtemberg de 1996 à 1998 a pour objet de comparer différentes combinaisons « dose d'azote x régime hydrique », afin de mettre en évidence les facteurs de risque pour l'environnement, mais aussi de confirmer le meilleur compromis qui permette d'assurer le revenu de l'agriculteur.

Le but de l'essai de Rouffach est de croiser des régimes hydriques et de fertilisation azotée du maïs en vue de déterminer la ou les solutions les plus intéressantes techniquement (rendement), économiquement (marge, système de culture), et environnementalement (limitation des fuites de nitrate).

Au cours de l'année 95 précédant le début de l'essai, un autre essai avait été mis en place par l'ITADA en vue d'améliorer la gestion de l'irrigation du maïs afin d'éviter le lessivage en profondeur des fertilisants azotés. Il comptait 5 niveaux de fertilisation et 4 régimes hydriques.

L'originalité de cette étude réside dans le fait qu'on étudie la qualité de l'eau qui passe sous les racines et donc susceptible d'atteindre la nappe phréatique.

Ce point a été particulièrement demandé par les financeurs. Seules quelques expérimentations de ce type existent en France, en effet souvent on s'arrête à la mesure des reliquats dans le sol.

L'autre originalité de cette expérimentation est que l'étude a une durée de trois ans. En effet, une étude réalisée sur plusieurs années permet d'intégrer la variabilité pluriannuelle et de ne diffuser que des éléments consolidés.

**Cette étude permet plusieurs points :**

- ◆ réaliser des bilans hydriques et azotés et les confronter aux données de production (rendement, élaboration du rendement).

- ◆ établir les courbes de réponse rendement-azote avec différents régimes hydriques.

- ◆ suivre la dynamique de l'azote du sol y compris pendant l'interculture et la période hivernale.

- ◆ connaître les fournitures du sol en azote pour des régimes hydriques variables.

- ◆ calculer le plus précisément possible les quantités de nitrate lessivé pour connaître l'effet des pratiques testées sur la qualité des eaux qui percolent.

# METHODES

## 1. Caractéristiques du site de l'essai

### 1.1. Localisation géographique

Rouffach : l'essai a lieu sur une parcelle du Lycée Agricole de Rouffach, dans la plaine d'Alsace. Cette région d'Alsace est généralement concernée par la culture du maïs irrigué. La nappe phréatique disposée sous ces secteurs présente un taux moyen de nitrate de l'ordre de 25 mg/litre.

Hausen : l'essai est situé sur la commune de Hausen, près de Bad-Krozingen au sud De Freiburg.

### 1.2. Les caractéristiques pédologiques

Rouffach : il s'agit d'un sol brun alluvial hydromorphe que l'on retrouve sur toute la bordure des Vosges dans le Haut-Rhin et une partie du Bas-Rhin. Ces sols sont considérés comme sensibles au lessivage.

### Les types de sol et les risques de lessivage des nitrates en Alsace

	Classe de risque de lessivage	Profondeur de la nappe	Réserve utile
Limons	Classe 1 : risques très limités	moyenne profondeur entre 2 et 6 m	220mm
Limons hydromorphes de débordement de l'III	Classe 4 : risques élevés	zone inondable remontée de la nappe	110mm
Sols argilo-sableux hydromorphes Ried Rhénan	Classe 4 : risques élevés	faible profondeur 0.5 à 1 m remontée de la nappe	105mm
Alluvions de rivières vosgiennes	Classe 4 : risques élevés		
Sols sablo-limoneux à limono-sableux	Classe 4 : risques élevés	faible profondeur 2 à 3 m	80mm
Sols très sableux du bord du Rhin	Classe 5 : risques très élevés	faible profondeur 2 à 3 m	55mm
Rieds bruns caillouteux	Classes 2 à 5 : risques limités à très élevés	faible profondeur 1 à 3 m	50 à 160mm

*Sources : Guide des sols d'Alsace, Plaine centre Alsace, ARAA.*

Hausen : il s'agit d'un sol brun profond développé sur la basse terrasse du Rhin (altitude 200 m). Il est décrit comme un limon –sableux de densité apparente de 1.57, doté d'une capacité au champ de 295 l/m<sup>2</sup> pour l'horizon 0-90 cm et une capacité au champ utile (nFK) de 160 l/m<sup>2</sup>. Les précipitations annuelles moyennes sont voisines de 644 mm avec environ 400 mm pendant la période de végétation active entre le 01 mars et le 30 novembre.

Les caractéristiques principales du sol sont les suivantes : teneur en humus = 3.1 %, rapport C/N = 10.7 , N total = 0.17 % ; pH = 6.5 ; teneurs P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 10 mg/10 g, K<sub>2</sub>O = 16 mg/100 g, Mg = 8.5 mg/100 g

### 1.2.1. Détermination de la réserve en eau du sol (Rouffach)

La détermination de la Réserve Utile (RU) ainsi que de la Réserve Facilement Utilisable (RFU) a été réalisée grâce à la formule suivante :

$$RU = (H_{cc} - H_{pf}) \times da \times z$$

avec :

◆ **H<sub>cc</sub>** : Humidité à la capacité au champ, valeur moyenne des humidités relevées sur le terrain après un événement pluvieux et après ressuyage.

◆ **H<sub>pf</sub>** : Humidité équivalente au point de flétrissement déterminée expérimentalement par l'INRA de Colmar par presse à membrane.

◆ **da** : densité apparente de terre fine mesurée expérimentalement par l'INRA de Colmar.

◆ **z** : épaisseur de la couche prospectable par les racines, déterminée grâce au profil racinaire mesuré par l'ARAA en 1991.

La RFU est calculée grâce à la formule suivante :

**RFU = 2/3 RU de 0 à 60 cm de profondeur d'enracinement**

**RFU=1/2 RU de 60 à 90 cm**

**RFU=1/3 RU au-delà de 90cm.**

Ainsi, en prenant les valeurs des tableaux ci-dessous et en prenant l'épaisseur de la couche prospectable par les racines égale à 1 mètre, on obtient par le calcul une **RU de 142 mm** et une **RFU de 81 mm** sur 1 m de profondeur.

Couches	da
0-30	1.25
30-45	1.55
45-70	0.93
70-80	1.16
80-115	1.09

Couches	H <sub>cc</sub>	H <sub>pf</sub>
0-30	27.0	13.0
30-80	23.0	11.0
80-100	18.0	9.0

### 1.2.2. Analyse de terre et profil pédologique

C'est un sol de type limon argilo-sableux, devenant limono-sablo-argileux, beige, au-delà de 50 cm, avec quelques taches de rouille, puis sablo-caillouteux orangé-grisé en profondeur (> 110 cm).

## 2. Matériel utilisé

### 2.1. Le matériel végétal

- Variété : **PACTOL** en 1996 et **ANJOU 285** en 1997 et 1998.
- Précocité : demi-précoce.
- Commercialisé par Maïs Angevin
- Destination : maïs grain
- Objectif de peuplement à la récolte : 110 000 plantes/m<sup>2</sup>.

ANJOU 285 représente l'une des variétés les plus cultivées en Alsace car elle est assez rustique et n'est pas trop sensible aux stress hydriques de courte durée.

### 2.2. Le choix du tensionic

En 1996, l'ITCF a mis en place des tensionics et des tensiomètres afin de comparer la précision des résultats. Cette étude a montré que le tensionic suit et même affine les mesures faites par le tensiomètre traditionnel, qui a déjà fait ses preuves depuis de nombreuses années. L'utilisation des tensionics a donc été conservée pour les deux années suivantes, au détriment des tensiomètres classiques.

De plus, le tensionic permet d'extraire des échantillons de la solution du sol et par conséquent d'accéder indirectement aux valeurs de concentration en ion nitrate du sol.

Le principe de fonctionnement est le suivant : une céramique poreuse, collée sur une canne d'accès, est introduite dans le sol dont on veut prélever la solution liquide disponible. Cette extraction est rendue possible grâce à une céramique type « haut flux » qui va permettre un transfert de solution sans dépression grâce à ses pores extrêmement fins ( $3 \mu\text{m} < \text{pores} < 6 \mu\text{m}$ ). La mise en place de la bougie poreuse sur le terrain implique le forage préalable d'un avant-trou de diamètre et de profondeur adaptés.

Le modèle « tensionic » permet d'une façon simple et non destructive d'accéder à la mesure du potentiel hydrique. Le principe d'utilisation de cet appareil consiste à le déplacer de canne en canne et effectuer la mesure en appliquant la sonde sur le tensionic, enfonçant ainsi une aiguille au travers du bouchon qui ferme la canne dans sa partie supérieure. L'aiguille va alors (ayant traversé le bouchon étanche) se trouver à la dépression qui règne à l'intérieur de la canne. Cette dépression, transmise à travers l'aiguille jusqu'au capteur, sera mesurée par la cellule située plus haut dans la sonde. La conception de cette sonde est telle que plusieurs « piqûres » successives sur la même canne, n'entraînent pratiquement aucune perte de dépression à l'intérieur de la canne.

Il est ainsi possible de suivre l'évolution du potentiel matriciel du sol. Il existe toutefois un décalage temporel entre une variation de la charge de pression dans le sol et la réaction du tensiomètre. Ce décalage est dû à la résistance hydraulique de la coupelle poreuse et à la qualité du contact entre cette dernière et le sol.

L'inconvénient majeur tient à la gamme limitée de charges de pression pour lesquelles il fonctionne. En effet, au-delà d'une charge de pression de l'ordre de 0.8 à 1.0 bar (pression atmosphérique), les pores de la coupelle se désaturent, permettant à l'air de s'introduire dans le corps de l'appareil, ce qui a pour effet d'équilibrer les pressions à valeur atmosphérique.

### 2.3. Le matériel d'irrigation

Le matériel utilisé pour la conduite de l'irrigation est une rampe frontale de type maraîchage (24 m de large) déplaçable sur 175 mètres. Elle est constituée de 4 tronçons de 6 mètres pouvant irriguer simultanément ou séparément grâce à une électrovanne. Elle émet un jet de type rideau permettant une irrigation homogène. Les trous sont espacés de 5 mm pour un débit total de 3 m<sup>3</sup>/heure.

La rampe frontale, dérivée du pivot dont elle conserve les travées et les tours, possède une centrale motrice qui se déplace en cours d'arrosage. L'alimentation est réalisée par une pompe immergée à 12 m de profondeur dans la nappe, d'une pression de 12 bars. La rampe frontale est un système fiable qui permet une bonne adaptation aux parcelles courants et une très bonne qualité et précision d'arrosage, y compris dans les coins. De plus, l'arrosage est peu sensible au vent.

L'eau d'irrigation provenant de la nappe phréatique, des quantités d'azote minéral supplémentaires sont par conséquent apportées ; le calcul montre qu'elles peuvent être négligées :

Prenons le cas le plus extrême : le régime hydrique le plus irrigué (5 mm/j) et l'année 98 pour laquelle on a apporté 280 mm en 8 irrigations. De plus, prenons comme valeur de concentration en nitrate dans la nappe 25 mg/l, ce qui correspond à la valeur mesurée sur le site même de Rouffach. Dans ces conditions, 280 mm d'une eau concentrée à 25 mg/l en nitrate apportent 84 kgN-NO<sub>3</sub>/ha, soit **16 unités d'azote**. La quantité d'azote apporté par irrigation est donc inférieure à 20 unités et peut donc être négligée car elle est apportée en été, en partie après le brunissement des soies, à une période où la plante est peu consommatrice en azote.

### 3. Analyse du dispositif

#### 3.1. Les 4 régimes hydriques

Le régime hydrique I1 est apporté par une irrigation raisonnée, conduite par tensiométrie durant tout le cycle. L'apport d'eau est de 3.5 mm/jour (soit 25 mm/ 7 jours).

Le régime hydrique I2 apporte 5 mm/j durant tout le cycle (soit 35 mm pendant 7 jours), à priori excessive au début et peut-être par la suite d'après des résultats antérieurs menés en Alsace.

Le régime hydrique I3 apporte 2 mm/j (soit 14 mm/ 7 jours), c'est une irrigation à priori restrictive d'après des résultats antérieurs en Alsace.

Enfin, le régime hydrique I4 est un régime alimenté par les précipitations naturelles uniquement (sans irrigation).

#### 3.2. Les 6 modalités de fertilisation

Le dispositif permet de réaliser 4 répétitions de chaque modalité (irrigation x azote), 16 traitements sont étudiés et disposés selon un dispositif factoriel en blocs. De plus, ce plan est incomplet puisque seulement 16 traitements sur les 24 potentiels sont étudiés :

		0 Azote	X-100	X-50	X	X+50	X+50+
		F1	F2	F3	F4	F5	F6
3.5 mm/j	I1			<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
5 mm/j	I2	<b>4</b>		<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
2 mm/j	I3	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	
0 mm	I4	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>			

- La combinaison optimale se trouve à priori dans le carré bleu central.
- Sur les parcelles non irriguées, la production est de toute façon limitée, de ce fait on étudie de faibles niveaux de fertilisation.
- Les parcelles 4, 9 et 14 ont pour but de connaître la dynamique de l'azote. On ne teste pas 3.5 mm/j car cette combinaison ne semble pas nécessaire.
- Les parcelles 8 et 10 ont été retenues car elles représentent des extrêmes.

Chaque parcelle comporte 8 rangs sur 10 mètres.

Les 6 modalités de fertilisation employées sont les suivantes :

F1 : Dose 0 Azote		
F2 : Dose X-100	(50 puis X-150)	Dose sous-optimale
F3 : Dose X-50	(50 puis X-100)	Dose sous-optimale
F4 : Dose X	(50 puis X-50)	Conseil Ferti Mieux
F5 : Dose X+50	(50 puis X)	Dose excédentaire
F6 : Dose X+50+	(100 puis X-50)	A éviter à priori en sol léger

La méthode de calcul de la dose X en Alsace a été établie en 1990 après 3 campagnes d'expérimentation ; validée depuis, et maintenant diffusée dans le cadre des conseils de l'opération « Ferti-Mieux ». La zone concernée par l'étude est celle de « Hardt eau vive », opération labellisée en 1993.

**Méthode du bilan utilisée en Alsace :**

**Besoins = Fourniture du sol + Engrais**

**Objectif de rendement x 2.3 +  $\Delta$  RAR = Fourniture du Sol (FS) + X.**

Objectif de rendement : fixé à partir d'une moyenne des rendements obtenus sur la même parcelle pendant 5 ans = 110 quintaux/ha.

$\Delta$  RAR : azote non utilisable (chiffre spécifique par région) = 10.

Fourniture du sol : grille par région établie grâce à des témoins 0 azote = 90.(confert tableau ci-contre).

X : dose d'engrais azotés à apporter.

**Pour Rouffach :**

**$X = 110 \times 2.3 + 10 - 90 = 173$  unités d'azote par hectare.**

**Grille des fournitures d'azote par le sol et des augmentations de reliquats après récolte, pour le maïs en Alsace (d'après l'A.R.A.A.).**

Maïs cultivé derrière maïs ou blé, sans apport organique.

Formation superficielle	Type de sol	Fournitures du sol kg N/ha		Augmentation du reliquat après récolte kg N/ha
		Irrigé	Non irrigué	
Alluvions rhénanes de la terrasse	« Hardt » superficiel	60		10
	« Hardt » profond	100		10
	« Ried brun » Centre Alsace (terrasses caillouteuses)	105		10
Alluvions rhénanes de la basse plaine	Sableux profond hydromorphe	100		20
	Sablo-caillouteux sains	100		20
Alluvions de l'III en plaine	Limons de l'III en amont de Colmar (Plaine de l'III)	<b>90</b>	60 si parcelle inondée au semis sinon 100.	10
	Ried noir Centre Alsace			20
	Ried gris Centre Alsace			20
	Ried noir nord Strasbourg		150	20
Alluvions des rivières vosgiennes	Sables de la Moder		70	10
	Sols lessivés limono-sblo-argileux profonds		100	25
	Sols caillouteux de l'Ochsenfeld	70		10
Loess et lehm	Loess (sauf Sungau)		130	25
	Lehm du Bas-Rhin		90	25
	Lehm sur loess		100	25
	Loess du Sundgau		100	25
	Lehm du Sundgau		90	25

## **4. Règles de décision pour piloter l'irrigation**

Pas de déclenchement d'irrigation avant 10 feuilles de maïs et avant le 15 juin.

### **4.1. Régime hydrique I1**

Le pilotage de l'irrigation se fait à l'aide des tensiomètres. Le démarrage (1ère irrigation) est déclenchée lorsque le premier tensiomètre (30 cm) monte rapidement en tension (>50 centibars). Le pilotage ultérieur se fait avec la règle de 25 mm/7 jours quand il ne pleut pas. Après une pluie, on redémarre au maximum 7 jours après la pluie (même si elle est supérieure à 25 mm), sauf si le tensiomètre à 50 cm de profondeur est supérieur à 40 centibars. Dans ce cas, on redémarre plus tôt.

### **4.2. Régime hydrique I2**

A partir du stade 10 feuilles, on arrose à raison de 35 mm tous les 7 jours si les 10 jours précédents n'ont pas eu de pluie significative. Si une pluie supérieure à 10 mm intervient, on décale le tour d'eau d'un nombre de jours égal à la valeur de pluie/5. Exemple : une pluie de 15 mm décale le tour d'eau de 3 jours. Redémarrer au maximum 7 jours après la pluie (soit 35 mm dans la réserve) car il faut tenir compte du remplissage complet de la réserve.

### **4.3. Régime hydrique I3**

Pour le démarrage, on procède de la même façon que pour I1 mais avec des apports d'eau de 14 mm tous les 7 jours. Même règle pour la pluie, 15 mm décale l'irrigation de 3 jours. On garde les mêmes règles de décision que pour I2 car on ne veut pas pénaliser le rendement.

## **5. Les mesures réalisées**

### **5.1. Bilan d'azote**

L'objectif est de connaître la dynamique de l'azote et établir le bilan azoté de la parcelle.

#### **5.1.1. Reliquats azote du sol**

Les mesures des quantités d'azote minéral du sol ont été réalisées aux périodes suivantes :

3 dates de mesure en 1996 : semis, récolte ensilage et « sortie hiver ».

3 dates de mesure en 1997 : récolte ensilage, retour drainage du sol et « sortie hiver ».

2 dates de mesure en 1998 : retour drainage et « sortie hiver ».

Les mesures sont effectuées sur 3 horizons (0-30, 30-60 et 60-90 cm).

1 échantillon moyen pour chacun des 16 traitements est amené à analyser au laboratoire d'analyses agricoles de la S.A.D.E.F. à Aspach-Le-Bas (68).

### **5.1.2. Azote prélevé par les plantes**

Ces mesures sont réalisées au stade ensilage : 35% MS. On distingue les quantités d'azote présentes dans les tiges, de celles des feuilles et de celles des épis. Les échantillons de plantes sont analysés par la S.A.D.E.F..

2 données sont obtenues par traitement (blocs I+II, III+IV)

## **5.2. Bilan hydrique**

L'objectif initial était d'effectuer le bilan eau sur 3 traitements et de déterminer la date de début de drainage.

### **5.2.1. Humidité du sol**

Les mesures ont été réalisées sur les traitements des parcelles 2, 8 et 11 pour chaque année en prélevant 8 échantillons à la tarière par traitement (soit 24 carottes) en distinguant 15 cm par 15 cm (après avoir enlevé les 10 premiers centimètres de sol), puis mise à l'étuve pendant 24 heures à 105°C.

### **5.2.2. Tension du sol**

Les relevés tensiométriques ont été effectués 3 fois par semaine pendant tout le cycle du maïs.

Matériel mis en place :

Parcelle/Profondeur des tensionics	25 cm	50 cm	80 cm
2	2	2	2
8	2	2	2
11			2

## **5.3. Qualité de l'eau**

### **5.3.1. Pendant le cycle du maïs**

Les prélèvements d'eau des tensionics ont été réalisés aux dates suivantes :

1/5 - 1/6 - 20/6 - 10/7 - 30/7 - 20/8 - 10/9 puis tous les mois jusqu'à la rétention.

8 tensionics ont été utilisés par traitement (2/répétition x 4 blocs) et par profondeur (25, 50, 80, 100). Seules les mesures des traitements des parcelles 2, 8 et 11 ont été effectuées. Les prélèvements d'eau ont été réalisés à toutes les profondeurs.

Des mesures au Nitratschek (bandelettes merck) ont été utilisées pour la détermination des concentrations en nitrate.

### 5.3.2. Pendant l'interculture

A partir de la date de rétention, les prélèvements ont été faits tous les 15 jours.

Parcelle	Profondeur tensionics			
	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm
2	1	1	1	2
8	1	1	1	2
11	-	-	1	2

#### Préparation des bougies tensionics pour l'hiver :

Mélange d'alcool et d'eau : 5% alcool à brûler (éthylque dénaturé) et 95% d'eau dégazée déminéralisée.

Protection des tubes (isolant mousse, scotch aluminium et cloche en PVC). Photographie ci-contre.

## 6. Les caractéristiques de l'analyse statistique

### 6.1. Description du plan factoriel

Répartition au hasard, bloc par bloc de toutes les combinaisons des différentes modalités des 2 facteurs. Le nombre de traitements à étudier est égal à la multiplication des niveaux d'étude de chacun des 2 facteurs.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hétérogénéité entre blocs en partie contrôlée et son influence éliminée</li> <li>- Précision optimale pour comparer les 2 facteurs et leurs interactions</li> <li>- Facile à visiter et à mettre en place</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contrôle limité, car si les blocs sont trop différents, l'interaction traitements x blocs augmente et les tests perdent de leur puissance</li> <li>- Risque de perte de puissance si aucune hétérogénéité (0 effet bloc).</li> </ul>

Avantage statistique, mais inconvénient pratique :

Avec le dispositif « factoriel en bloc », il faut épandre de l'azote et irriguer parcelle après parcelle.

Avec les dispositifs « split-plot » et « criss-cross », l'azote est épandu sur tous les sous-blocs en un seul passage. Il y a un gain de temps et une facilité de réalisation (irrigation), mais ce type de dispositif fait généralement perdre de la précision dans l'étude des facteurs en sous-bloc.

Ainsi, dans cet essai, la garantie de résultats précis a été privilégiée malgré les contraintes pratiques.

Il s'agit d'un dispositif expérimental du type factoriel comprenant 4 blocs, et chaque bloc constitué de 16 modalités, c'est-à-dire 16 placettes.

- Le dispositif permet de réaliser 4 répétitions de chaque modalité (irrigation x azote), 16 traitements étudiés et disposés selon un dispositif factoriel en blocs.

- La surface maximale irrigable par la rampe a les dimensions suivantes :24 m sur 180.
- A l'origine le protocole prévoyait 24 combinaisons : 6 fertilisations x 4 irrigations.
- Sur une largeur de 24 m (4 x 6), on peut placer 4 micro-parcelles de 6 m x 10 m.
- Donc, il y avait possibilité de mettre en place seulement 64 micro-parcelles. Celles-ci devaient être séparées en 4 blocs identiques pour répondre au principe des 4 répétitions dictées par le protocole (annexe 19).

**- Il fallait donc choisir 16 modalités parmi les 24.**

## 6.2. L'analyse statistique

L'analyse statistique a été réalisée grâce au logiciel de statistiques Statitcf. Le plan du dispositif est un plan en blocs aléatoires. De plus, il est incomplet puisqu'il n'y a que 16 traitements analysés sur les  $6 \times 4 = 24$  traitements potentiels. Le risque  $\alpha$  fixé est de 5% pour toutes les analyses.

Le test de comparaison des moyennes utilisé est le test de Newman et Keuls au seuil 5% et épisodiquement la méthode des contrastes pour des cas particuliers.

Une analyse plus précise a été réalisée sur 9 traitements seulement par « élimination de niveaux de facteurs », c'est à dire en supprimant les données de certains traitements :

	120 unités	170 unités	220 unités
3.5 mm/j	1	2	3
5 mm/j	4	5	6
2 mm/j	7	8	9

Cette démarche a été adoptée pour l'analyse des tableaux de rendement, biomasse et azote absorbé pour chaque année. Mais les résultats sont décevants puisque l'on obtient les mêmes groupes homogènes qu'avec l'analyse de tous les traitements. L'écart-type est globalement amélioré mais les résultats n'apportent pas de précisions supplémentaires.

L'analyse statistique a également été réalisée avec un plan factoriel pour l'étude de 2 facteurs (apport d'azote et régime hydrique) et de leur interaction en modèle croisé complet équilibré (comme le montre le tableau ci-dessus). Cette analyse a porté sur les trois années mais aucune interaction statistique entre les deux facteurs n'a pu être mise en évidence. Aucune information supplémentaire n'a pu être tirée de cette analyse qui ne faisait que confirmer des résultats déjà mis en évidence.

# RESULTATS

## Les résultats de l'expérimentation azote x irrigation à Rouffach (1996-1998)

### Remarque préalable

L'essai mené depuis trois ans au Lycée Agricole de Rouffach a pour thème central l'étude de l'interaction entre eau et azote sous monoculture de maïs. L'analyse des différentes variables agronomiques ne peut cependant être réalisée sans négliger ou du moins signaler les possibles arrière-effets de fertilisation. En effet, le plan de l'essai étant le même pour les trois années, les reliquats de fertilisation de l'année précédente pour chacun des traitements expérimentaux susceptibles d'être encore présents au moment du semis peuvent biaiser l'analyse.

Ainsi, nous n'obtenons pas des courbes de réponse à l'azote à proprement parler puisque chaque année, la même dose d'engrais et le même régime hydrique sont apportés à chaque parcelle. Ainsi, au début de l'année 1999, la parcelle ayant reçu 220 unités pendant ces 3 années est plus fertilisée que la parcelle n'ayant reçu que 120 unités par an. Cet arrière-effet est à prendre en compte pour l'analyse ultérieure.

Afin de savoir s'il faut tenir compte de cet effet dans l'analyse ou s'il peut être négligé, il suffit de connaître les quantités lessivées pendant l'interculture : si ces quantités lessivées se révèlent être suffisamment importantes, alors on pourra négliger l'arrière effet de fertilisation. Sinon, la différence de reliquat entre une parcelle non fertilisée et une parcelle fertilisée avec une dose quelconque au moment du semis devra être retenue pour l'analyse ultérieure des paramètres agronomiques.

Les itinéraires culturaux des trois années d'étude sont mentionnés en Annexe 6.:

# 1. Caractérisation des années

## 1.1. Régimes hydriques

Tableau page suivante:

Il n'y a pas de période sèche bien marquée en **1996** : les 22 jours les plus secs de l'année reçoivent quand même 25 mm de précipitations (colonnes de droite). Le débit d'eau apporté pendant cette période la plus sèche est le même pour les régimes 3.5 et 5 mm/j, bien que la dose totale apportée par l'irrigation distingue bien les deux régimes. Ceci est dû à une période d'irrigation bien plus étalée dans le temps pour le régime 5 mm/j. En 1996, on distingue d'une manière nette deux groupes de régimes hydriques seulement, (5 mm/j et 3.5 mm/j par rapport à 2 mm/j).

En **1997**, les deux régimes 3.5 et 5 mm/j sont bien différenciés, que ce soit au niveau du débit, ou au niveau du volume total apporté (120 mm de plus pour le régime 5 mm/j). Par contre, les débits des régimes 2 et 3.5 mm/j sont assez proches, surtout en période sèche, et la dose totale apportée n'est supérieure que de 41 mm en faveur du régime 3.5 mm/j.

En **1998**, on observe une nette hiérarchie entre les 3 débits des régimes à tous les niveaux tout au long de la période d'irrigation. De plus, les doses totales d'eau apportées sont bien réparties : 88 mm de plus pour le régime 3.5 par rapport au régime 2 mm/j ; et 80 mm de plus pour le régime 5 comparé au régime 3.5 mm/j. Le tableau du bas de la page représente la dose totale, le débit d'irrigation et le débit de l'eau apportée par l'irrigation et les pluies en 1998, pour chaque régime pendant trois phases. Ces trois phases seront utilisées et définies par la suite lors des commentaires des graphes des relevés tensiométriques et correspondent globalement à trois phases successives basées sur des sommes de température et des stades de développement du maïs.

Ainsi peut-on apprécier la répartition assez équitable entre les trois phases avec cependant des débits plus élevés pendant la troisième phase en ce qui concerne les régimes 2 et 5 mm/j.

## Caractérisation des régimes hydriques appliqués

### 1996

Traits	Date première irr	Date dernière irr	Dose totale(mm)	mm d'irr/j	mm de P et I /j	mm d'irr/j période sèche	Pluies de la période sèche
						Du 29/7/96 au 19/8/96	
2mm	24/07/96	20/08/96	42	1.08	2.58	1.01	25mm -- 22jours
3.5mm	22/07/96	20/08/96	100	2.68	4.21	1.93	25mm -- 22jours
5mm	01/07/96 (2è irr)	21/08/96	175	2.10	5.76	1.94	25mm -- 22jours

### 1997

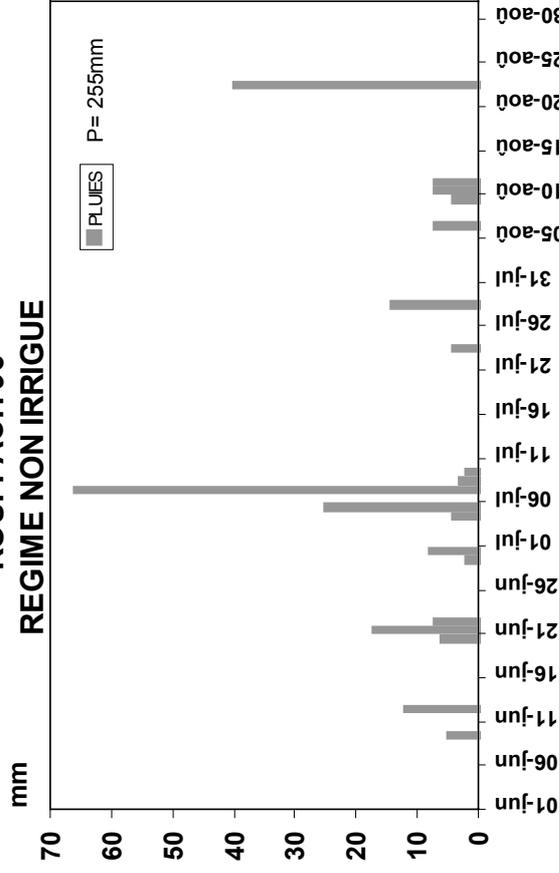
Traits	Date première irr	Date dernière irr	Dose totale(mm)	mm d'irr/j	mm de P et I /j	mm d'irr/j période sèche	Pluies de la période sèche
						Du 18/7/97 au 5/8/97	
2mm	18/07/97	26/08/97	84	1.84	3.32	2.1	24mm -- 19jours
3.5mm	18/07/97	26/08/97	125	2.63	4.11	2.6	24mm -- 19jours
5mm	10/07/97	27/08/97	245	4.47	6.02	5	24mm -- 19jours

### 1998

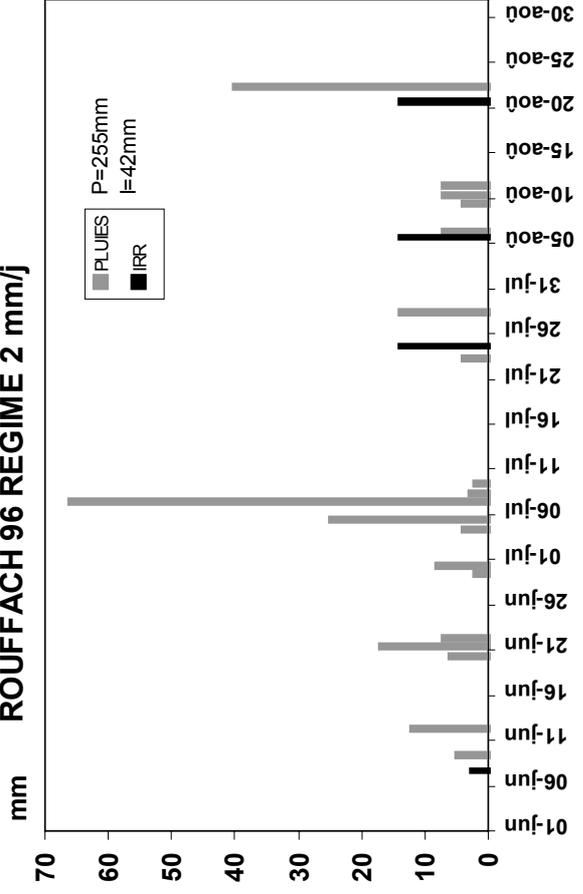
Traits	Date première irr	Date dernière irr	Dose totale(mm)	mm d'irr/j	mm de P et I /j	mm d'irr/j période sèche	Pluies de la période sèche
						Du 23/6/98 au 23/7/98	
2mm	23/06/98	21/08/98	112	1.69	2.74	1.81	8.5mm -- 31jours
3.5mm	23/06/98	26/08/98	200	2.78	3.91	3.23	8.5mm -- 31jours
5mm	24/06/98	21/08/98	280	4.30	5.37	4.52	8,5mm -- 31jours

	Phase 1	Du 17/6 au 5/7	28	1.33	1.95		
<b>2mm</b>	Phase 2	Du 6/7 au 5/8	42	1.35	2.61		
	Phase 3	Du 6/8 au 25/8	42	2.10	3.33		
	Phase 1	Du 17/6 au 5/7	50	2.38	3.00		
<b>3,5mm</b>	Phase 2	Du 6/7 au 5/8	75	2.42	3.68		
	Phase 3	Du 6/8 au 25/8	50	2.50	3.73		
	Phase 1	Du 17/6 au 5/7	70	3.33	3.95		
<b>5mm</b>	Phase 2	Du 6/7 au 5/8	105	3.39	4.65		
	Phase 3	Du 6/8 au 25/8	105	5.25	6.48		

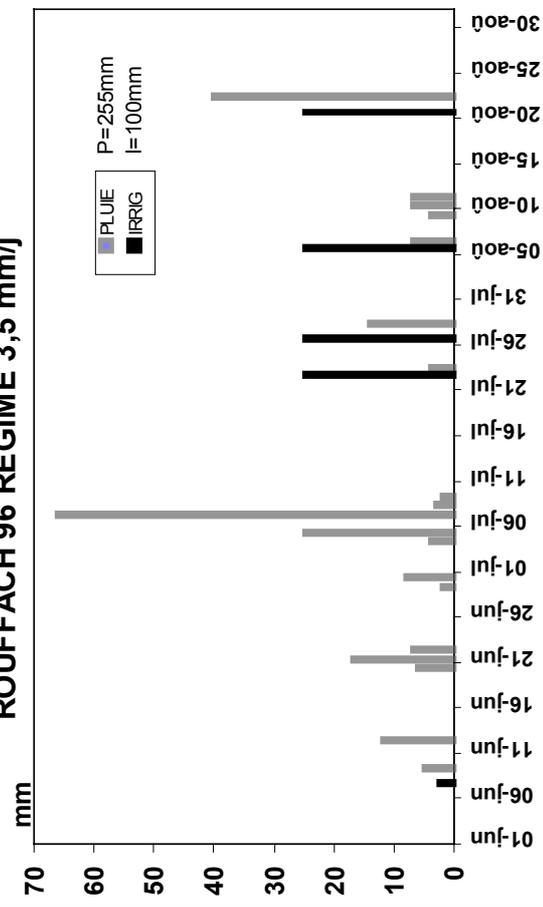
### ROUFFACH 96 REGIME NON IRRIGUE



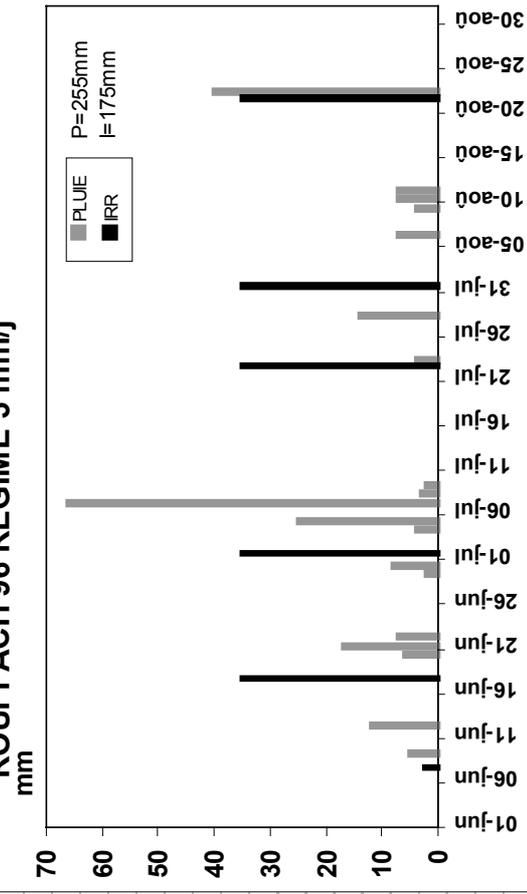
### ROUFFACH 96 REGIME 2 mm/j



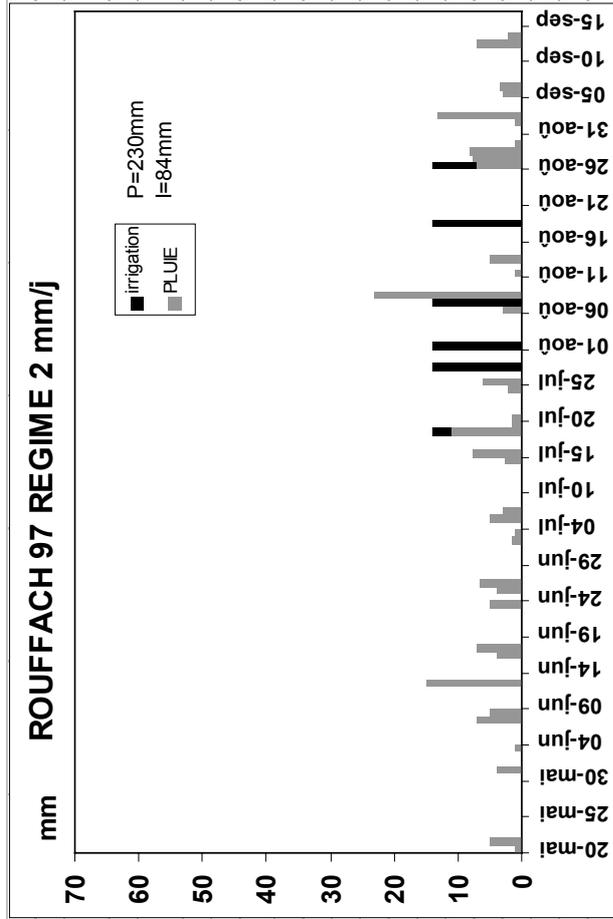
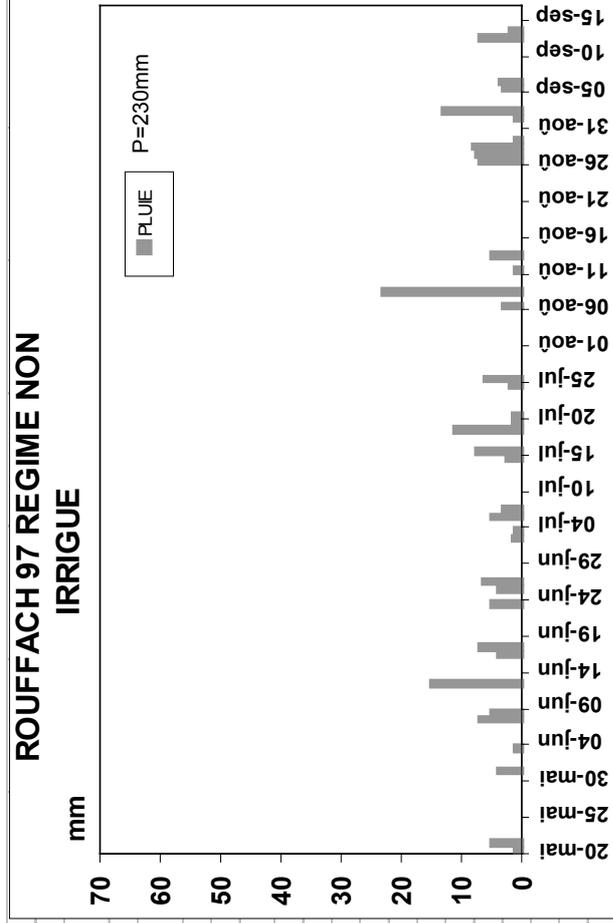
### ROUFFACH 96 REGIME 3,5 mm/j



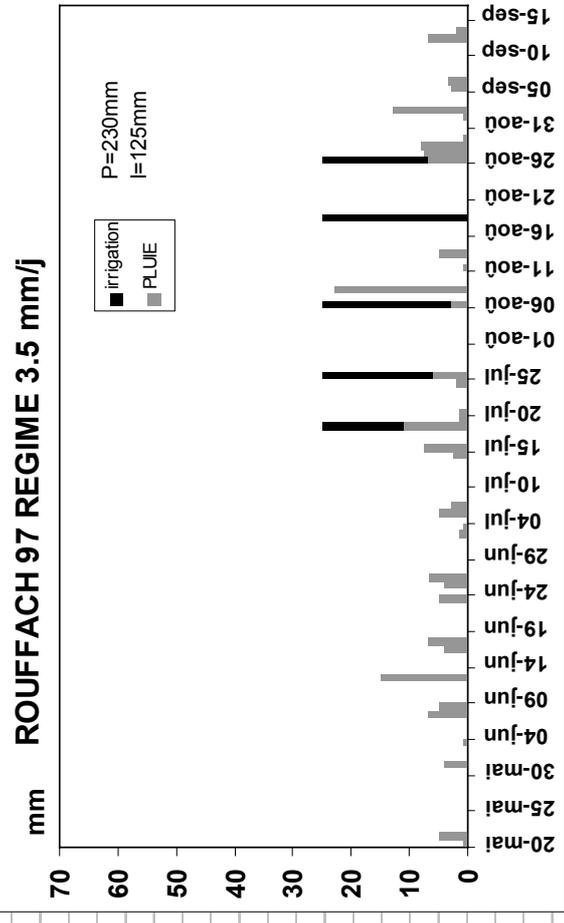
### ROUFFACH 96 REGIME 5 mm/j



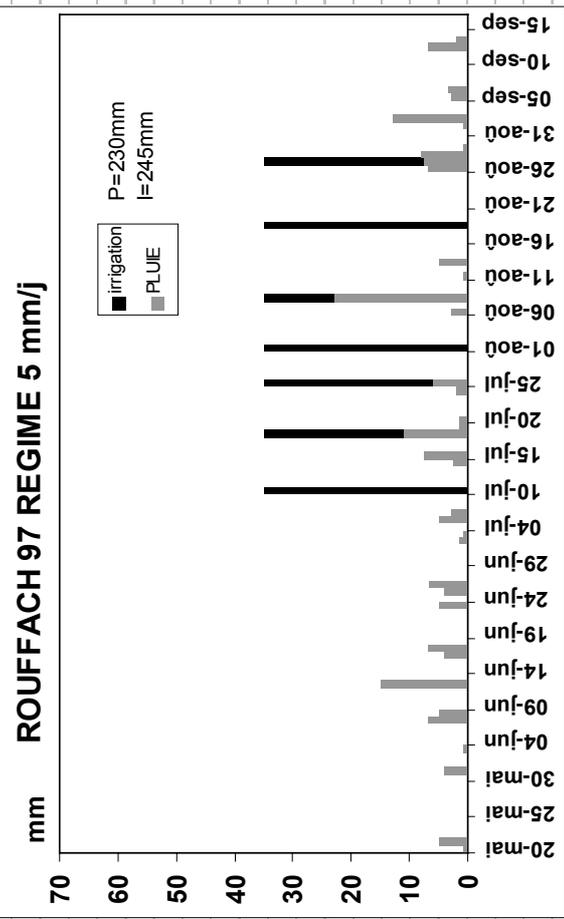
### ROUFFACH 97 REGIME NON IRRIGUE



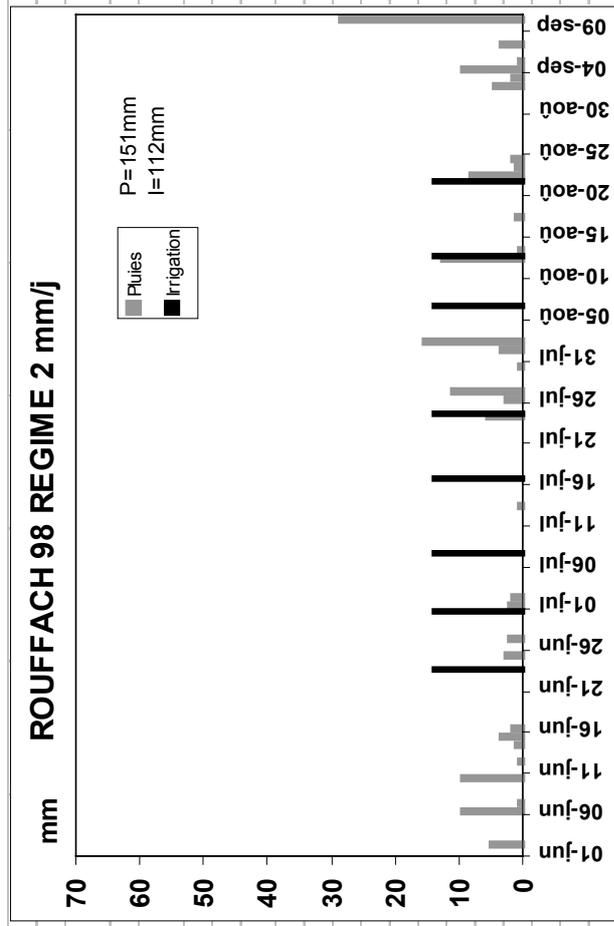
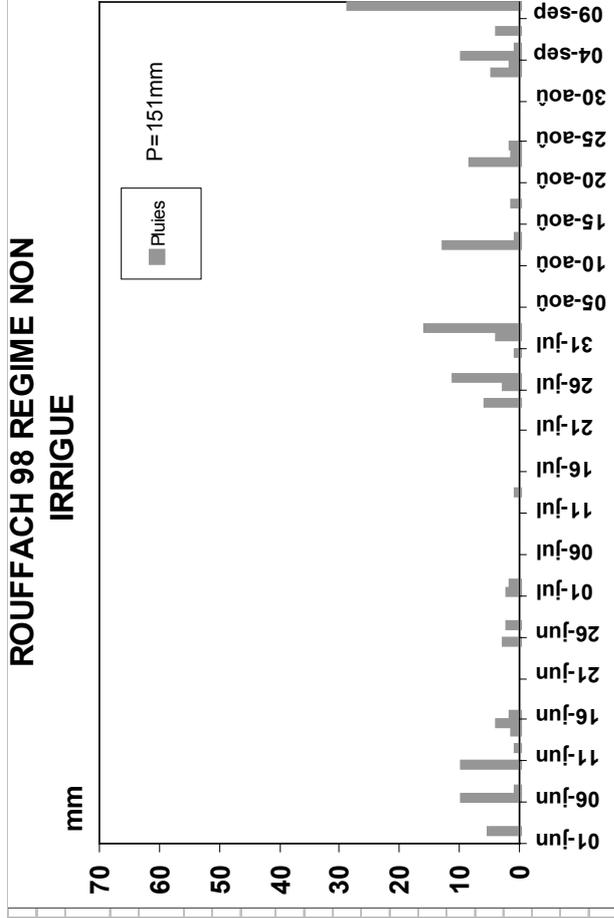
### ROUFFACH 97 REGIME 3.5 mm/j



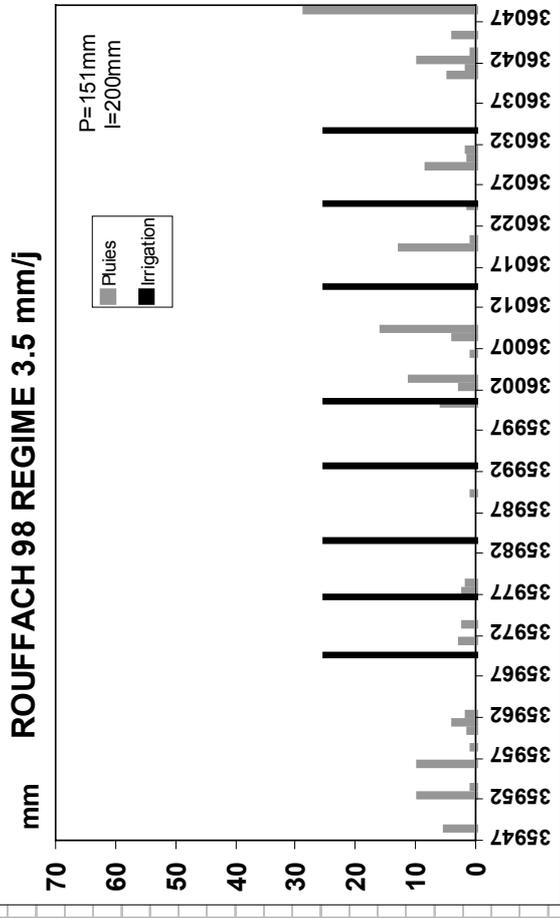
### ROUFFACH 97 REGIME 5 mm/j



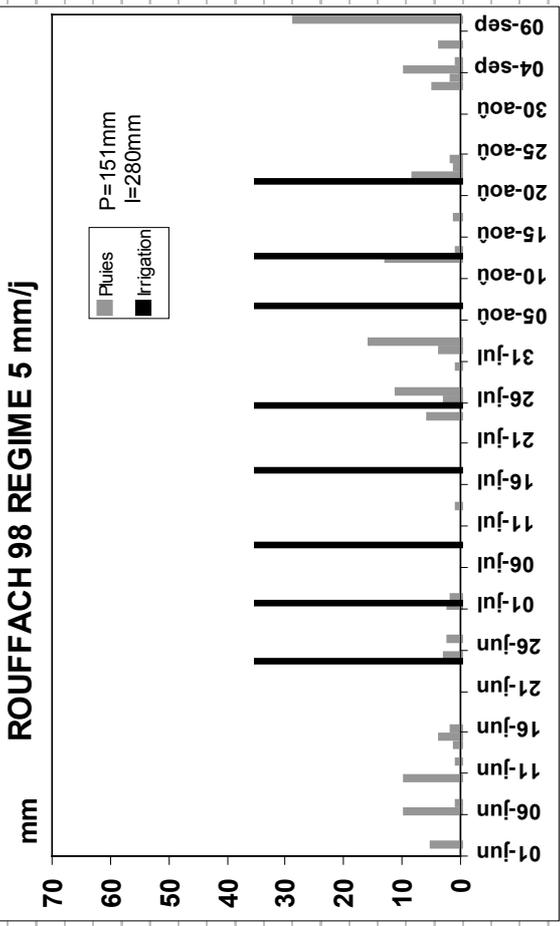
### ROUFFACH 98 REGIME NON IRRIGUE



### ROUFFACH 98 REGIME 3.5 mm/j



### ROUFFACH 98 REGIME 5 mm/j



## 1.2. Représentativité de l'été 96, 97 et 98 par rapport au climat moyen

Les chiffres portés dans le tableau de la page suivante représentent les valeurs de (**k\*ETP-P**) cumulées journalièrement, à la fin de chaque mois (juin, juillet, août), ainsi que pour les mois de (juin + juillet), et (juin + juillet + août). Ils sont calculés à partir du poste météorologique de Meyenheim distant d'une dizaine de kilomètres de Rouffach. Le poste de Meyenheim est utilisé car les données sont disponibles depuis 1957.

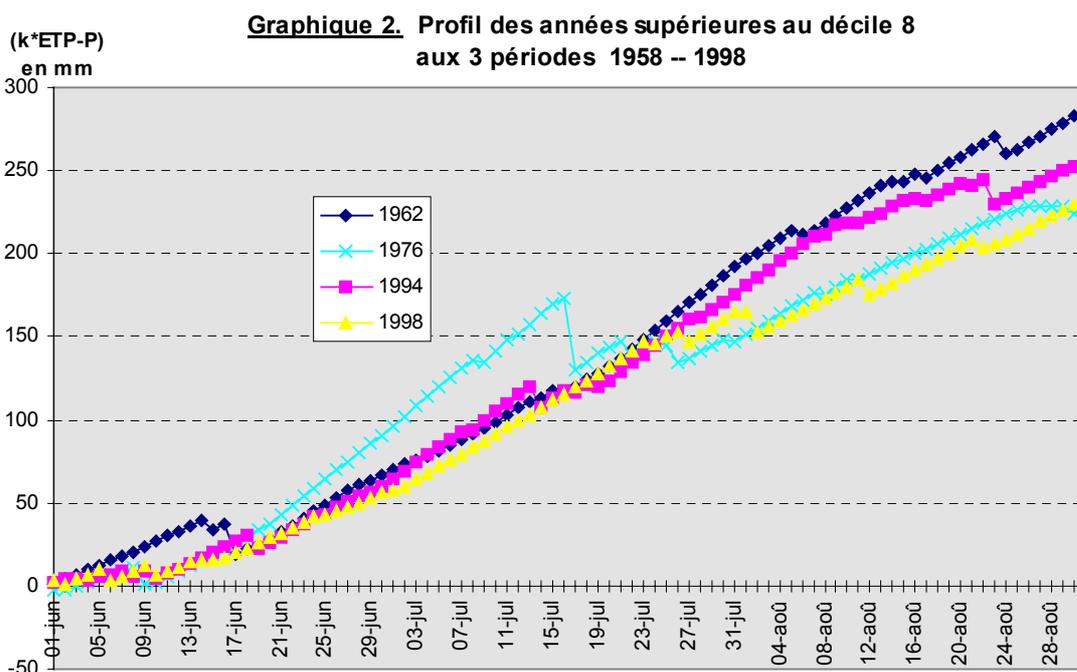
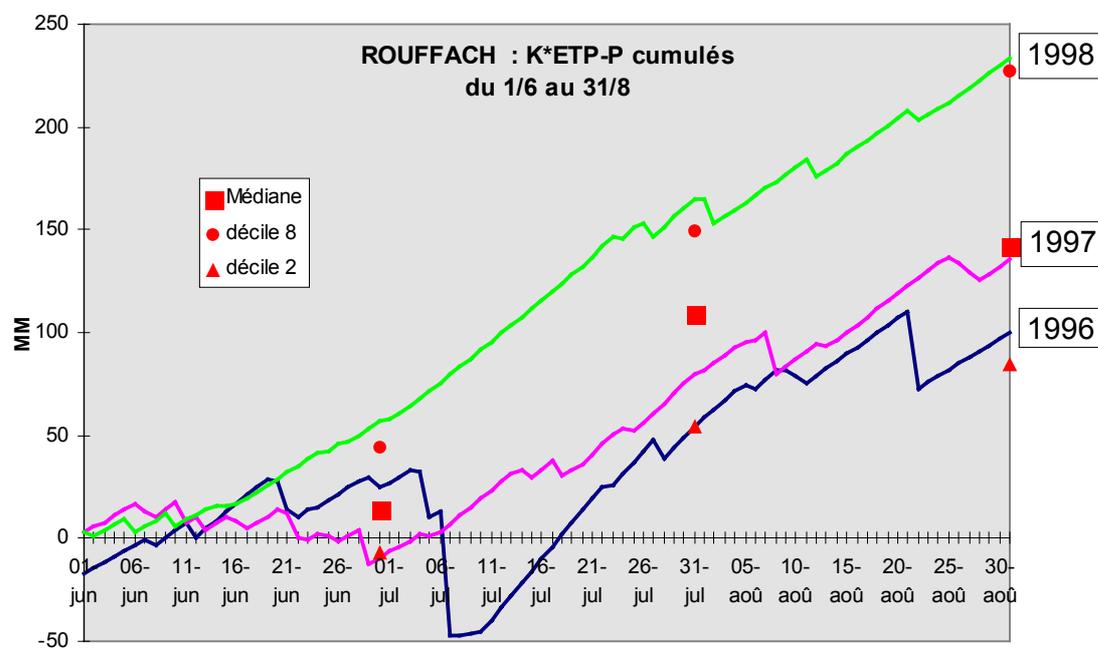
En **1996**, le mois de juin apparaît un peu plus sec que les valeurs moyennes climatiques du site. Le mois de juillet est, quant à lui, plus humide et se situe même parmi les 20% des mois de juillet observés en 40 ans les plus humides à cause de précipitations importantes en début de mois. Le mois d'août se situe dans les valeurs moyennes. Sur l'ensemble des 3 mois, l'été 1996 apparaît plus humide que le climat médian du site avec notamment la période de juin et juillet très humide.

Excepté le mois de juin qui apparaît plus humide que la médiane, l'été **1997** demeure globalement un été climatiquement moyen avec des valeurs proches de la médiane.

Les 3 mois de **1998** apparaissent plus secs que le climat médian, surtout le mois de juin qui est dans le décile 8 donc parmi les 20% d'années les plus sèches de la série. C'est également le cas pour le mois de juillet. Août, bien que plus sec que la médiane n'atteint pas les valeurs extrêmes du décile 8. Au final pour les 3 mois, l'été 98 est nettement plus sec que le climat moyen du site avec une sécheresse très marquée pendant la période des deux mois juin et juillet. Il se situe parmi les 20% d'années les plus sèches.

De plus, en analysant le graphique 2, on observe que 1998 est dépassée par seulement 3 années aux trois dates (30/6, 31/7 et 31/8) en 40 ans de données météorologiques, ce qui confirme le caractère très sec de l'été de cette année par son intensité et sa durée, notamment pendant la période du 20 juillet pour laquelle les valeurs de (**k\*ETP-P**) cumulées atteignent les valeurs très élevées des 3 années les plus sèches de la série climatique.

	1996	1997	1998	moyenne	médiane	décile 2	décile 8
1/6 au 30/6	24.6	-9.9	56.6	17.9	14.5	-7.3	43.8
1/7 au 31/7	29.5	89.5	108.5	86.7	96.2	52.2	116.5
1/8 au 31/8	45.9	55.7	68.2	46.1	46.8	10.7	84.4
1/6 au 31/7	54.1	79.7	165.2	104.7	109.0	54.1	149.8
1/6 au 31/8	100.0	135.3	233.3	150.7	142.2	84	227



## 2 Suivi hydrique

### 2.1. Evolution de la Réserve Utile

Les graphiques concernant l'évolution de la réserve utile dans le sol ont été établis à partir du modèle suivant :

$$R_j = R_{j-1} + P_j + I_j - ETR_j$$

où :

**R<sub>j</sub>** = réserve en eau du sol au jour j.

**R<sub>j-1</sub>** = réserve en eau du sol au jour j-1.

**P<sub>j</sub>** = mm de pluies tombées le jour j.

**I<sub>j</sub>** = mm d'eau apportée par irrigation au jour j.

**ETR** = évapotranspiration réelle du jour j.

Cependant, la valeur de R<sub>j</sub> est maximale quand elle atteint la valeur de la RU et ne peut pas dépasser cette valeur.

ETR est calculée de la façon suivante :

$$ETR = k'' ETP$$

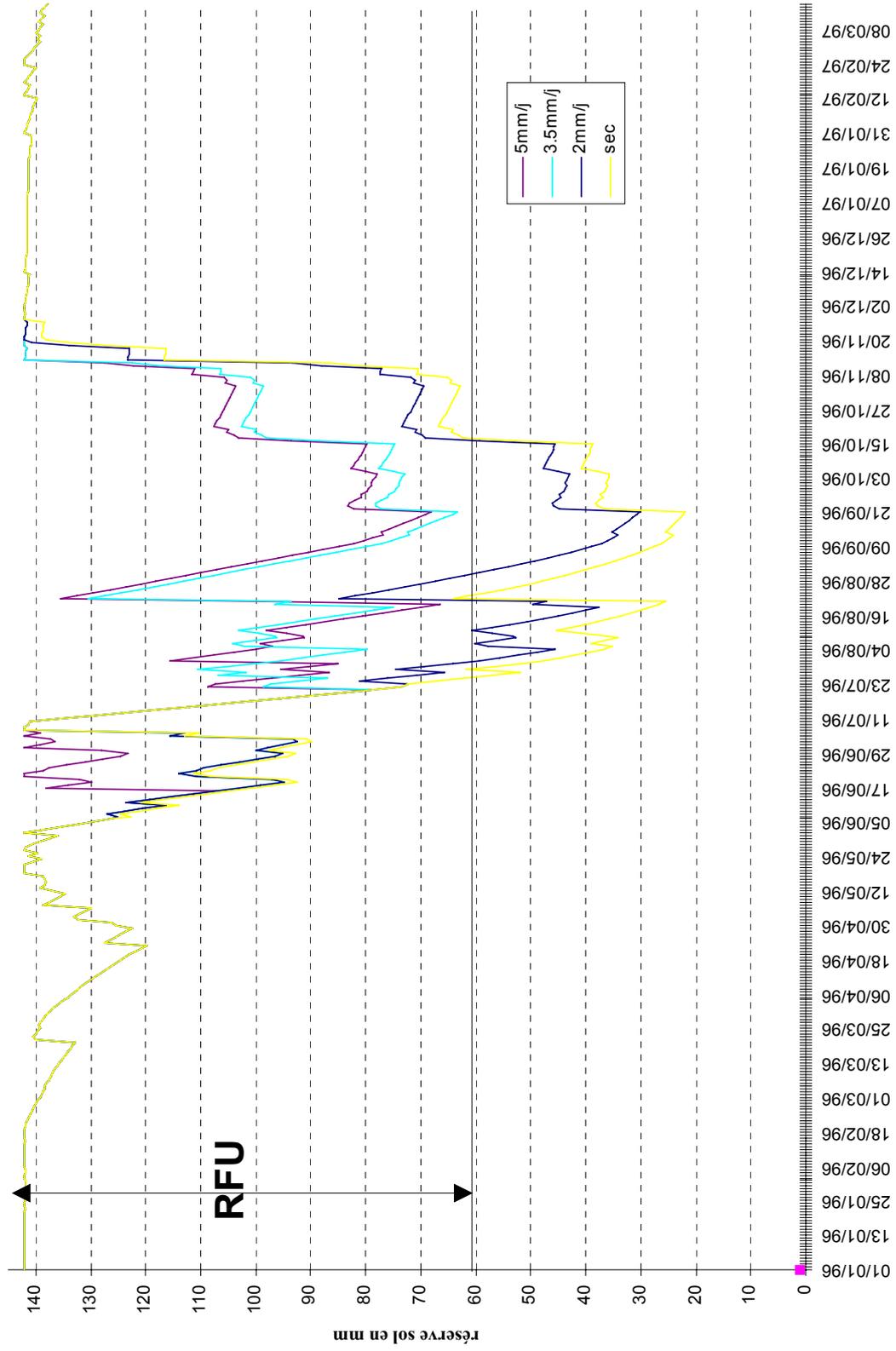
où : **k''** = **k**, coefficient cultural quand **R<sub>j</sub> > RU-RFU**.

Et **k'' = (R<sub>j</sub>)/(RU-RFU) x k x ETP** quand **R<sub>j</sub> < RU-RFU**.

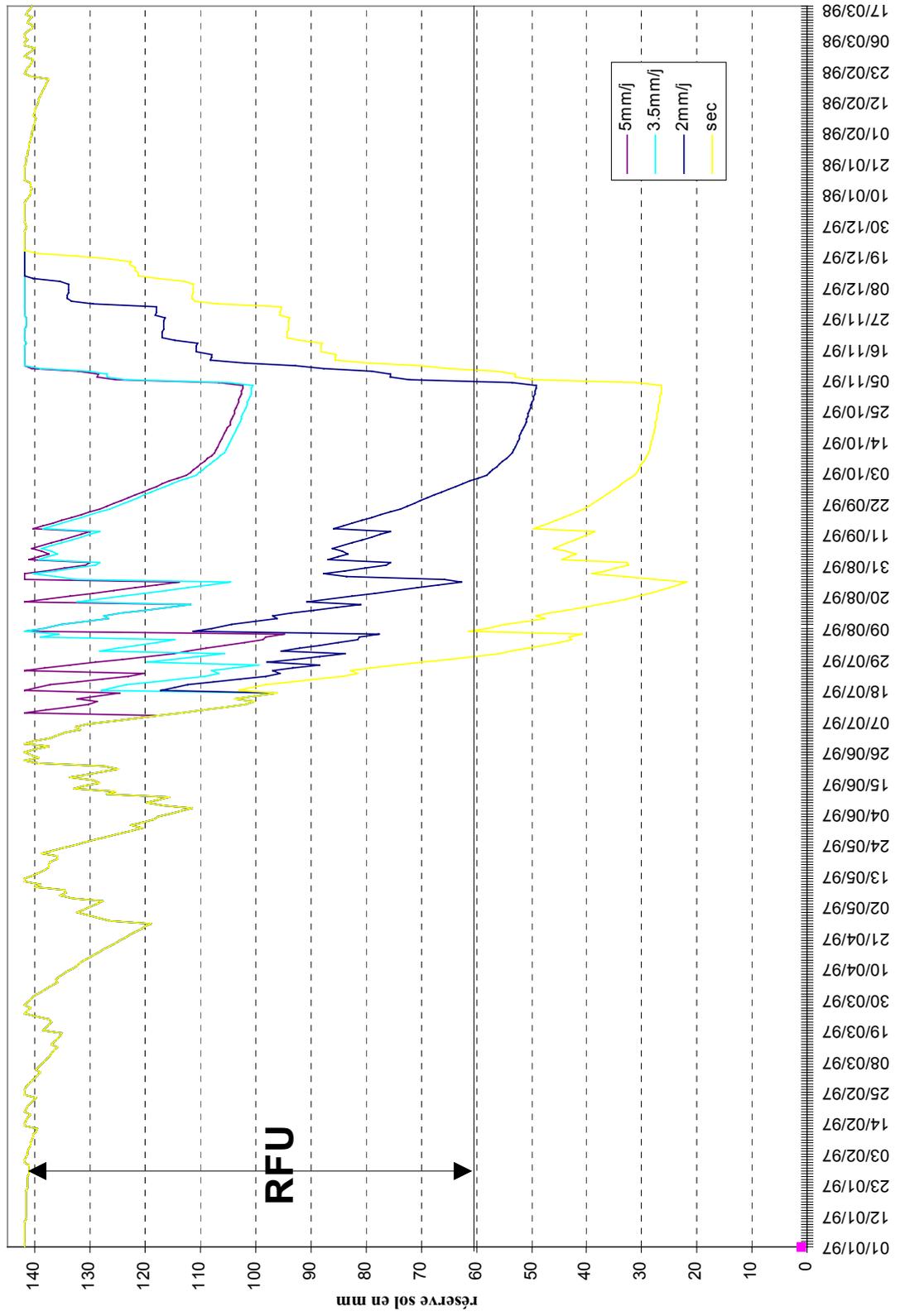
En effet, quand la réserve du sol passe dans la réserve de survie, la plante ne garde pas ses stomates grand ouvert et ne transpire donc pas d'une manière optimale, cet effet est pris en compte en diminuant d'autant plus la valeur du coefficient cultural que la réserve en eau du sol est faible.

RU étant la réserve utile (142 mm) et RFU étant la réserve facilement utilisable ( 81 mm) calculées dans le chapitre « matériel et méthode ». Les ETP sont décadaires et sont celles fournies par le poste météorologique de Meyenheim.

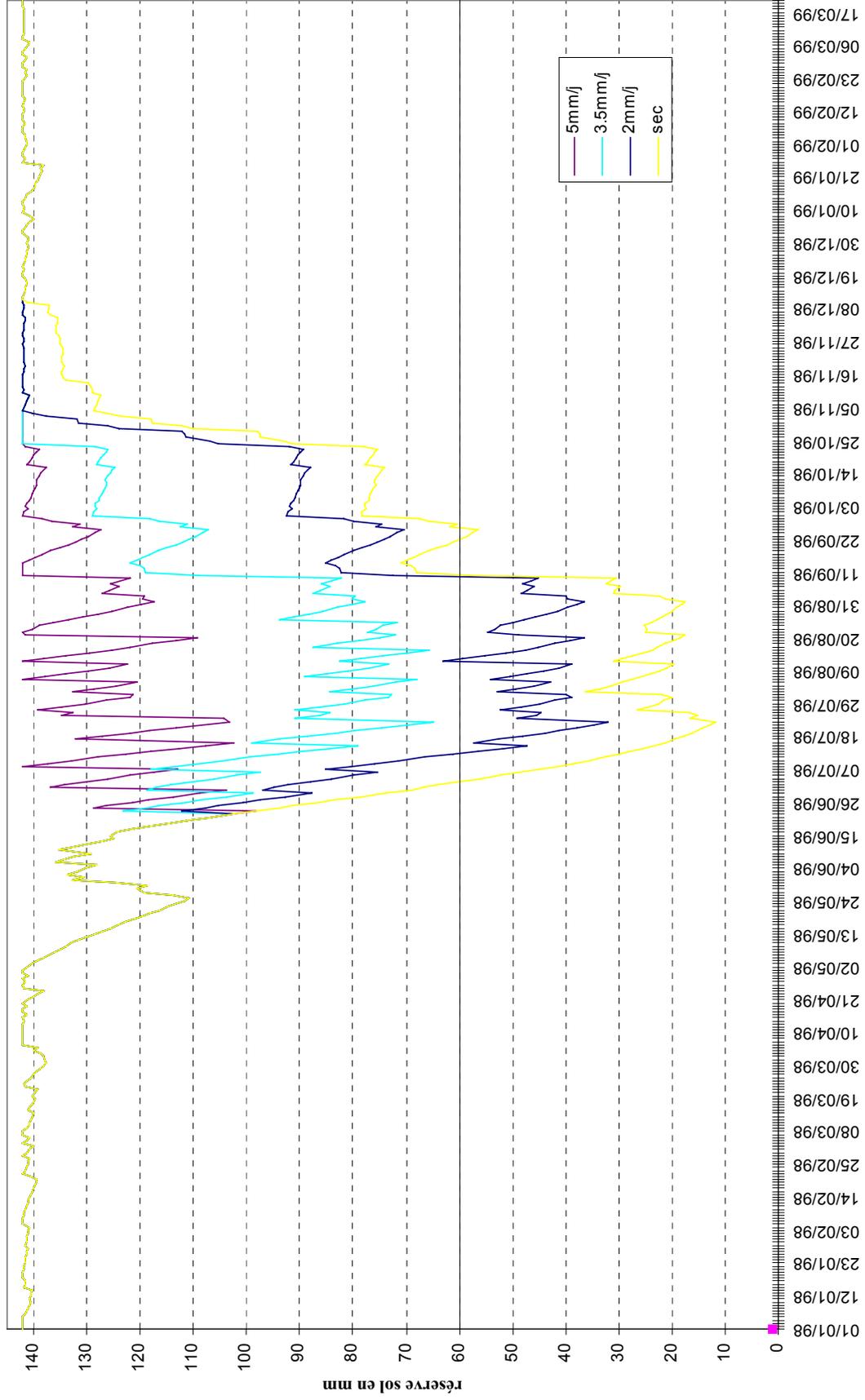
**EVOLUTION RESERVE SOL ROUFFACH**  
1996 -- RU=142mm



**EVOLUTION RESERVE SOL ROUFFACH**  
**1997 -- RU=142mm**



**EVOLUTION RESERVE SOL ROUFFACH**  
**1998 -- RU=142mm**



Les conclusions tirées du tableau du **1.1** caractérisant les régimes hydriques de l'année **1996** laissent prévaloir que les 2 régimes 3.5 et 5 mm/j étaient peu distincts dans la réalité. On en a la confirmation : les courbes des 2 régimes restent au-dessus des 60 mm correspondant à la RFU et les 2 courbes sont proches. La plante irriguée par ces deux régimes hydriques ne souffre pas de stress hydrique.

Par contre, le régime 2 mm/j apparaît pénalisant pour la culture pendant 2 périodes ; l'une d'une vingtaine de jours début août, et l'autre pendant 1 mois et demi à partir de début septembre. Ce passage dans la réserve de survie apparaît 15 jours après la floraison femelle et aura donc un effet limité sur le rendement. Le régime non-irrigué connaît les mêmes tendances avec quelques nettes accentuations.

**Hypothèse : L'irrigation en 96 paraît nécessaire avec un débit d'irrigation de 3.5 mm/j.**

En **1997**, les régimes 3.5 et 5 mm/j restent largement dans la RFU pendant toute la campagne. Le régime 5 mm/j paraît même excédentaire dans le sens où la réserve du sol est parfois proche de la saturation. Pour le régime 3.5 mm/j, il reste une « petite place » pour d'éventuels orages. Le régime 2 mm/j n'apparaît pénalisant qu'en Octobre, sans conséquence sur le rendement.

En ce qui concerne le régime non-irrigué, la période pénalisante commence fin juillet et se poursuit jusqu'à la récolte.

**Hypothèse : L'irrigation en 97 s'avère nécessaire avec un débit d'irrigation de 2 mm/j.**

L'année **1998** étant la plus sèche des 3, on observe une nette distinction entre les courbes d'évolution de la RU des 3 régimes hydriques, bien corrélée aux conclusions tirées du tableau **1.1.** La réserve du sol pour le régime 5 mm/j reste largement au-dessus de la RFU. La courbe du régime 3.5 mm/j demeure elle aussi dans la RFU, la plante est donc alimentée correctement en eau pendant tout son développement. Les 2 régimes 2 mm/j et surtout le régime non-irrigué apparaissent nettement pénalisants pendant une longue période : à la floraison femelle (17 juillet), la réserve du sol pour le régime 2 mm/j n'est que de 40 mm et de 20 pour le régime non-irrigué.

**Hypothèse : L'irrigation incontournable cette année apparaît optimale avec un débit d'irrigation de 3.5 mm/j.**

# ANALYSE DES COURBES TENSIONNOMETRIQUES

	PHASE 1		PHASE 2		PHASE 3	
Semis	10 Feuilles		10-12 Feuilles + 20 jours	Floraison F + 20 jours		45% Humidité
Somme de Températures base 6°C écartée 30	0	400	700	1200		1500
Dates 1996	20-avr	15-jun	05-jul	10-août		01-sep
Dates 1997	17-avr	10-jun	01-jul	10-août		01-sep
Dates 1998	05-mai	17-jun	05-jul	05-août		25-août

## TENSIONS A NE PAS DEPASSER

	PHASE 1	PHASE 2	PHASE 3
25 cm	800 mbar	>800 mbar	>800 mbar
50 cm	500 mbar	600-700 mbar	800 mbar

## 2.2 Suivis tensiométriques

### 2.2.1 Par année

Le tableau d'analyse des courbes tensiométriques ci-avant distingue trois phases du développement du maïs et associe à ces phases des valeurs seuils de tensions pour chaque profondeur au-delà desquelles la plante est mal alimentée en eau. Les limites de ces trois phases sont déterminées par des sommes de températures en base 6°C, écrêtées à 30. Ces valeurs « plafond » ont été déterminées à dire d'expert aux vues d'expériences similaires menées par l'ITCF.

Le diagnostic de stress hydrique est employé quand les valeurs tensiométriques relevées aux trois profondeurs dépassent toutes les trois les valeurs plafond précédentes.

Les graphiques des relevés tensiométriques sont présentés aux pages suivantes.

#### **1996 :**

• Régime 5 mm/j : Les valeurs tensiométriques relevées à 80 cm de profondeur restent stables pendant tout l'été, n'excédant pas les 200 mbar. Quant aux valeurs des profondeurs à 50 et 80 cm, elles sont plus élevées en juillet mais ne dépassent pas les 500 mbar. Ces valeurs reflètent donc un déficit hydrique très peu prononcé. On peut donc dire, d'après les valeurs plafond, que la plante n'a nullement souffert du stress hydrique pendant tout le cycle cultural.

• Régime 3.5 mm/j : Bien que les valeurs à 80 cm subissent des variations plus prononcées que pour le régime 5 mm/j, conséquence d'une contribution plus importante du sous-sol, les valeurs à 50 et 25 cm restent dans les mêmes limites que pour le régime 5 mm/j. Ceci nous conforte dans la pensée qu'en 1996, les 2 régimes 3.5 et 5 mm/j sont similaires. Aucun stress à signaler.

• Régime 2 mm/j : Seules les valeurs correspondantes à 80 cm sont disponibles. Celles-ci font apparaître des valeurs nettement plus élevées que pour les 2 autres régimes, surtout pendant la période du mois d'août, mettant en évidence un déficit hydrique. En effet, la valeur plafond de la phase 2 est de 200 mbar. Or, pendant les 10 derniers jours de juillet (correspondant à la phase critique des 15 jours après floraison), les valeurs atteignent 400 mbar.

#### **1997 :**

• Régime 5 mm/j : 97 est très comparable à 96 avec cependant des valeurs à 25 cm de profondeur dépassant très ponctuellement les 500 mbar. Ceci peut s'expliquer par des précipitations plus faibles en juillet 97. Pas de diagnostic de stress pour les 3 phases.

•Régime 3.5 mm/j : Mêmes remarques que pour le régime 5 mm/j. D'après ces graphes et ceux représentant l'évolution de la RU, on peut dire que les deux régimes 3.5 et 5 mm/j sont en 97, là aussi très comparables. Ces deux régimes n'ont pas entraîné de stress hydrique.

•Régime 2 mm/j : En 97, la période fin-juillet connaît des valeurs dépassant les 300 mbar au lieu des 200 préconisés. Le régime 2 mm/j semble cependant avoir moins fait souffrir les plantes du déficit hydrique qu'en 96 : on reste pendant toute la période en-dessous des 400 mbar.

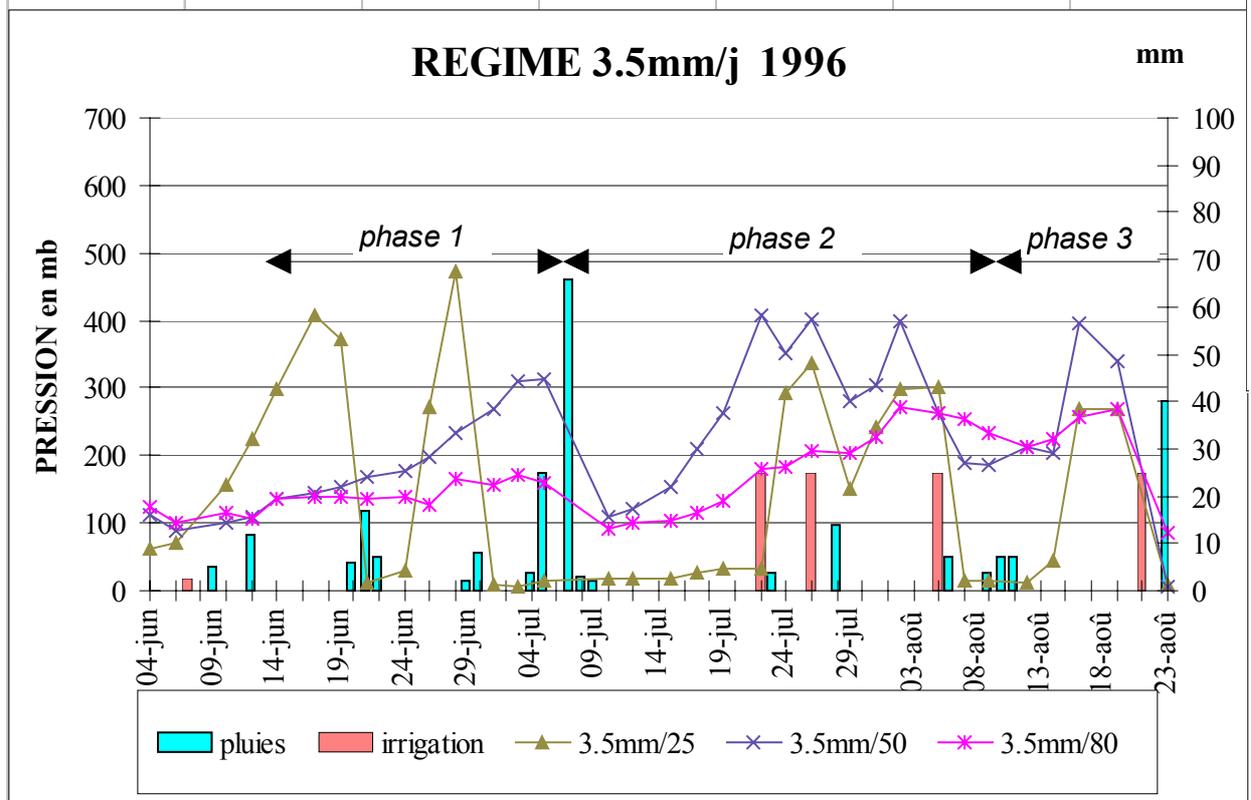
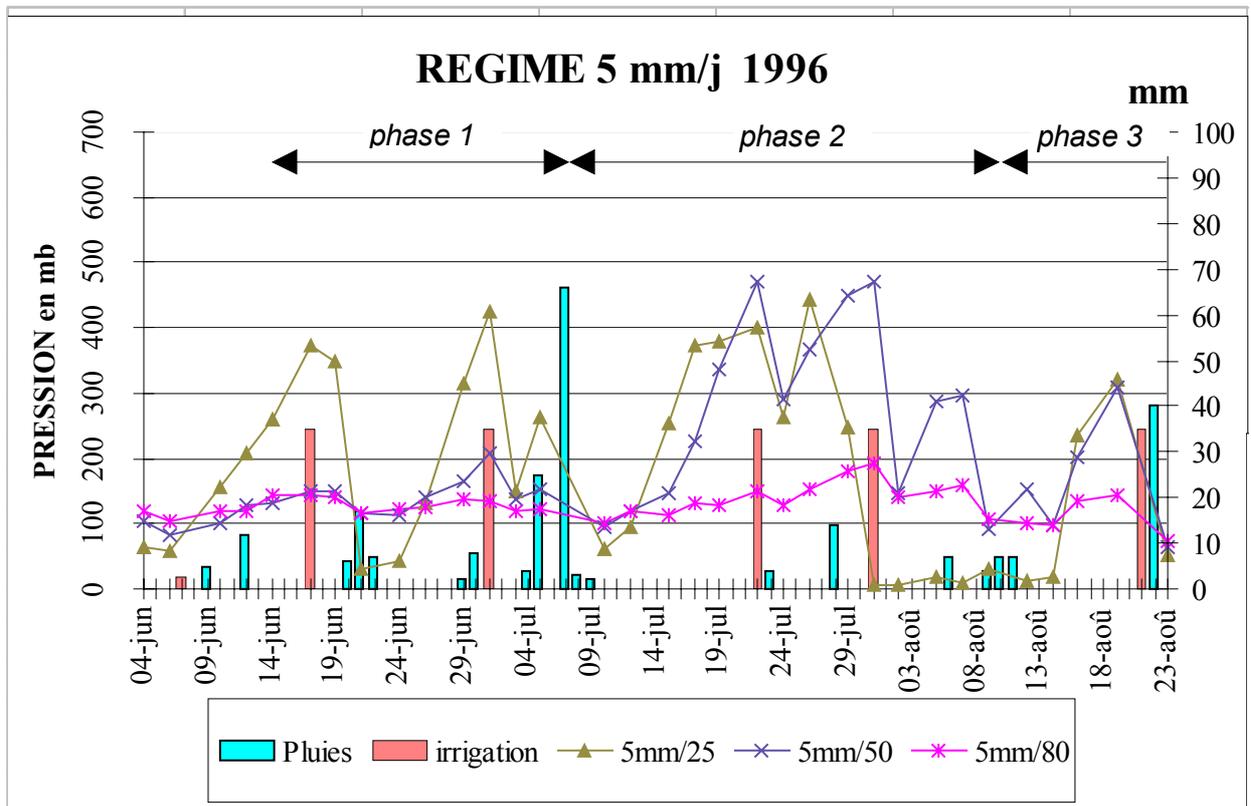
### **1998 :**

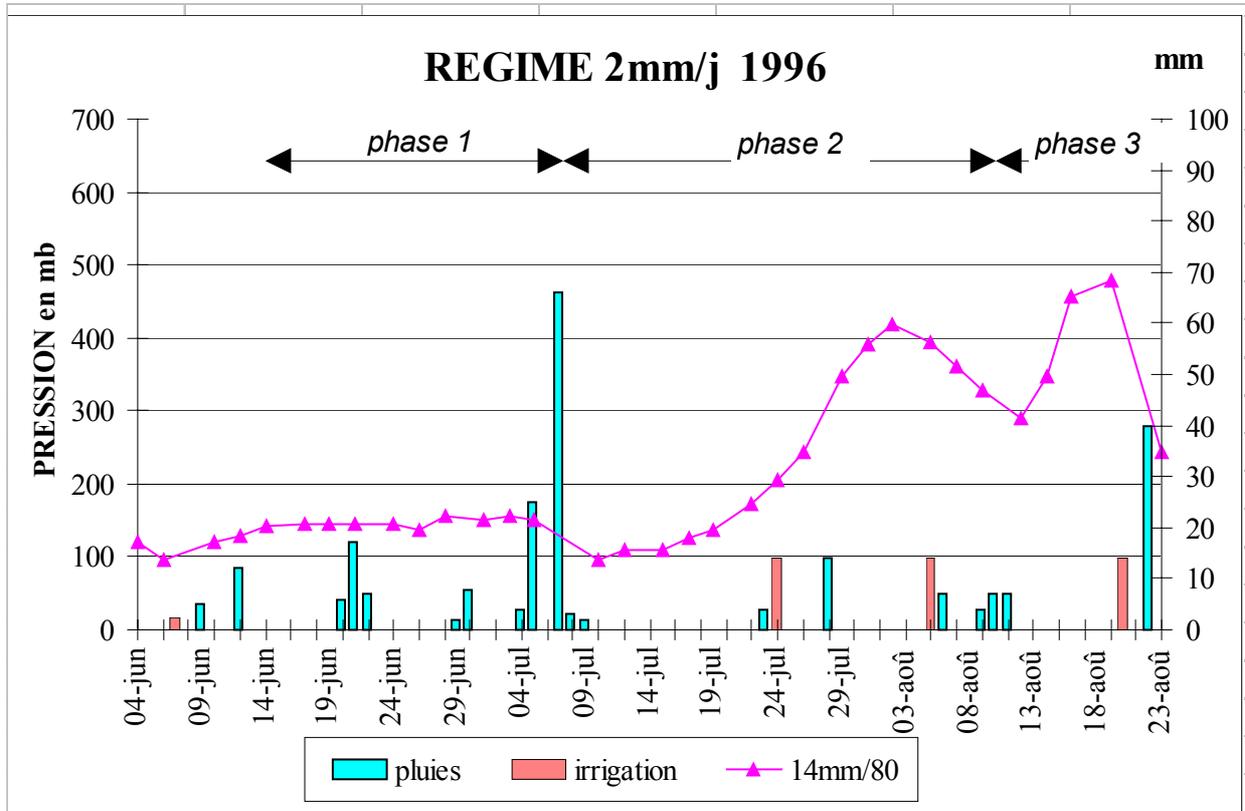
•Le suivi hydrique de cette année-là a été limité par le décrochement de plusieurs tensionics (les précipitations cumulées de juin+juillet+août s'élèvent à 102 mm, contre 200 en 97 et 275 en 96). On observe des décrochements pendant le mois de juillet jusqu'à la mi-août, surtout à 30 cm de profondeur. Le sol est sec, très fissuré, il n'y a plus de contact étroit entre la céramique et le sol.

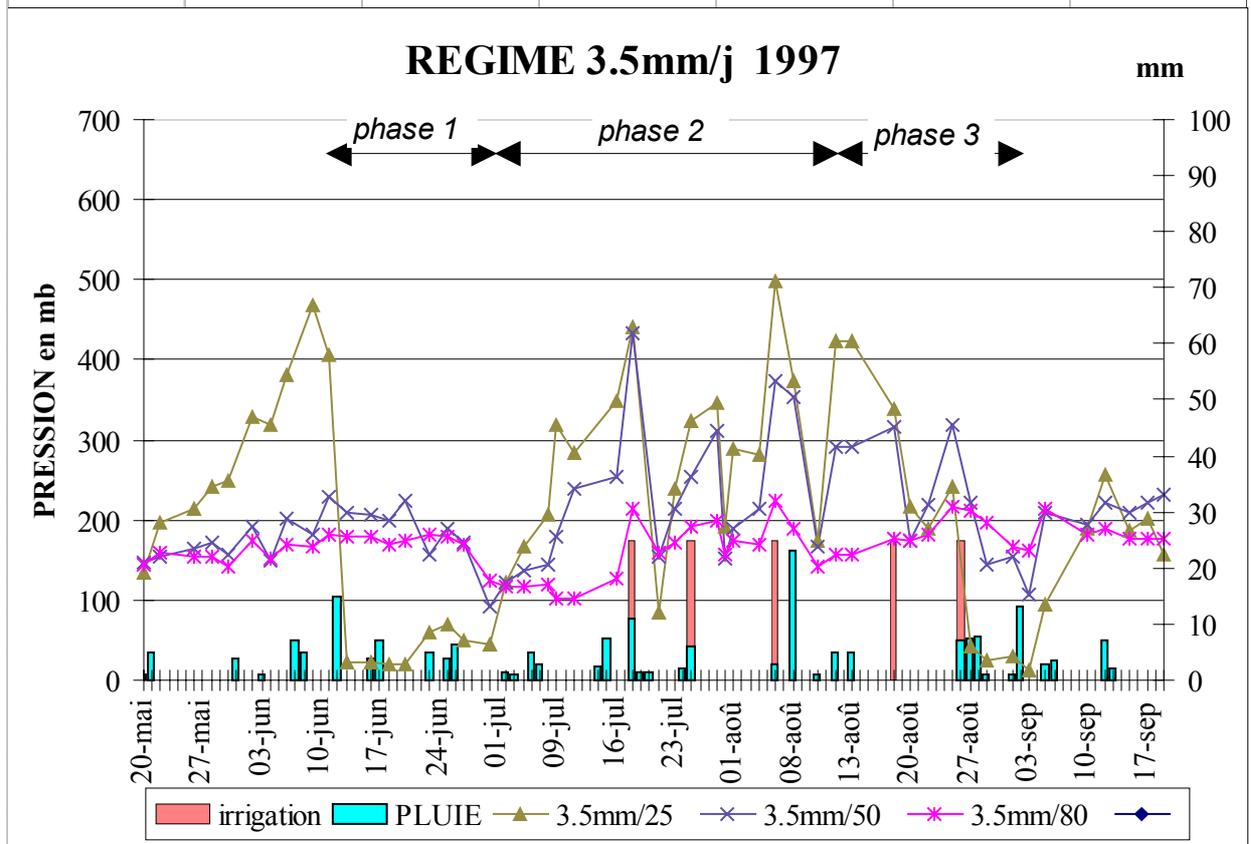
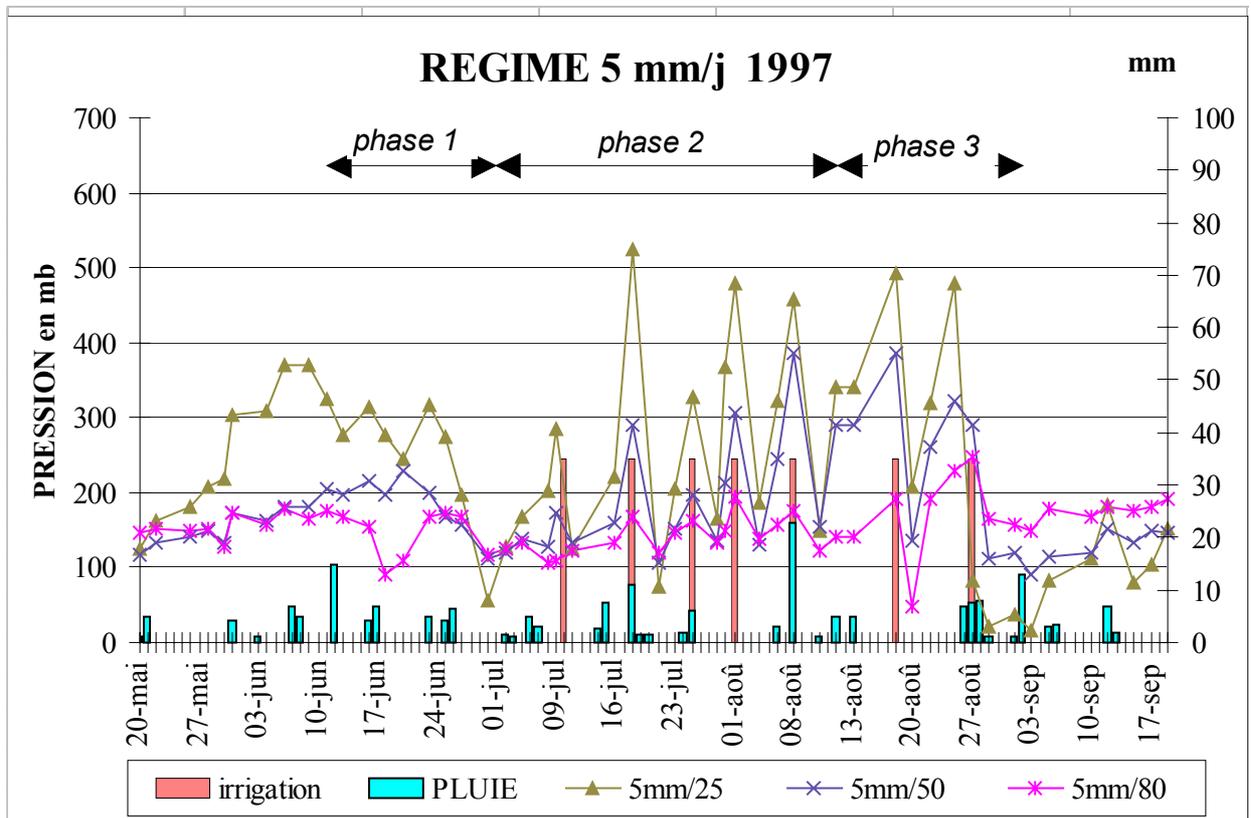
• Régime 5 mm/j : On peut imaginer pendant les périodes de décrochement des valeurs excédant 600 mbar pour le tensionic placé à 25 cm de profondeur. Les 2 autres tensionics ont des valeurs croissantes pendant cette période, mais seul celui placé à 80 cm atteint le plafond critique à ne pas dépasser pendant la phase 2. En globalité, la plante ne souffre pas pendant tout le cycle.

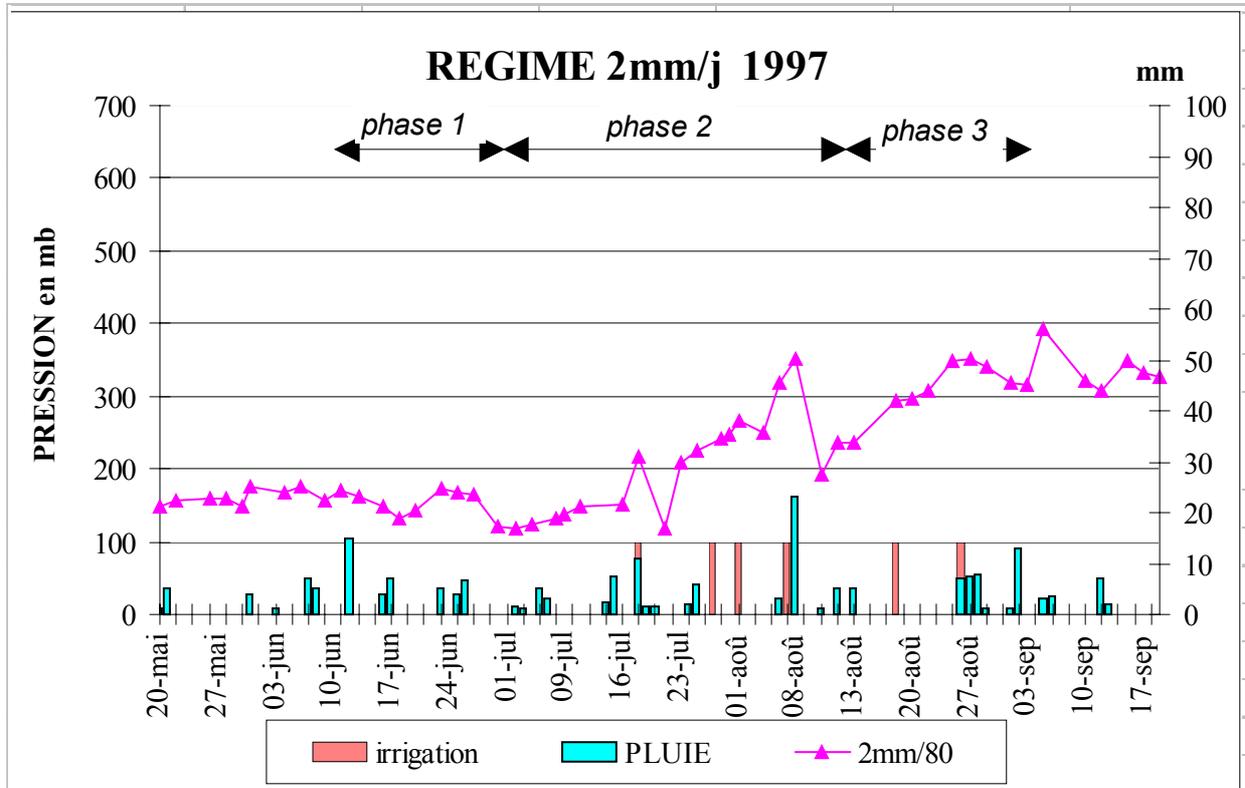
•Régime 3.5 mm/j : Les tensions sont supérieures d'environ 100 mbar à celles du régime 5 mm/j. Les appareils décrochent plus fréquemment. Les tensions aux différentes profondeurs sont très proches des valeurs seuils mais elles ne les dépassent pas toutes les trois pendant la même période. Le développement des plantes et le rendement de ce régime ne devraient donc pas être affectés par l'alimentation hydrique.

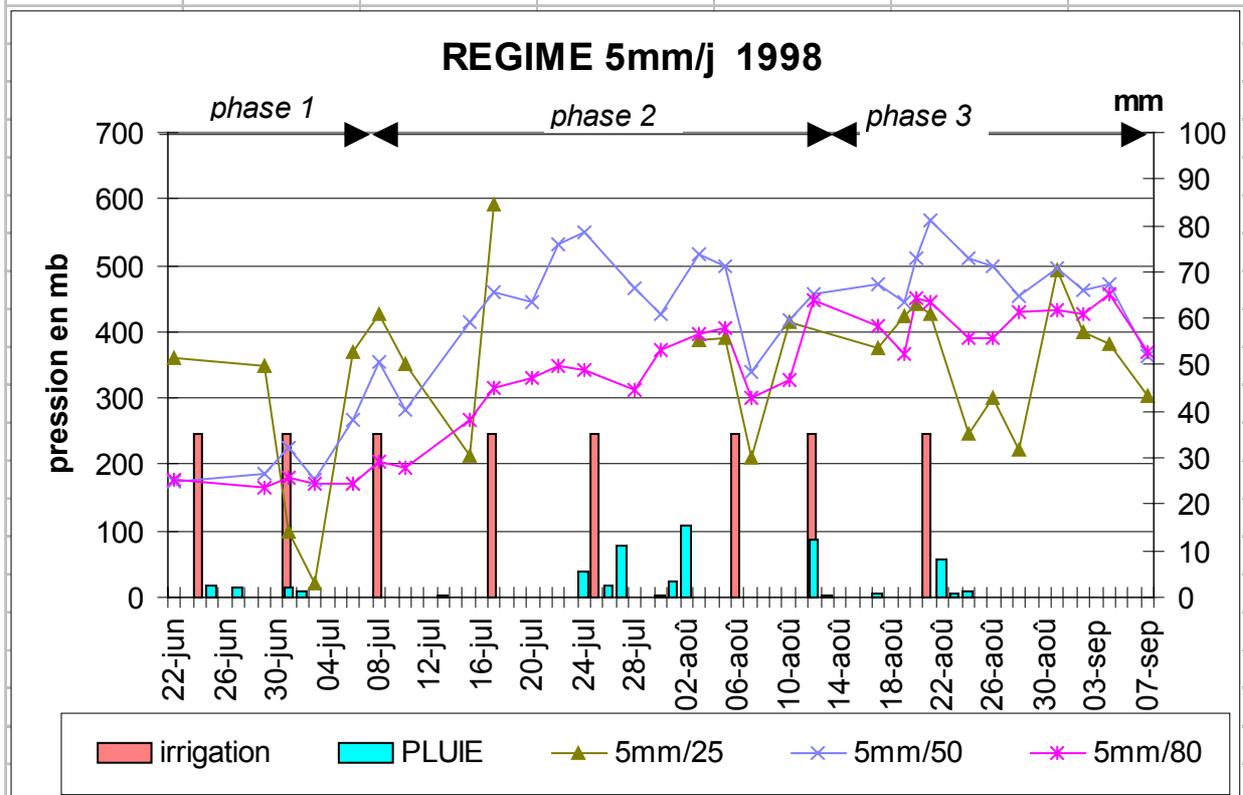
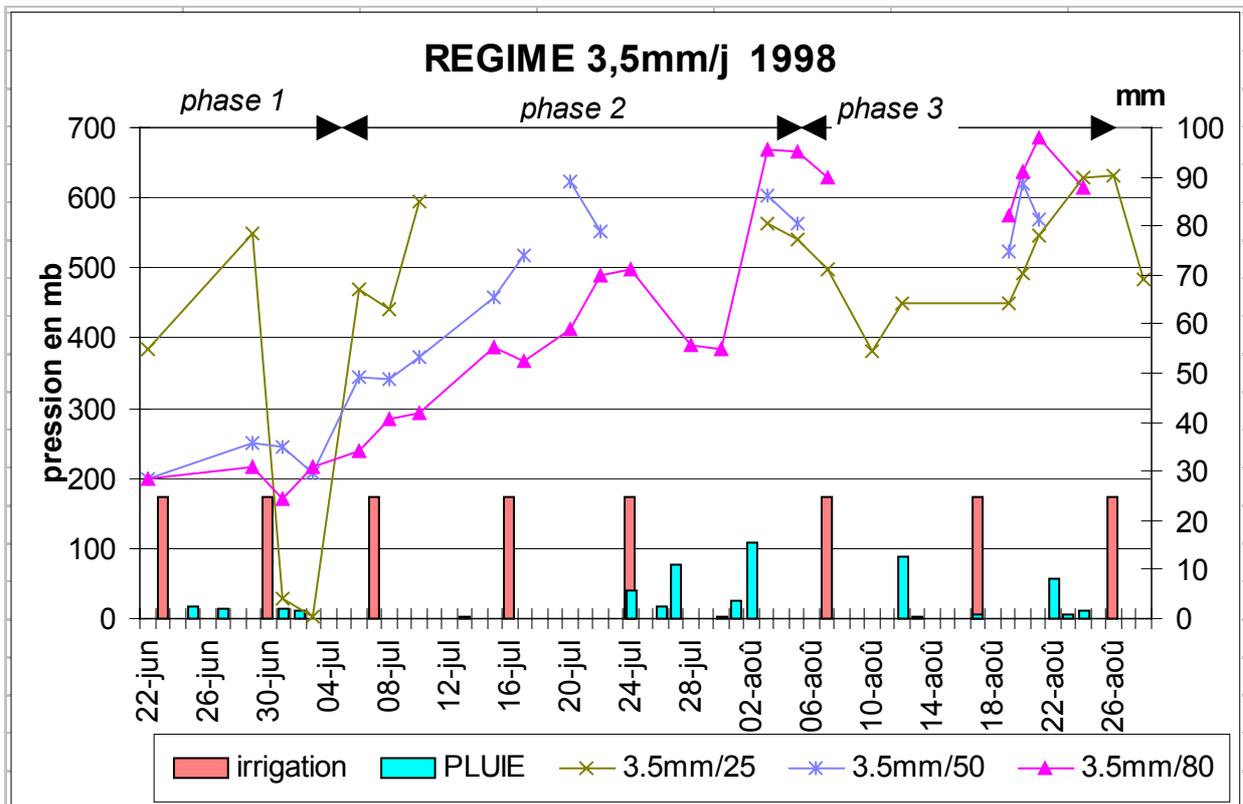
•Régime 2 mm/j : Dès la phase 1, le régime est pénalisant pour les maïs. C'est encore le cas lors de la phase 2, ce qui témoigne d'un assèchement important du sol. Les rendements devraient être fortement pénalisés.

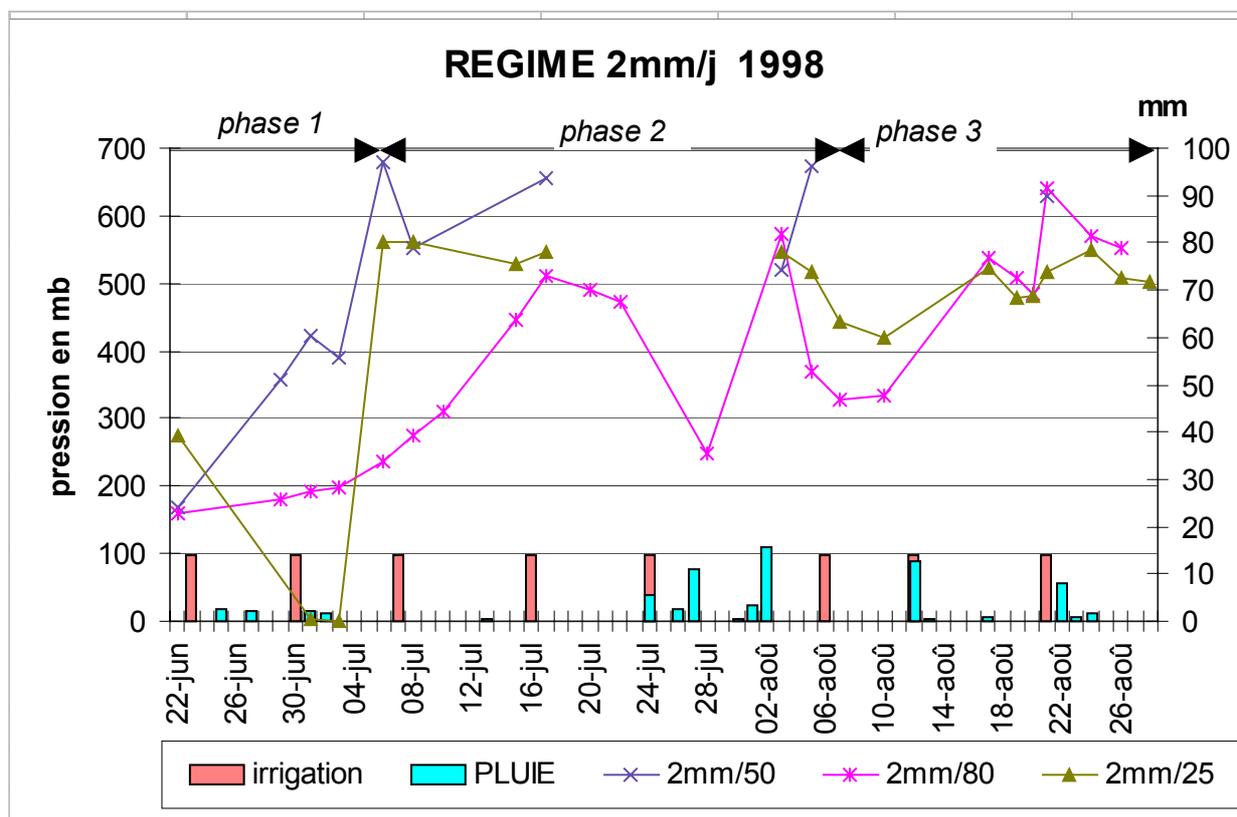












## 2.2.2 Déficit hydrique et somme des tensions

Les graphiques qui suivent représentent sur la même échelle de temps d'une part la somme des relevés tensiométriques aux trois profondeurs, et d'autre part le déficit hydrique calculé par rapport à la RU. Ceci permet d'apprécier la concordance entre les mesures tensiométriques relevées sur le terrain et les tendances de l'évolution du déficit hydrique calculé.

En **1996** et **1997**, on observe globalement une assez bonne corrélation entre le déficit hydrique calculé et les relevés tensiométriques. Les courbes suivent les mêmes tendances, même si l'on peut voir des légers décalages dans le temps par moment. Ce phénomène peut s'expliquer par la progression du front d'alimentation, en effet, on peut imaginer que 25 mm d'eau n'arrivent pas toujours à bien alimenter 25 cm de sol.

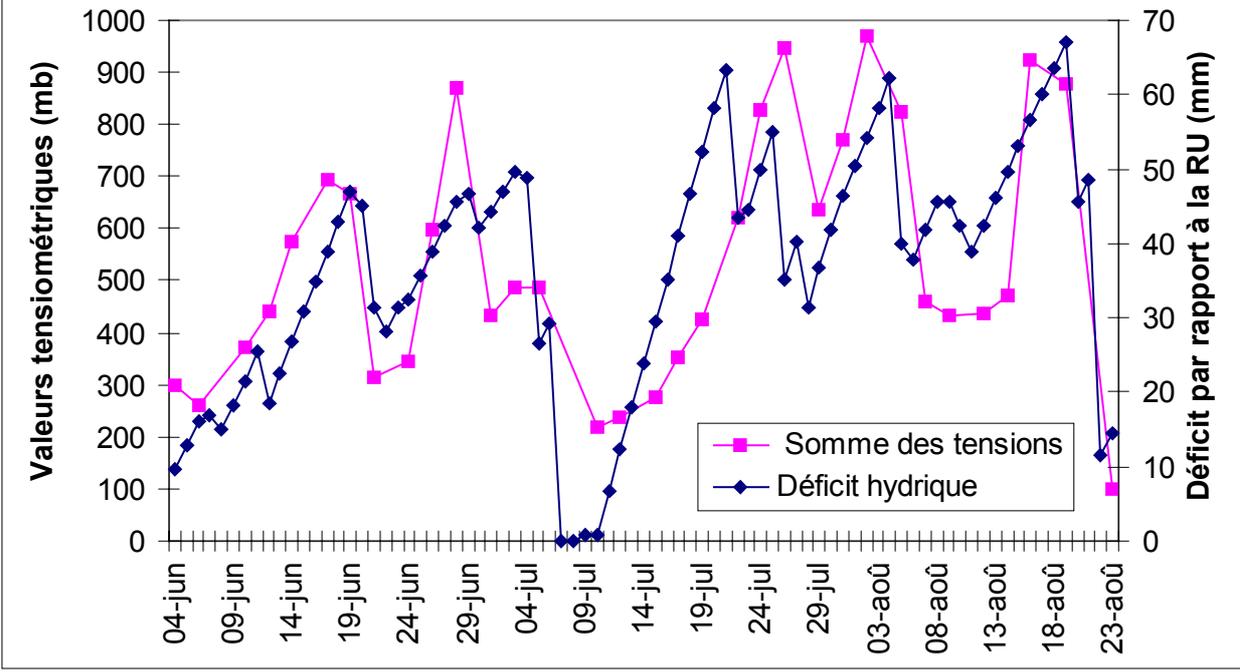
Mesures de tensions et calcul d'évolution de la RU sont donc deux indicateurs sur lesquels on s'appuiera pour interpréter les résultats agronomiques ultérieurs.

**1998** : Malgré les données manquantes dues au décrochement de plusieurs tensionics, les valeurs de terrain conservées s'avèrent être dans l'ensemble corrélées aux valeurs calculées. Cependant, on peut toutefois observer quelques écarts importants pour le régime 5 mm/j, sûrement dus à des valeurs erronées, anormalement élevées, relevées sur le terrain.

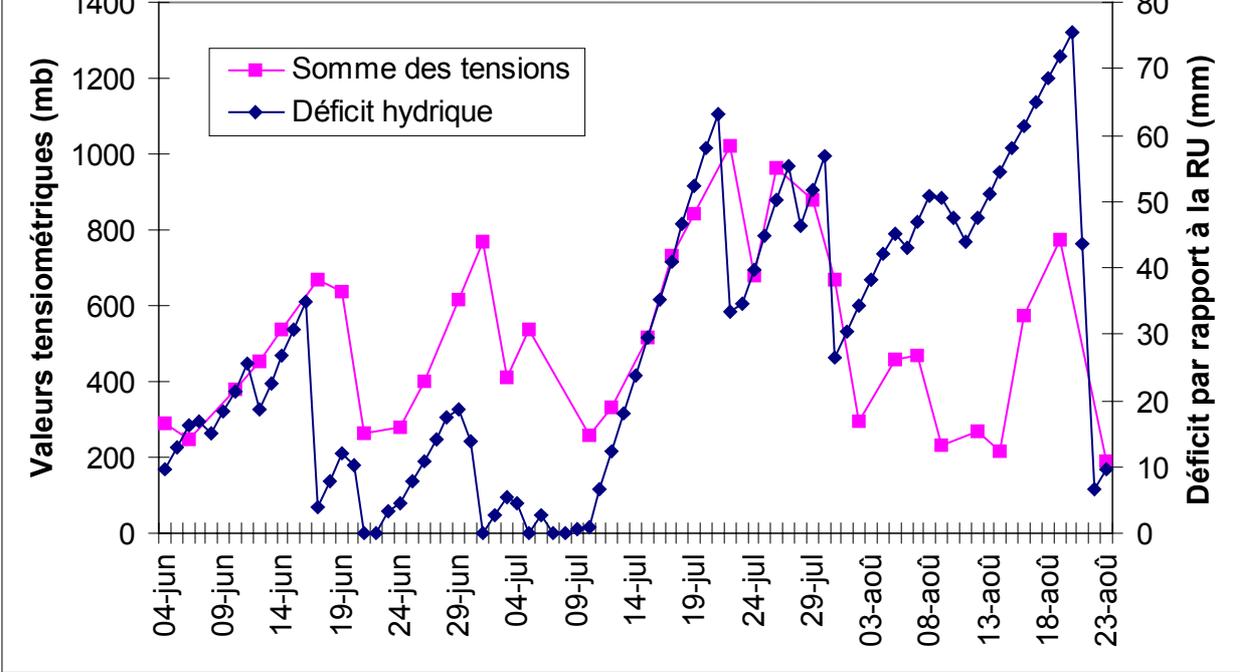
Ainsi, il conviendra par la suite de considérer plutôt les graphiques de l'évolution de la RU que les valeurs tensiométriques pour certaines périodes (début juillet et fin août) en ce qui concerne le régime 5 mm/j.

Plus généralement, les graphiques d'évolution de la RU s'avèrent être un moyen de palier au manque de données disponibles pendant les périodes de décrochement des tensionics.

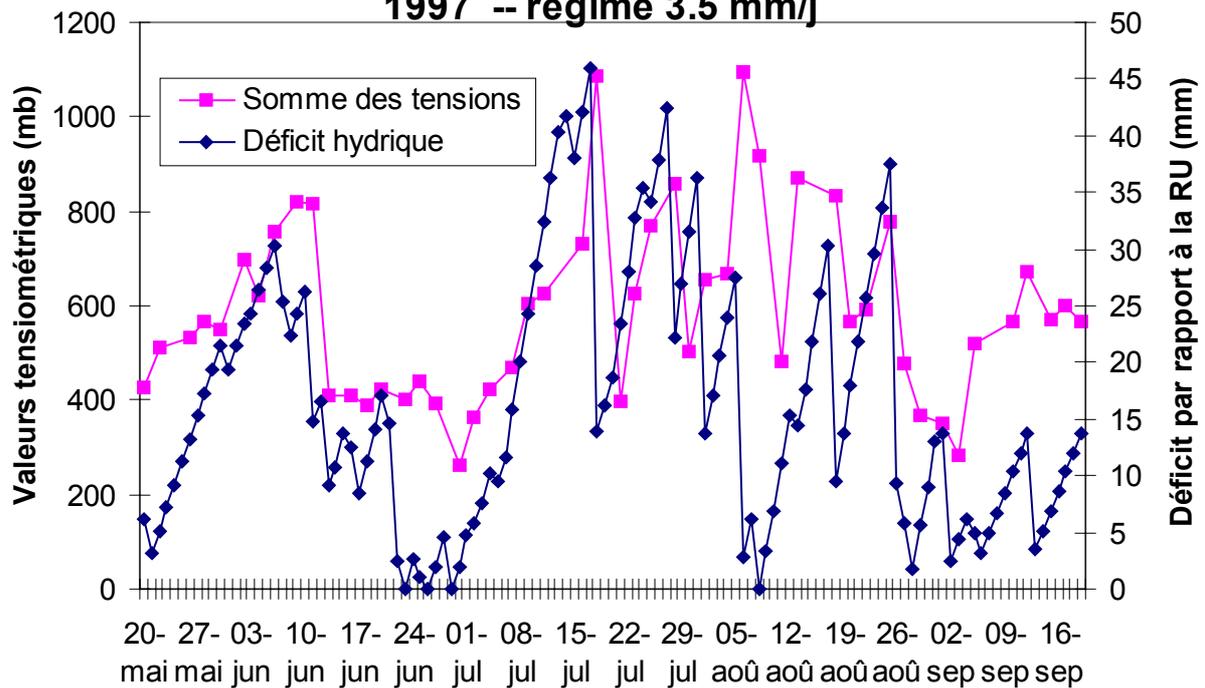
### Concordance du déficit hydrique avec la somme des relevés tensiométriques aux 3 profondeurs 1996 -- régime 3.5 mm/j



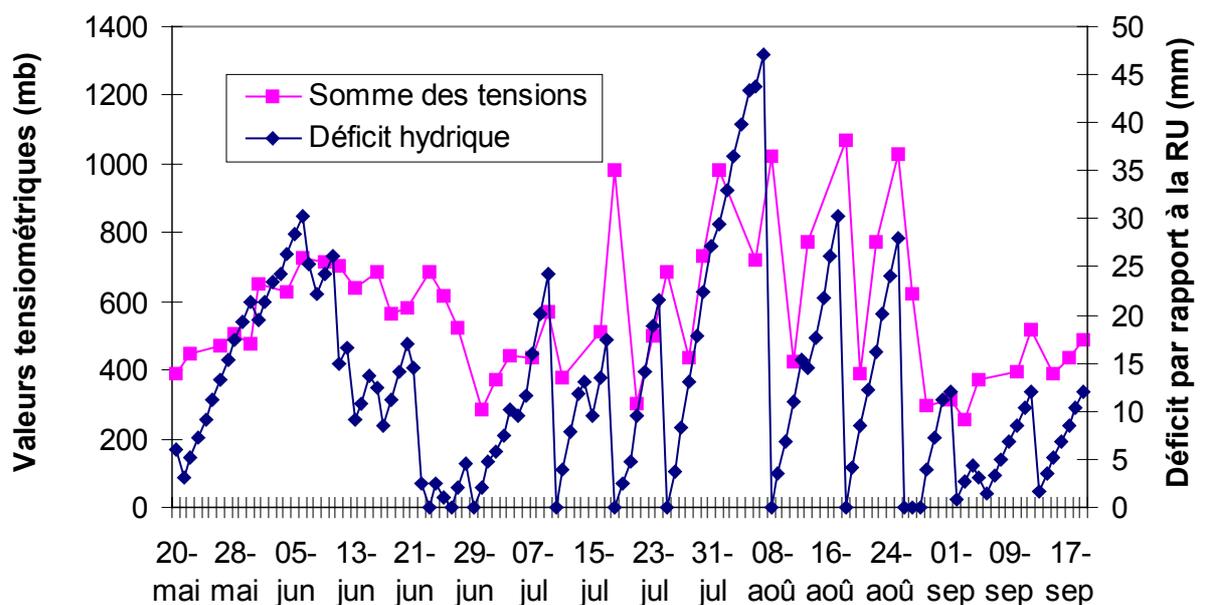
### Concordance du déficit hydrique avec la somme des relevés tensiométriques aux 3 profondeurs 1996 -- régime 5 mm/j



**Concordance du déficit hydrique avec la somme  
des relevés tensiométriques aux 3 profondeurs  
1997 -- régime 3.5 mm/j**

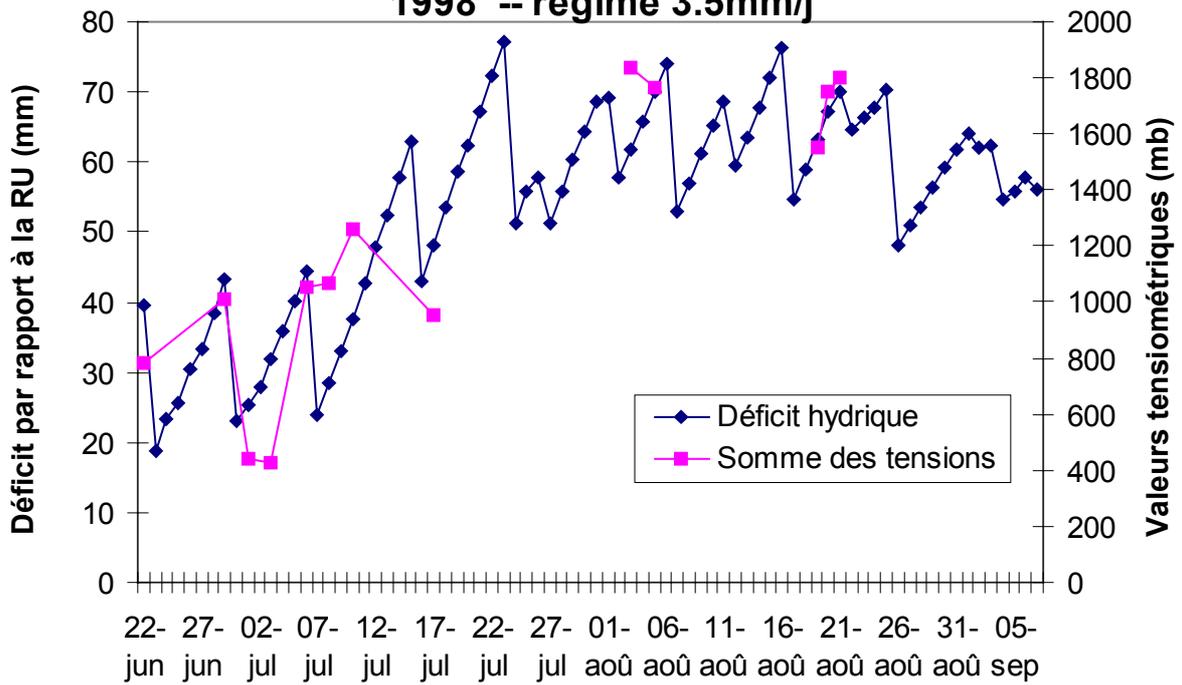


**Concordance du déficit hydrique avec la somme  
des relevés tensiométriques aux 3 profondeurs  
1997 -- régime 5 mm/j**



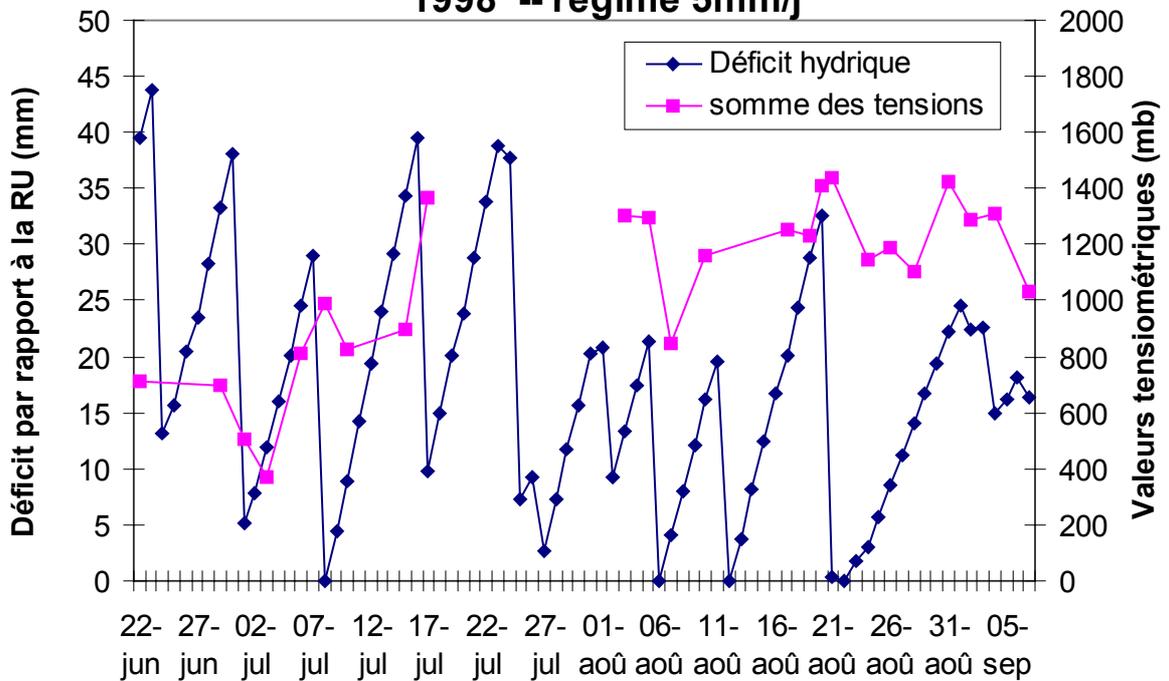
### Concordance du déficit hydrique avec la somme des relevés tensiométriques aux 3 profondeurs

1998 -- régime 3.5mm/j



### Concordance du déficit hydrique avec la somme des relevés tensiométriques aux 3 profondeurs

1998 -- régime 5mm/j



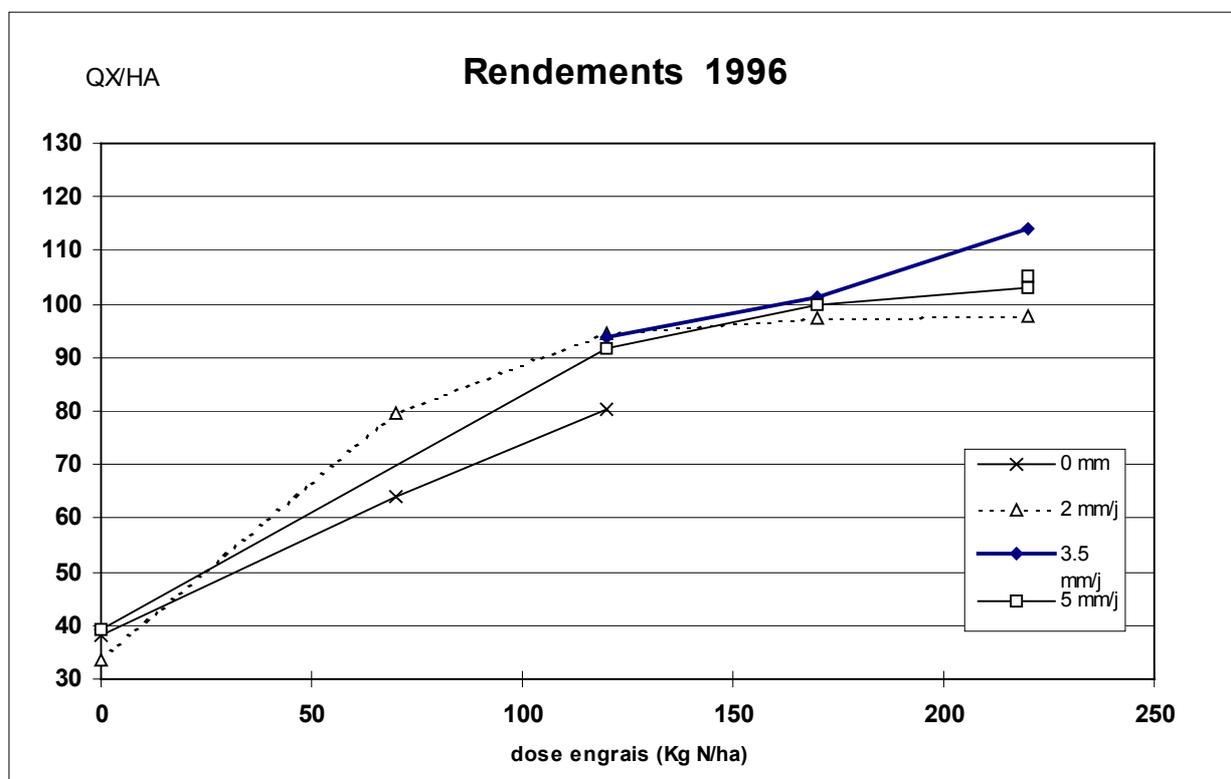
### 3 Les résultats agronomiques de l'année 1996

#### 3.1 Rendement, biomasse, azote absorbé

##### 3.1.1. Rendement

Le maximum statistique se situe à 114 qx, obtenus avec 220 unités et 3.5 mm/j. Ce résultat de 114 qx paraît néanmoins peu cohérent avec les autres mesures: biomasse, N absorbé, et surtout avec les Indices de Récolte (voir plus loin). Excepté pour cette mesure, les niveaux de rendement obtenus en 1996 de l'ordre de 100 qx sont assez faibles compte tenu de l'objectif de rendement (110 qx) initialement fixé (\*). On trouve que les 2 régimes 3.5 et 5 mm/j permettent des rendements similaires, ce qui est cohérent avec les analyses faites sur les bilans hydriques. En 1996, le facteur limitant est la dose d'azote apportée. De plus, pour les doses 120 et 170, il n'y a pas de différences significatives entre les 3 régimes. (2, 3.5, et 5 mm/j). La dose optimale d'azote à épandre est proche de 170 unités ; à 120 unités, les valeurs de rendement sont dans le même groupe homogène mais on observe cependant une tendance à la baisse que confirme la comparaison de ces rendements par la méthode des contrastes ( $P = 0.02$ ).

La différence attendue pour le régime 2 mm/j n'est pas nette, et on obtient, malgré le déficit hydrique mis en évidence par l'évolution de la RU et les valeurs tensiométriques à 80 cm de profondeur, des rendements tout à fait acceptables de 97 qx. La seule différence statistique relevée est pour la dose 220 unités que ce trop faible régime ne permet pas de valoriser comme les 2 autres.



## DOSE AZOTE

		1996	0	70	120	170	220	220+
DOSE IRRIGATION	3.5 mm/j				93.9 B	101.4 B	114.1 A	
	5 mm/j	39.1 E			91.8 B	99.9 B	103.2 AB	105.1 AB
	2 mm/j	33.5 E	79.8 C		94.5 B	97.4 B	97.6 B	
	0 mm	38.2 E	64.2 D		80.5 C			

ET : 6.59 qx

CV : 7.9%

Les indices de récolte

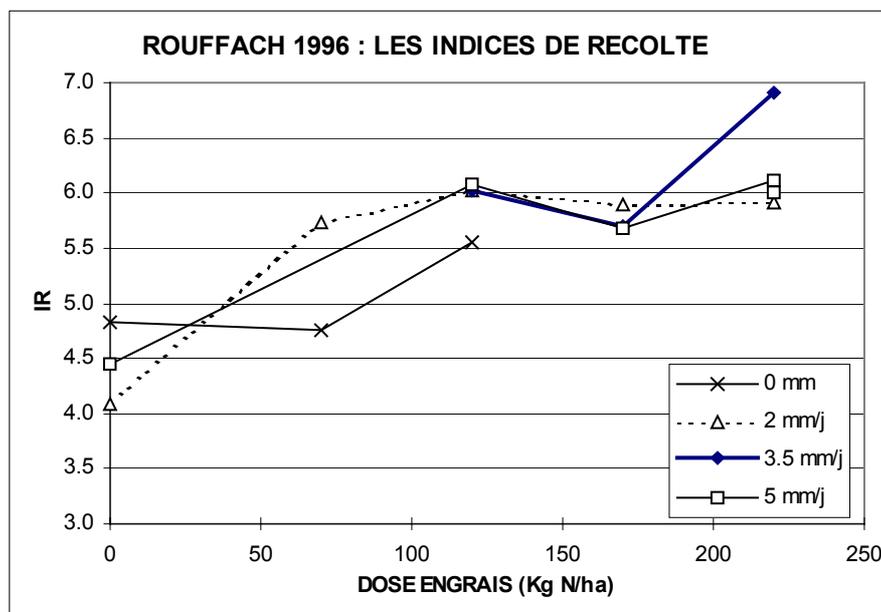
Les indices de récolte pour les trois années ont été calculés de la manière suivante :

$$IR = (\text{Matière sèche grain})/(\text{Matière sèche totale})$$

soit :

$$IR = (\text{Rendement en quintal})/(\text{Biomasse en tonnes}).$$

Le calcul de ces indices apporte peu d'informations complémentaires à l'analyse agronomique, mais permet cependant de mettre en évidence des valeurs suspectes qu'il faut considérer avec précaution.

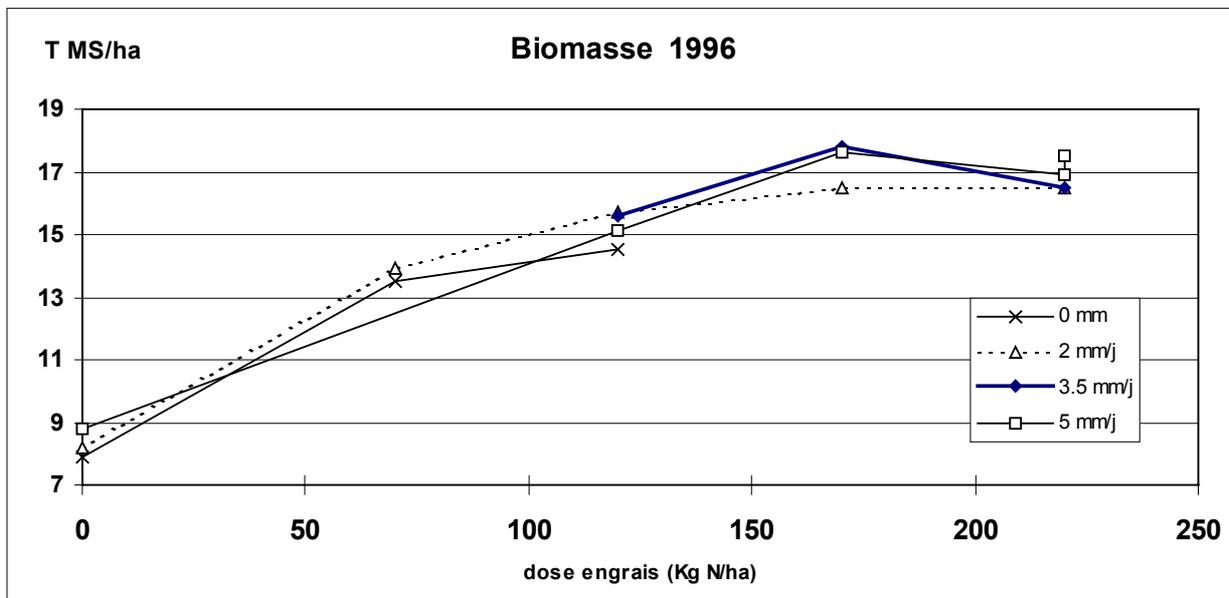


Il apparaît clairement que la valeur d'IR correspondante à la combinaison 220 Unités x 3.5 mm/j est suspecte en 1996.

**3.1.2. Biomasse**

Les résultats de biomasse semblent être bien corrélés avec ceux des rendements. On peut remarquer toutefois que l'optimum de biomasse correspond à 170 unités pour 3.5 mm/j, combinaison pour laquelle on obtient une valeur de rendement classée dans le groupe homogène B. Mais l'analyse statistique des rendements semble être biaisée par la valeur anormalement élevée de 114 qx citée précédemment.

L'augmentation de la dose d'engrais apporté de 170 à 220 unités n'est pas accompagnée d'une augmentation de la matière sèche produite, ce qui confirme l'ajustement de la dose X calculée de 170 unités.



**DOSE AZOTE**

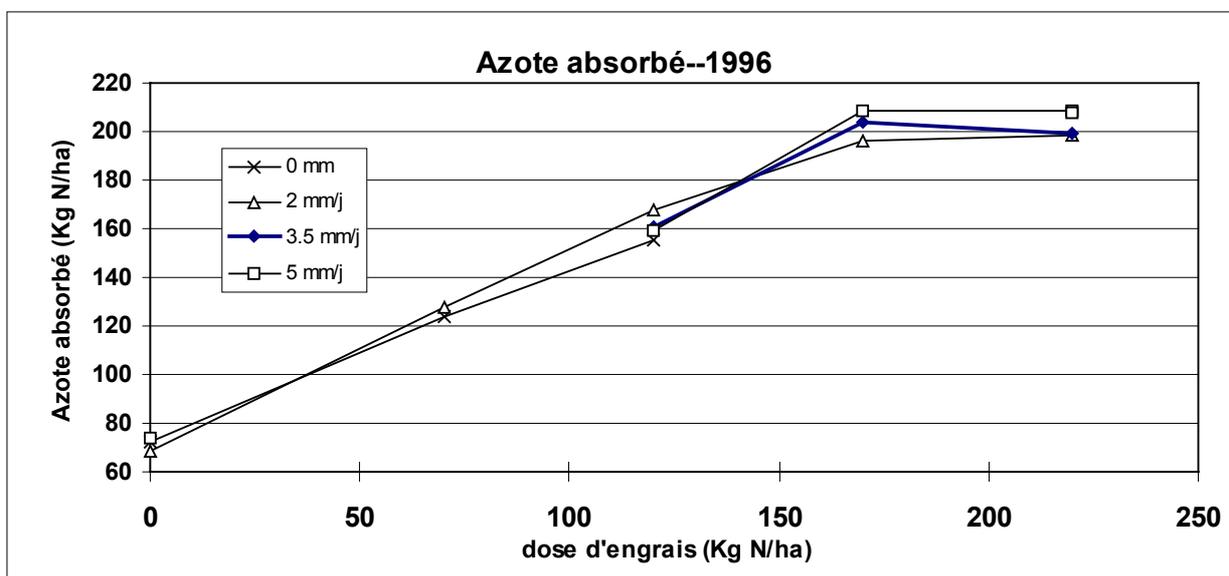
	0	70	120	170	220	220+
<b>DOSE IRRIGATION</b>						
3.5 mm/j			15.6 ABCD	17.8 A	16.5 ABCD	
5 mm/j	8.8 E		15.1 ABCD	17.6 AB	16.9 ABC	17.5 AB
2 mm/j	8.2 E	13.9 CD	15.7 ABCD	16.5 ABCD	16.5 ABCD	
0 mm	7.9 E	13.5 D	14.5 BCD			

ET : 1.33 t  
CV : 9.1%

### 3.1.3. Azote absorbé

L'analyse statistique est très nette : aucune différence significative entre les régimes hydriques pour une même dose d'azote, même avec le régime non-irrigué. Les quantités d'azote absorbées ne dépendent que de la dose d'engrais apportée. De plus, au delà de la dose 170 (dose X), la plante n'absorbe pas plus d'azote.

**La dose optimale d'engrais en 1996 est bien de 170 unités quel que soit le régime hydrique 2 ; 3.5 ou 5 mm/j.**



## DOSE AZOTE

	0	70	120	170	220	220+
DOSE IRRIGATION	3.5 mm/j		160.6 B	203.8 A	199.4 A	
	5 mm/j	73.7 D		159 B	208.1 A	207.9 A
	2 mm/j	68.2 D	127.6 C	168 B	196.1 A	198.2 A
	0 mm	72.1 D	123.9 C	155.6 B		

ET : 14.7  
CV : 9.3%

### 3.2 Les reliquats

#### 3.2.1 Les reliquats théoriques à la récolte

Les reliquats théoriques ont été calculés de la manière suivante :

**$N_{\text{final}} = N_{\text{initial}} (\text{reliquat avril}) + N_{\text{engrais}} + N_{\text{minéralisé}} - N_{\text{absorbé}} - N_{\text{volatilisé}} - N_{\text{lessivé}} - N_{\text{organisé}}$**

L'azote volatilisé, lessivé et organisé est supposé égal à 0.

De plus, on suppose que tout l'engrais apporté est transformé sous forme minérale.

Enfin, on estime l'azote minéralisé par la formule :

**$N_{\text{min}} = \text{Fournitures du Sol (moyenne des 3 valeurs du témoin 0 N)} + (N_{\text{initial}} \text{ du traitement} - N_{\text{initial}} \text{ du témoin}) - N_{\text{initial}} \text{ du traitement.}$**

Prendre la moyenne des 3 valeurs du témoin 0 N afin d'estimer les fournitures du sol est légitime car ces trois valeurs sont dans le même groupe homogène et la méthode des contrastes ne met pas en évidence de différences significatives :

régime hydrique	N absorbé par la plante	Coefficients du contraste	
5 mm/j	73.7	1	1
2 mm/j	68.2	0	-1
0 mm/j	72.1	-1	0

Proba : 0.22 et 0.69 : non significatif

ET : 5.76

CV : 8.1%

D'où :

**$N_{\text{final}} = N_{\text{engrais}} + \text{FS (témoin 0 N)} - N_{\text{abs}} + \text{Différence de reliquat (avant culture entre la dose testée et la dose 0N).}$**

Cette différence de reliquat avant culture entre la dose testée et la dose 0 N peut être appréciée grâce aux valeurs de reliquats relevées. En 1996, on ne dispose que des valeurs de reliquats au 2 mai, soit 12 jours après le semis (avant le premier apport d'azote).

02/05/96	0	70	120	170	220	220+
3.5 mm/j			79.6	84.2	95.8	
5 mm/j	65.3		101.9	101.8	85.2	96.8
2 mm/j	62.6	89.5	91.3	96.7	82.4	
0 mm	72.5	102.2	89.7			

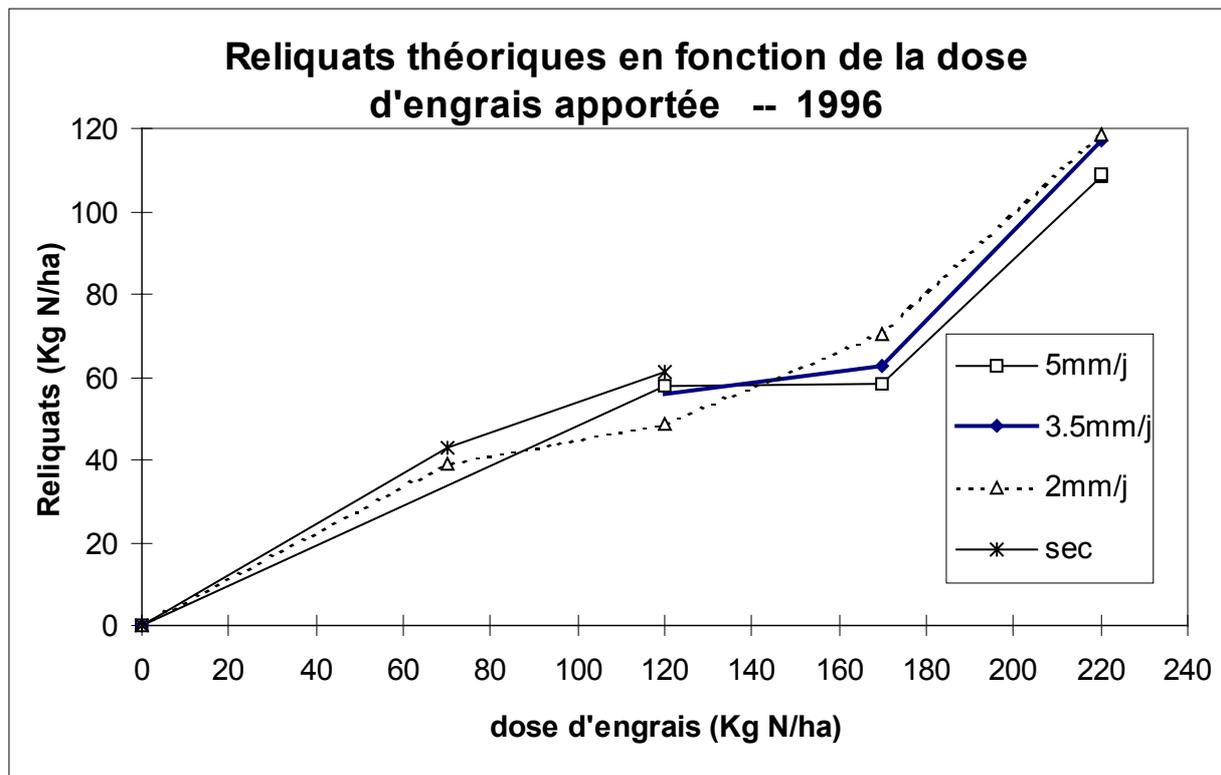
Les seules différences nettes observées se situent entre les traitements non fertilisés et ceux qui le seront. Il n'y a pas par exemple de différences significatives entre les traitements 120 unités et 220 unités. Ainsi, en prenant la différence entre la moyenne des valeurs de reliquat des traitements fertilisés et la moyenne des valeurs de reliquat des témoins non fertilisés, nous sommes en mesure d'estimer cette différence de reliquat au moment du semis. On trouve  $92.1 - 66.8 = 25.3$

D'où :

$$\mathbf{N \text{ final (théorique) = N engrais + FS (témoins 0N) - N abs + 25.3}}$$

L'analyse statistique de l'azote final a été réalisée en prenant pour chaque combinaison (régime hydrique\*dose N) les 4 valeurs d'azote absorbé servant à calculer ces reliquats, sur les 4 blocs. Les chiffres portés dans les tableaux ont été calculés en prenant comme valeur des fournitures du sol la valeur moyenne des 3 valeurs d'azote absorbé du témoin 0 N, les groupes homogènes de l'analyse statistique se basent sur des valeurs légèrement différentes puisque l'on a pris pour chaque régime la valeur du témoin 0 N correspondante, excepté pour le régime hydrique 3.5 mm/j pour lequel on a pris la moyenne des trois valeurs. Ces graphes se basent uniquement sur des relevés de valeurs d'azote absorbé.

On remarque une brusque augmentation des reliquats pour les 3 régimes irrigués à partir de la dose X (170 unités) pour laquelle on obtient des reliquats d'environ 60 Kg N/ha.



**N final = N engrais + FS - N  
absorbé +25.3**

		DOSE AZOTE					
		0	70	120	170	220	220+
DOSE IRRIGATION	3.5 mm/j			56.0	62.8	117.2	
	5 mm/j			57.6	58.5	108.5	108.7
	2 mm/j		39.0	48.6	70.5	118.4	
	0 mm		42.7	61.0			

<b>FS :</b>	<b>71.33</b>
-------------	--------------

### **Remarque concernant les fournitures du sol :**

Comme nous l'avons vu à la page précédente, les fournitures du sol ont été estimées par la valeur moyenne des trois valeurs d'azote absorbé par les témoins non fertilisés. Il apparaît légitime de prendre une valeur moyenne puisque ces trois valeurs sont très voisines et que l'analyse statistique ne les différencie pas : 73.7 kg N/ha pour le régime hydrique 5 mm/j et 72.1 kg N/ha pour le régime non irrigué.

**Ainsi, les fournitures du sol ne dépendent pas du régime hydrique utilisé.**

Il en est de même pour les autres années comme on peut le voir sur le tableau ci-dessous :

	0 mm/j	2 mm/j	5 mm/j	<b>Moyenne</b>
1996	72.1	68.2	73.7	<b>71.3</b>
1997	85.8	81.8	99.1	<b>88.9</b>
1998	92.2	81.7	92.2	<b>88.7</b>
<b>Moyenne</b>	<b>83.4</b>	<b>77.2</b>	<b>88.3</b>	<b>83</b>

L'analyse statistique par la méthode des contrastes montre les résultats suivants :

#### **1996 :**

régime hydrique	N absorbé par la plante	Coefficients du contraste	
5 mm/j	73.7	1	1
2 mm/j	68.2	0	-1
0 mm/j	72.1	-1	0

Proba : 0.22 et 0.69 : non significatif - ET : 5.76 - CV : 8.1 %

#### **1997 :**

régime hydrique	N absorbé par la plante	Coefficients du contraste	
5 mm/j	99.1	1	1
2 mm/j	81.8	-1	0
0 mm/j	85.8	0	-1

5 mm ≠ 2 mm : proba : 0.04 : significatif.

5 mm ≠ 0 mm : proba : 0.09 : significatif. - ET : 9.49 - CV : 10.7%

#### **1998 :**

régime hydrique	N absorbé par la plante	Coefficients du contraste	
5 mm/j	92.2	1	0
2 mm/j	81.7	-1	1

0 mm/j	92.2	0	-1
--------	------	---	----

5 mm ≠ 2 mm : proba : 0.02 : significatif.

2 mm ≠ 0 mm : proba : 0.02 : significatif.- ET :5.19 - CV : 5.8%

Cette analyse montre des contrastes égaux en 96, différents en 97 et différents mais pas cohérents en 98.

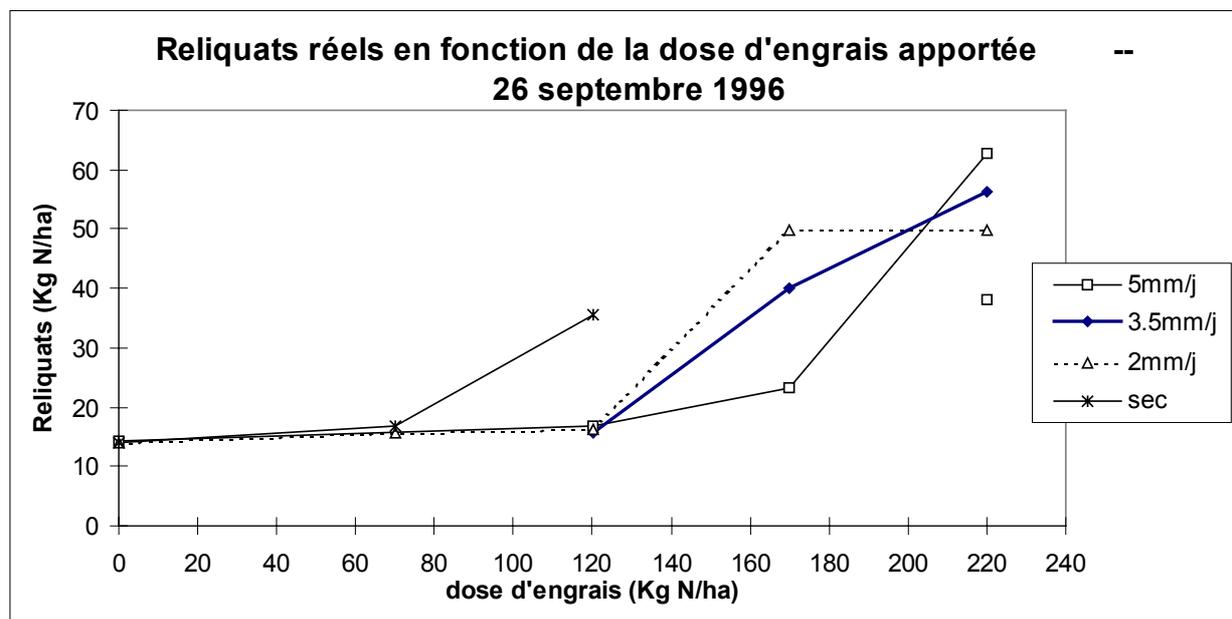
On note qu'il n'y a pas de classement des valeurs selon les régimes hydriques et donc que les fournitures du sol sont bien indépendantes de l'état hydrique du sol. Par contre, les fournitures du sol sont plus importantes en 1997 et 1998 (de 15 à 20 unités malgré le fait qu'il s'agit de double puis de triple témoin ON), deux années pendant lesquelles les températures moyennes ont été du même ordre de grandeur, et plus élevées qu'en 1996 (Cf Annexe 21). Ainsi, les fournitures du sol dépendraient de la température (favorable à la minéralisation), mais pas de l'état hydrique du sol.

### 3.2.2 Les reliquats réels à la récolte

On peut noter que la dose 220 apportée en deux fois : 100 puis 120 pour le régime 5 mm/j laisse des reliquats plus faibles que la dose 220 répartie ainsi : 50 puis 170. On peut penser que l'excès d'azote apporté dans le premier cas a été lessivé plus tôt, aussi fin septembre on ne retrouve qu'un reliquat de 35 kg N/ha.

On remarque une nette augmentation des reliquats au-dessus de la dose 120 pour les régimes 2 et 3.5 mm/j, et au-dessus de la dose 170 pour le régime 5 mm/j.

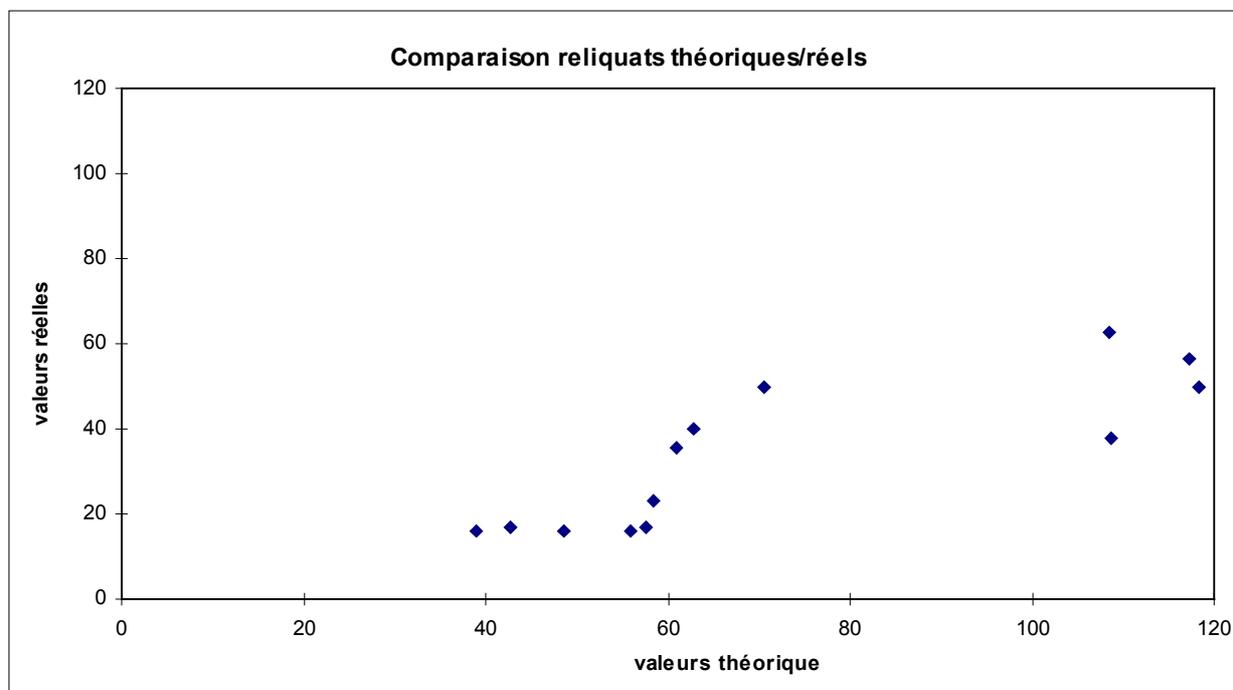
L'augmentation brusque des reliquats (de 15 à 35 kg N/ha) dans le cas du régime hydrique non irrigué a lieu dès la dose 120 unités. En effet, le maïs non irrigué valorise mal une dose d'engrais de 120 unités : sur les 50 unités d'azote apportées en plus, on en retrouve 20 dans le sol qui ne sont pas absorbées par la plante.



		DOSE AZOTE						
		26/09/96	0	70	120	170	220	220+
DOSE IRRIGATION	3.5 mm/j				15.8	40.1	56.4	
	5 mm/j	14.2			16.8	23.3	62.8	38
	2 mm/j	14	15.8		16.2	49.9	49.7	
	0 mm	14	16.9		35.5			

### 3.2.3 Comparaison reliquats théoriques et réels à la récolte

Par rapport à la première bissectrice tracée, on a globalement une surestimation des reliquats théoriques par rapport aux reliquats réels, surtout pour les fortes valeurs de reliquats théoriques qui apparaissent nettement atténuées. Ceci peut s'expliquer par les nombreuses hypothèses simplificatrices nécessaires pour le calcul de ces reliquats théoriques. Ainsi, les pertes d'azote par volatilisation, lessivage et organisation non prises en compte dans le calcul pourraient expliquer cette surestimation (de 40 à 70 kg N/ha) observées aux fortes doses d'azote.



## 4 Les résultats agronomiques de l'année 1997

### 4.1 Rendement, biomasse, azote absorbé

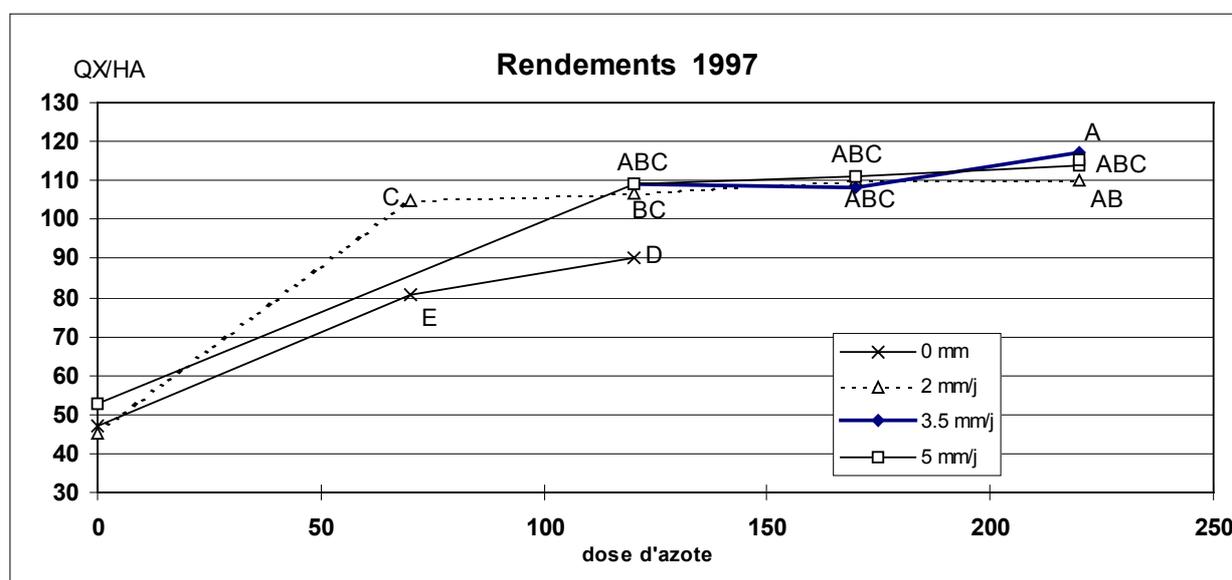
#### 4.1.1. Rendement

Deux valeurs de rendement paraissent anormalement élevées dans ce tableau aux vues des indices de récolte (Cf annexe 20) : d'une part en ce qui concerne la combinaison 70 unités x 2 mm/j, et d'autre part la combinaison 120 unités x 0 mm/j. Le rendement obtenu avec la combinaison 220 N\*3.5 mm/j arrive en tête des rendements avec 117.1 qx. Comme en 96, les autres mesures agronomiques : biomasse, N absorbé et PMG (Cf annexe 22) ne confirment pas cette supériorité.

En tenant compte de ces erreurs, l'optimum de rendement pour les régimes hydriques 2, 3.5 et 5 mm/j est atteint pour une dose d'azote de 120 unités pour laquelle ont obtenu des rendements proches de l'objectif (109 et 107 qx). En ce qui concerne le régime non irrigué, l'optimum semble être atteint pour une dose d'azote de 70 unités pour laquelle on obtient un rendement de 81 qx.

Comme pour 1996, les 3 régimes ne sont pas différenciés avec netteté : pour 170 unités (dose X), on n'a pas de différences significatives entre les 3 régimes. Le facteur limitant est, là encore, la dose d'engrais apportée car nous n'obtenons pas de courbes de réponse à l'azote différentes entre régimes hydriques, sauf entre 2 mm/j et 0 mm/j. Ces remarques vont de pair avec l'analyse de la courbe d'évolution de la RU pour laquelle l'irrigation optimale paraissait se situer à 2 mm/j.

En comparant 96 et 97, on peut noter que l'on obtient des valeurs systématiquement plus élevées en 97 qu'en 96 (de 10 à 25 qtx ), alors que 96 est une année légèrement plus pluvieuse que 97. Ceci peut être expliqué par des températures plus favorables au développement du maïs pendant l'année 1997 et en particulier pendant la phase de remplissage des grains (Cf annexe 1).

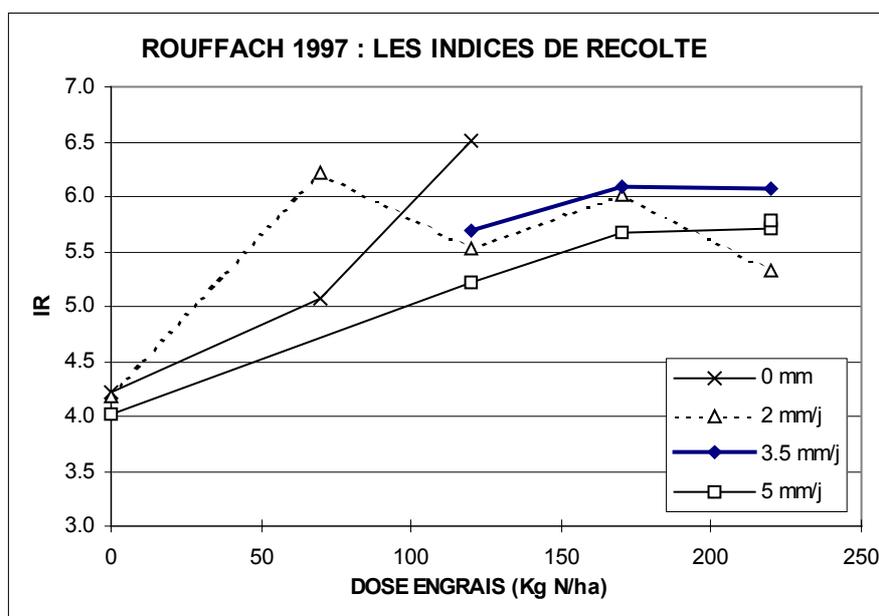


DOSE AZOTE

		0	70	120	170	220	220+
DOSE IRRIGATION	3.5 mm/j			109.3 ABC	108.3 ABC	117.1 A	
	5 mm/j	52.60 F		109.1 ABC	111.2 ABC	113.7 ABC	115.2 AB
	2 mm/j	45.1 G	105.1 C	106.8 BC	110 ABC	110.1 ABC	
	0 mm	46.9 G	80.7 E	90.4 D			

ET : 3.95

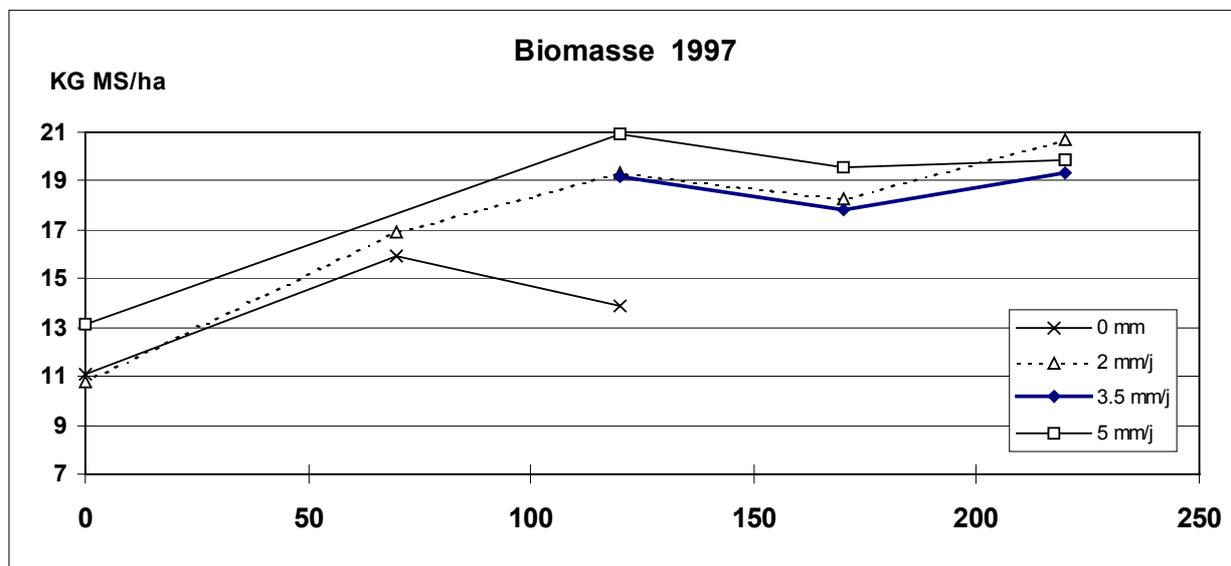
CV : 4.1%



Les valeurs correspondantes aux combinaisons 70 Unités x 2mm/j et 120 Unités x 0 mm/j en 1997 sont à considérer avec beaucoup de précautions.

#### 4.1.2. Biomasse

Les résultats de biomasse en 1997 semblent être bien corrélés avec ceux des rendements. On peut remarquer toutefois que l'optimum de biomasse correspond à 120 unités pour 2 mm/j, combinaison pour laquelle on obtient une valeur de rendement classée dans le groupe homogène B. Mais l'analyse statistique des rendements semble être peu précise (Ecart -type de 4 quintaux).



**DOSE AZOTE**

	1997	0	70	120	170	220	220+
<b>DOSE IRRIGATION</b>							
3.5 mm/j				19.2 ABC	17.8 ABC	19.3 ABC	
5 mm/j		13.1 EF		20.9 A	19.6 AB	19.9 AB	19.9 AB
2 mm/j		10.80 F	16.9 BC	19.3 ABC	18.3 ABC	20.7 A	
0 mm		11.10 F	15.9 CD	13.9 DE			

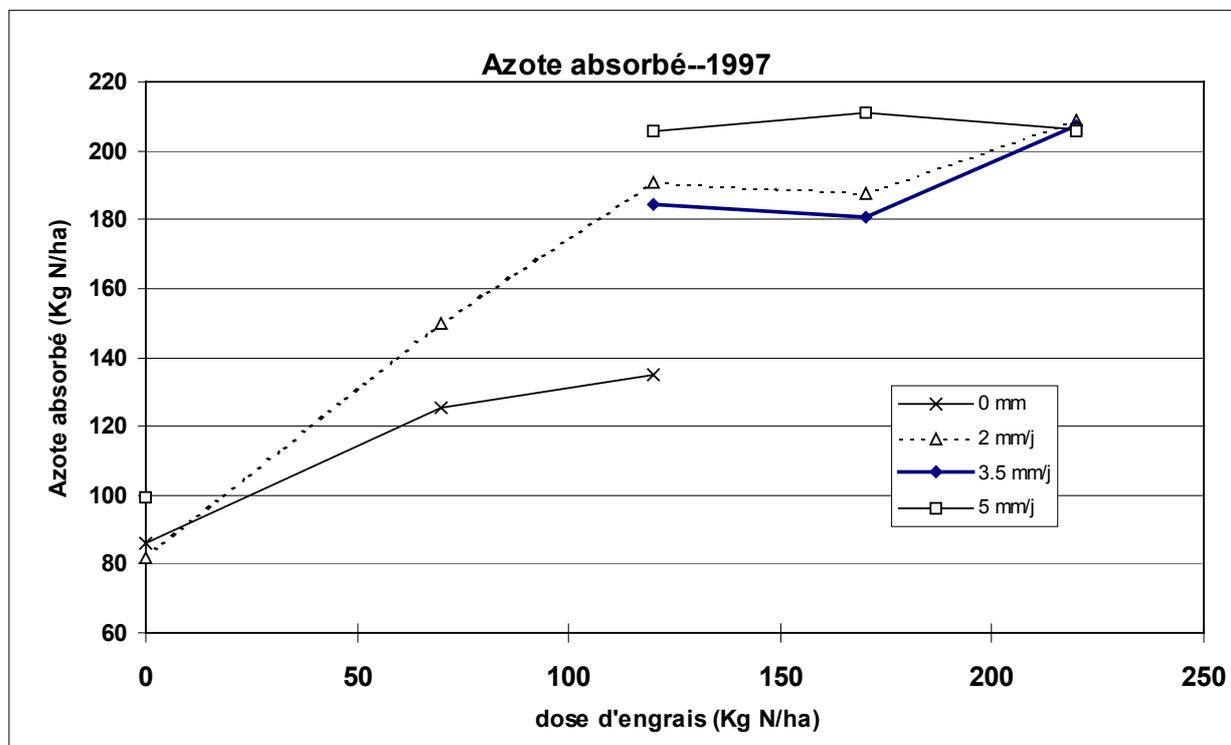
ET : 1.57  
CV : 9.1%

#### 4.1.3. Azote absorbé

Là non plus, l'analyse statistique ne met pas en évidence des différences significatives entre les régimes. Par contre, contrairement à 96, la dose optimale d'engrais est de 120 unités (X-50). Ceci amène à dire que la plante a mieux valorisé l'azote en 97 pour des doses plus faibles.

On peut noter qu'il n'y a pas de consommation de luxe : pour le régime 5 mm/j, la plante absorbe autant d'azote à la dose 120 qu'à la dose 220 unités.

**La dose optimale d'engrais en 1997 est bien de 120 unités** alors qu'elle était de 170 en 1996. On peut émettre l'hypothèse que les meilleures conditions climatiques de 1997 (meilleure minéralisation de l'engrais grâce à des températures plus favorables) permettent d'atteindre les objectifs de rendements fixés avec une dose d'engrais de seulement 120 unités d'azote.



		DOSE AZOTE						
		1997	0	70	120	170	220	220+
DOSE IRRIGATION	3.5 mm/j				184.5 A	180.8 A	207.5 A	
	5 mm/j	99.1 C			205.9 A	211.1 A	206.1 A	205.9 A
	2 mm/j	81.8 C	149.8 B	190.9 A	187.7 A	208.7 A		
	0 mm	85.8 C	125.5 B	134.9 B				

ET : 15.47  
CV : 9.3%

## 4.2 Les reliquats

### 4.2.1 Les reliquats théoriques

Pour savoir si l'arrière effet de fertilisation doit être pris en compte en 1997, on dispose des valeurs de reliquats au 17 février. Au 17 avril 1997, des différences sont observées entre traitements surfertilisée et traitements sous-fertilisés, cependant, elles demeurent faibles (20 Kg N/ha). De plus, au 17 avril 1997, il reste encore 2 mois avant le semis (17 avril), et on peut penser légitimement que ces différences auront tendance à s'amenuiser par le phénomène de lessivage. De ce fait, pour le calcul des reliquats théoriques, considérer l'arrière effet de fertilisation n'amènera pas de biais notables aux valeurs obtenues, on peut donc ne pas le considérer.

En 1997,

$$N \text{ final (théorique)} = N \text{ engrais} + FS - N \text{ abs.}$$

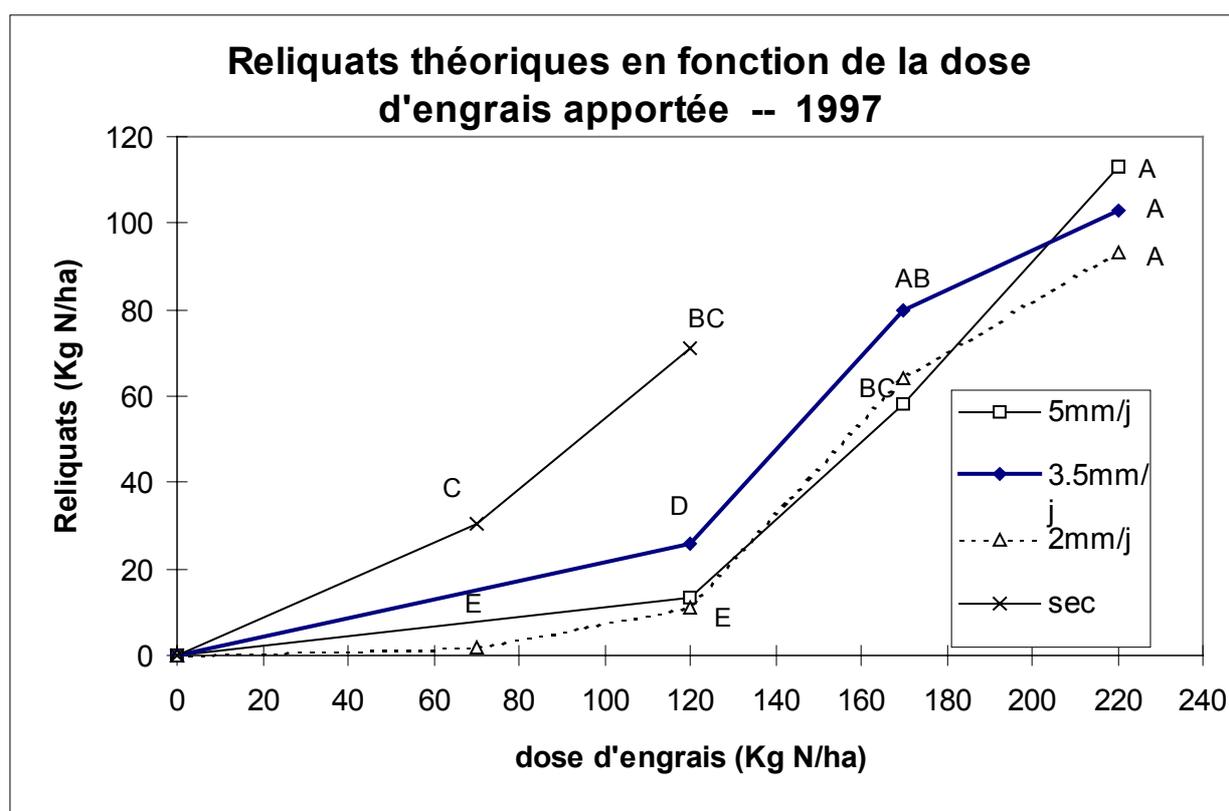
Cependant, les fournitures du sol apparaissant significativement différentes entre régimes hydriques par la méthode des contrastes (confert précédemment), on prendra donc des valeurs de FS spécifiques à chaque régime hydrique :

Régime hydrique	Fournitures du Sol en 1997
0 mm/j	85.8
2 mm/j	81.8
3.5 mm/j	<b>90.5</b>
5 mm/j	99.1

Les FS pour le régime hydrique 3.5 mm/j ont été calculées en prenant la moyenne des valeurs de FS des régimes hydriques 2 et 5 mm/j.

La brusque augmentation observée en 96 à partir de 170 unités se retrouve en 97 pour 120 unités. Le calcul de ces reliquats théoriques se basant sur les quantités d'azote absorbé par la plante, il est normal d'observer cette augmentation à partir de la dose 120 unités puisque la plante n'absorbe pas plus d'azote au-delà de cette dose (confert graphique de l'azote absorbé).

De plus, le régime non-irrigué fait apparaître des reliquats nettement plus élevés que les autres régimes, ce qui n'était pas le cas en 96.



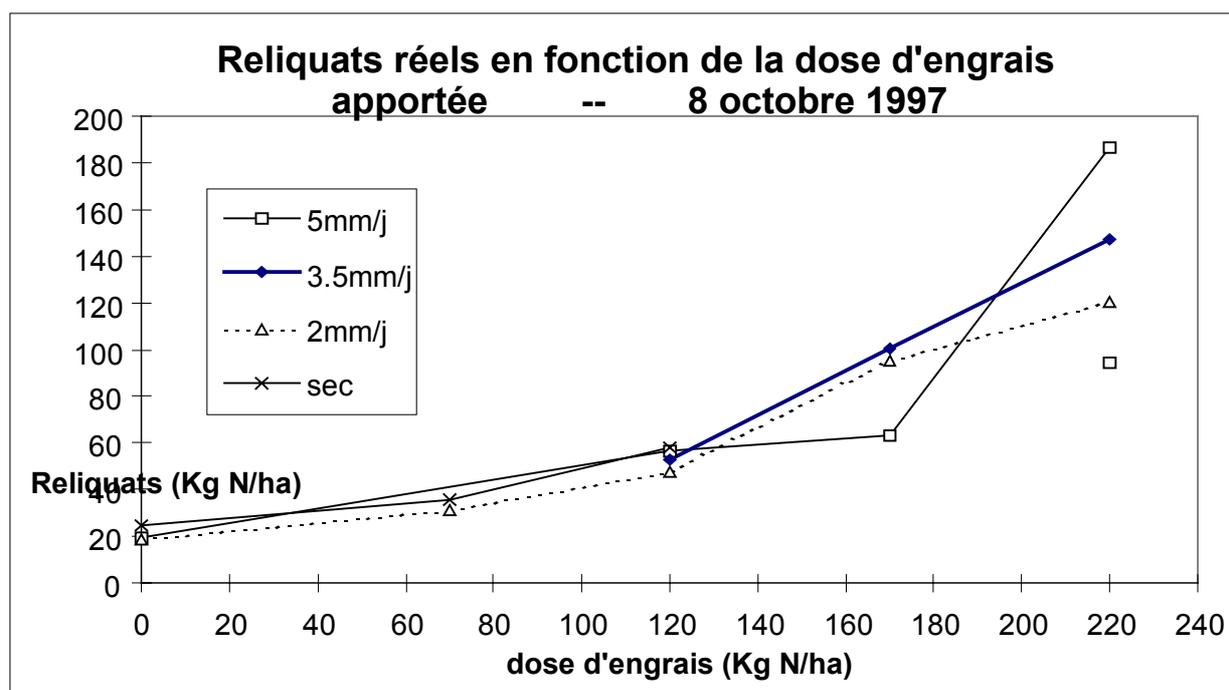
		DOSE AZOTE					
		0	70	120	170	220	220+
DOSE IRRIGATION	3.5 mm/j			26	79.7	103	
	5 mm/j			13.2	58	113	113.2
	2 mm/j		2	10.9	64.1	93.1	
	0 mm		30.3	70.9			

FS 0 mm:	85.80
FS 2 mm	81.80
FS 3.5 mm	90.50
FS 5 mm	99.10

#### 4.2.2 Les reliquats réels à la récolte

La distinction des reliquats réels entre les différents régimes est moins nette qu'en 96.

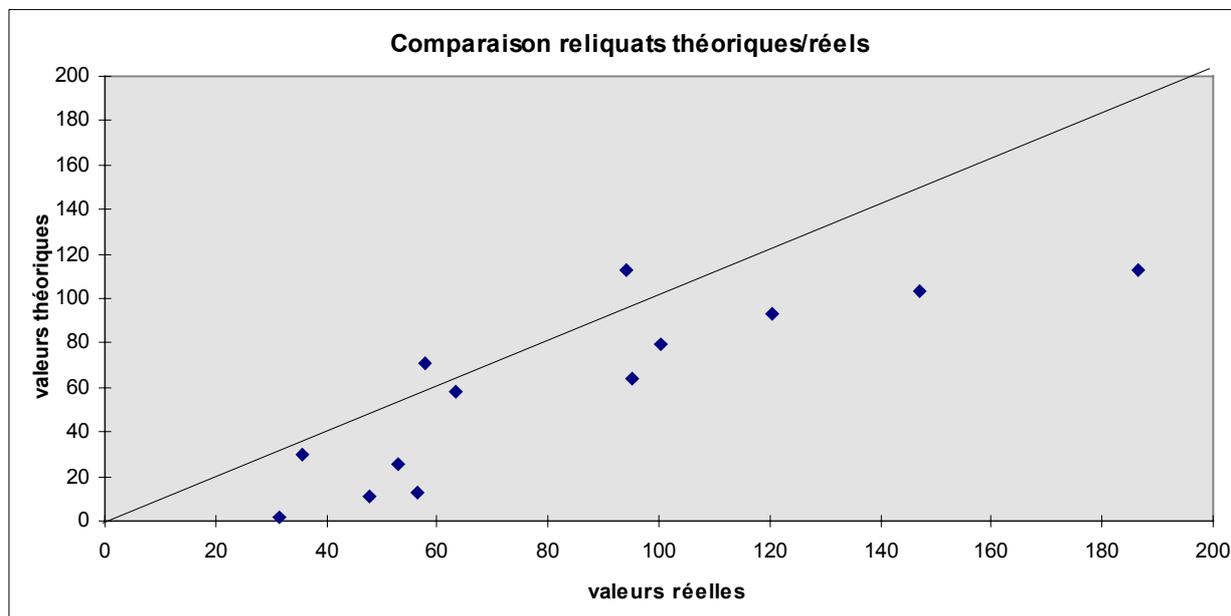
Comme en 1996, le régime hydrique de 5 mm/j permet des reliquats plus faibles qu'avec les autres régimes pour la dose X de 170 unités.



		DOSE AZOTE					
		08/10/97	0	70	120	170	220
DOSE IRRIGATION	3.5 mm/j			53	100.3	147	
	5 mm/j	19.7		56.4	63.2	186.6	94.1
	2 mm/j	18.9	31.4	47.7	95.1	120.4	
	0 mm	24.7	35.7	57.9			

### 4.2.3 Comparaison reliquats théoriques et réels à la récolte

L'automne a été marqué par de très fortes températures, favorables à la minéralisation de l'azote organique du sol. Cela pourrait expliquer les niveaux élevés de reliquats mesurés au 8 octobre et la sous-estimation observée.



## 5 Les résultats agronomiques de l'année 1998

### 5.1 Rendement, biomasse, azote absorbé

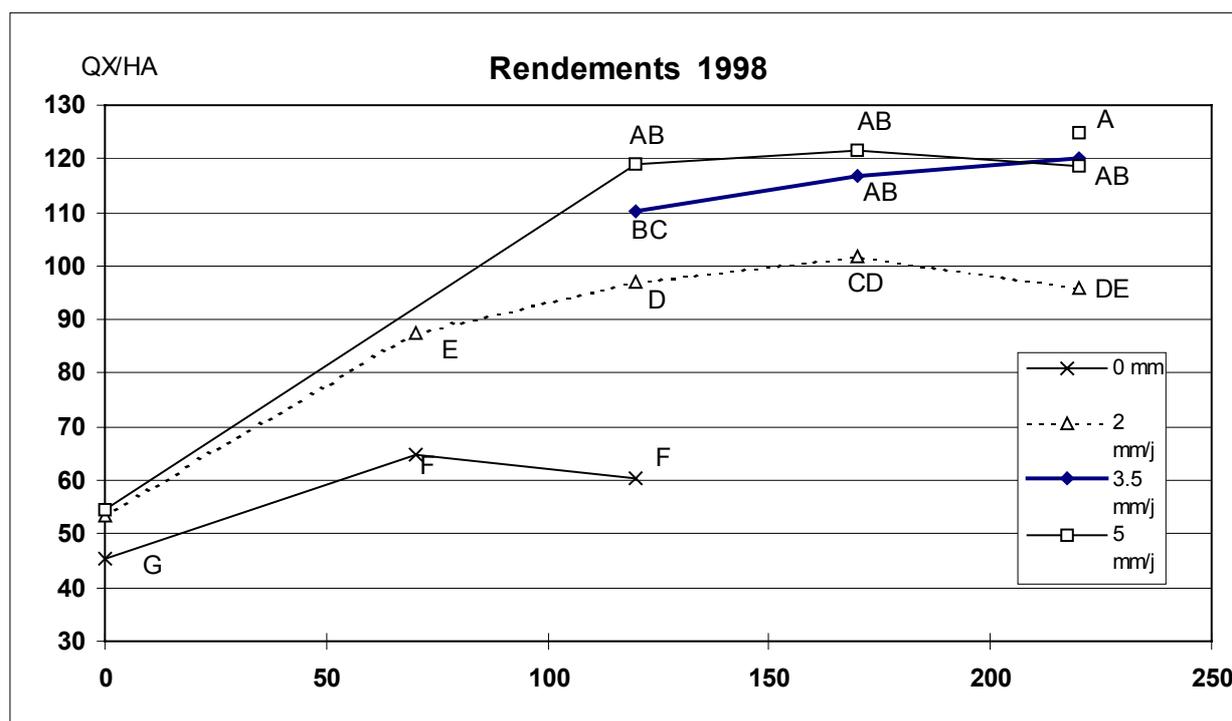
#### 5.1.1. Rendement

La différence de groupe homogène mise en évidence par le test de Newman et Keuls entre les 2 rendements issus des croisements 120 x 3.5 mm/j et 170 x 3.5 mm/j n'est pas confirmée par la méthode des contrastes ( $P = 0.2$ ), ce qui nous amène à dire que l'optimum de rendement pour les régimes hydriques irrigués est atteint pour une dose de 120 unités (110 qx avec le régime hydrique 3.5 mm/j).

Pour une même dose d'azote, on observe des différences beaucoup plus marquée entre les 3 régimes hydriques malgré un écart-type de 6.5 qx. Le facteur limitant semble être cette année la dose d'irrigation apportée : en effet, on n'obtient pas de différences significatives entre les 3 doses d'azote 120, 170, et 220 pour le régime 5 mm/j. Par contre, on observe des différences significatives pour chaque dose d'azote entre les régimes 2 et 3.5 mm/j.

Le rendement de 64.7 qx obtenu avec la combinaison 0 mm/j et 70 unités semble anormalement élevée, ce que confirme les indices de récolte (Cf annexe 20).

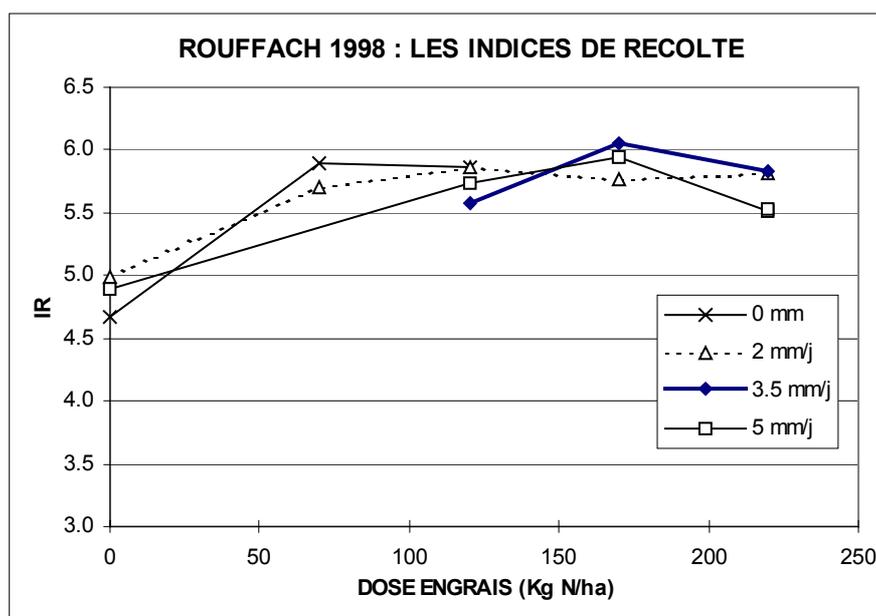
En 98, les résultats du régime 2 mm/j sont significativement différents de ceux des régimes 3.5 et 5 mm/j, ce que confirme l'analyse des relevés tensiométriques. Ces deux derniers donnent des résultats comparables sauf à 120 Kg N où il serait nécessaire d'irriguer de manière plus soutenue.



		DOSE AZOTE						
		1998	0	70	120	170	220	220+
DOSE IRRIGATION	3.5 mm/j				110.2 BC	116.8 AB	120 AB	
	5 mm/j	54.4 FG			118.9 AB	121.6 AB	118.7 AB	124.8 A
	2 mm/j	53.4 FG	87.5 E	97.2 DE	101.8 CD	95.8 DE		
	0 mm	45.5 G	64.7 F	60.4 F				

ET : 6.46

CV : 6.9%

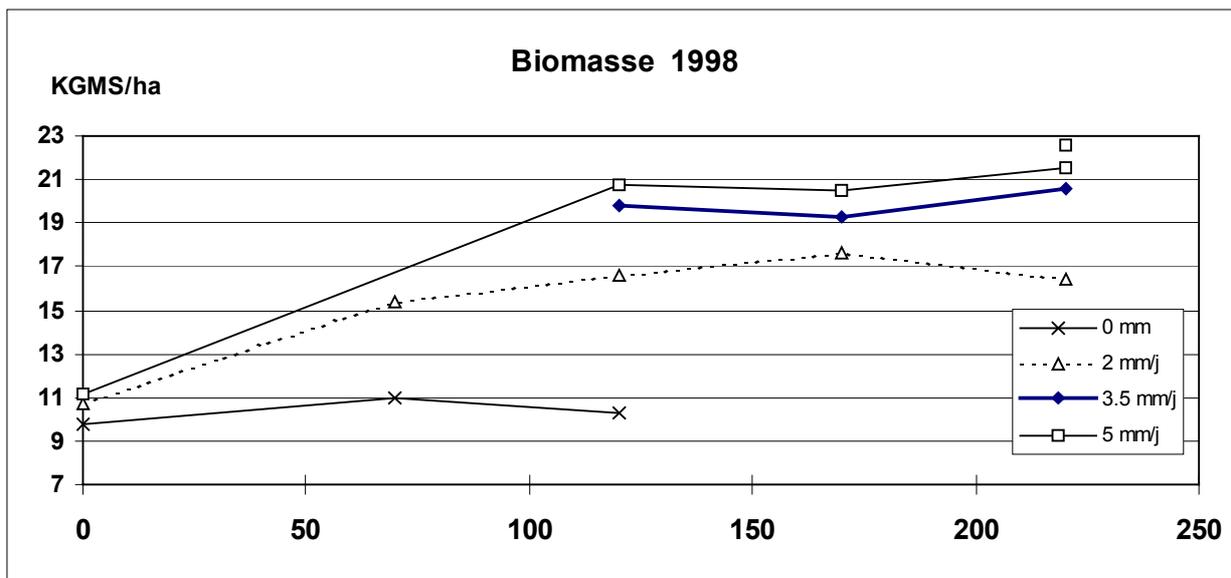


Il ne semble pas y avoir de valeur aberrante en 1998.

### 5.1.2. Biomasse

Les résultats semblent là encore être bien corrélés avec ceux des rendements. L'analyse statistique fait mieux la distinction entre les différents régimes contrairement aux 2 autres années.

Nous pouvons avancer l'hypothèse suivante pour expliquer la différence significative observée sur les rendements et la biomasse du régime 2 mm/j entre les doses 170 et 220 unités : la dose excessive de 220 unités favorise le développement des feuilles, donc de la surface évaporante qui engendre par la suite un stress hydrique plus prononcé. Comme le laissaient prévaloir les analyses des courbes d'évolution de la RU et des relevés tensiométriques, le régime hydrique de 2 mm/j apparaît comme limitant pour le développement du maïs en 1998.

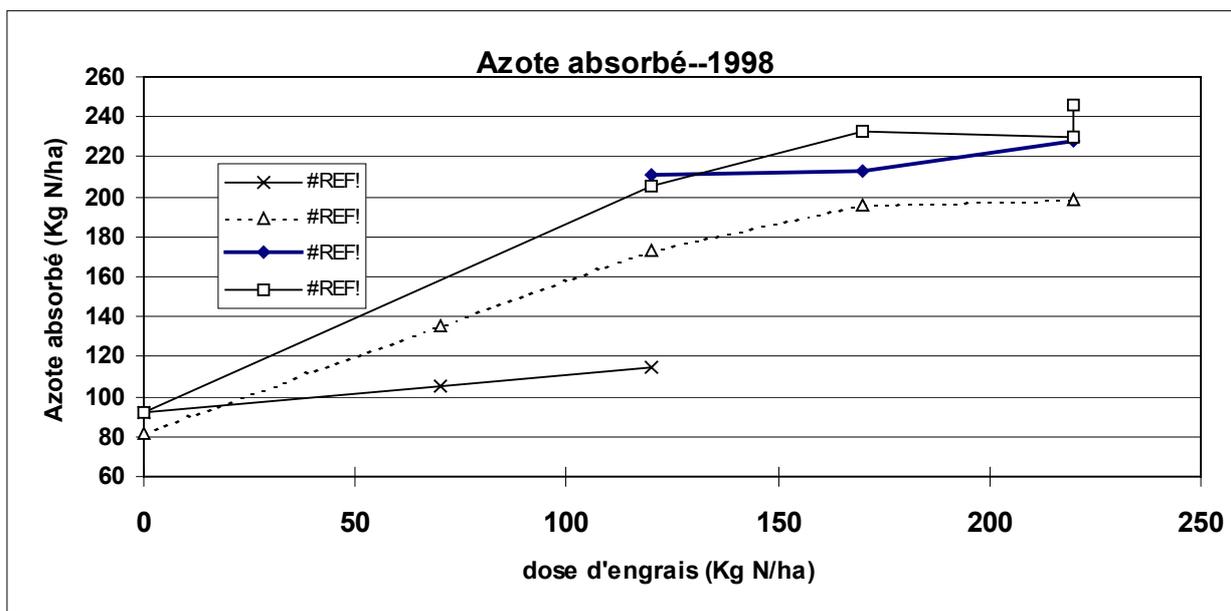


		DOSE AZOTE						
		1998	0	70	120	170	220	220+
DOSE IRRIGATION	3.5 mm/j				19.78 ABC	19.35 ABC	20.57 AB	
	5 mm/j	11.13 E			20.72 AB	20.45 AB	21.55 AB	22.59 A
	2 mm/j	10.71 E	15.36 D		16.58 CD	17.67 BCD	16.46 CD	
	0 mm	9.74 E	10.96 E		10.3 E			

ET : 1.79  
CV : 10.8%

### 5.1.3. Azote absorbé

Il n'y a pas de différences significatives entre les régimes 3.5 et 5 mm/j. C'est à partir de 170 unités que la plante n'absorbe pas plus d'azote quand on augmente la dose. Cette dose X apparaît bien ajustée aux besoins de la plante irriguée.



## DOSE AZOTE

	1998	0	70	120	170	220	220+
DOSE IRRIGATION	3.5 mm/j			210.5 B	212.4 AB	228.3 AB	
	5 mm/j	92.2 E		205.3 B	232.5 AB	229.9 AB	245.5 A
	2 mm/j	81.7 E	135.6 D	173.3 C	196.1 BC	199 BC	
	0 mm	92.2 E	105.2 E	114.9 DE			

ET : 16.55

CV : 9.6%

## 5.2 Les reliquats

## 5.2.1 Les reliquats théoriques

Afin d'apprécier l'arrière effet de fertilisation, on dispose des valeurs de reliquats au 20 février 1998, soit 2 mois et demi avant le semis (5 mai). On peut noter des différences importantes entre traitements (50 à 60 kg N/ha).

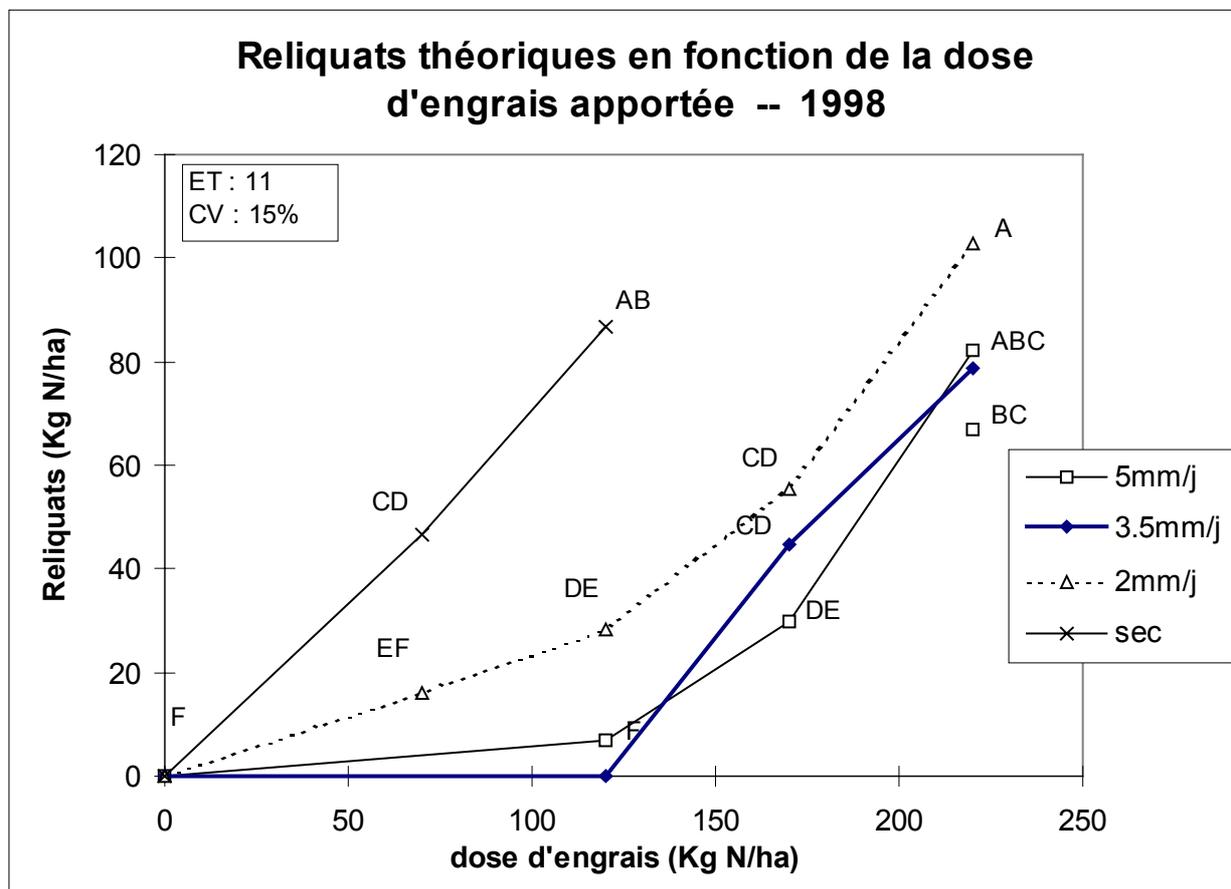
Il est difficile de dire si le lessivage pendant ces deux mois et demi sera suffisant pour arriver au moment du semis à des valeurs de reliquat du même ordre de grandeur entre les différents traitements. Le calcul des reliquats théoriques à la récolte pour 1998 a été fait comme les deux autres années, c'est à dire en négligeant l'arrière effet de fertilisation, mais ce calcul pourrait en être biaisé.

Comme en 1997, les fournitures du sol apparaissant significativement différentes entre régimes hydriques par la méthode des contrastes (confert précédemment), on prendra donc des valeurs de FS spécifiques à chaque régime hydrique :

Régime hydrique	Fournitures du Sol en 1998
0 mm/j	<b>81.7</b>
2 mm/j	81.7
3.5 mm/j	<b>87</b>
5 mm/j	92.2

La valeur mesurée d'azote absorbé du témoin 0N pour le régime hydrique non irrigué est de 92.2, ce qui semble aberrant ; on a donc pris la même valeur que pour le régime hydrique 2 mm/j. Les FS pour le régime hydrique 3.5 mm/j ont été calculées en prenant la moyenne des valeurs de FS des régimes hydriques 2 et 5 mm/j.

La distinction entre les 3 régimes est bien plus nette en 98 qu'en 96 et 97. Ceci tient au fait des différences nettement significatives observées entre les quantités d'azote absorbé pour les régimes hydriques 0, 2 et 3.5 mm/j.



DOSE IRRIGATION	DOSE AZOTE					
	0	70	120	170	220	220+
3.5 mm/j			0	44.6	78.7	
5 mm/j	0		6.9	29.7	82.3	66.7
2 mm/j	0	16.1	28.4	55.6	102.7	
0 mm	0	46.5	86.8			

FS 0 mm:	81.7
FS 2 mm	81.7
FS 3.5 mm	87
FS 5 mm	92.2

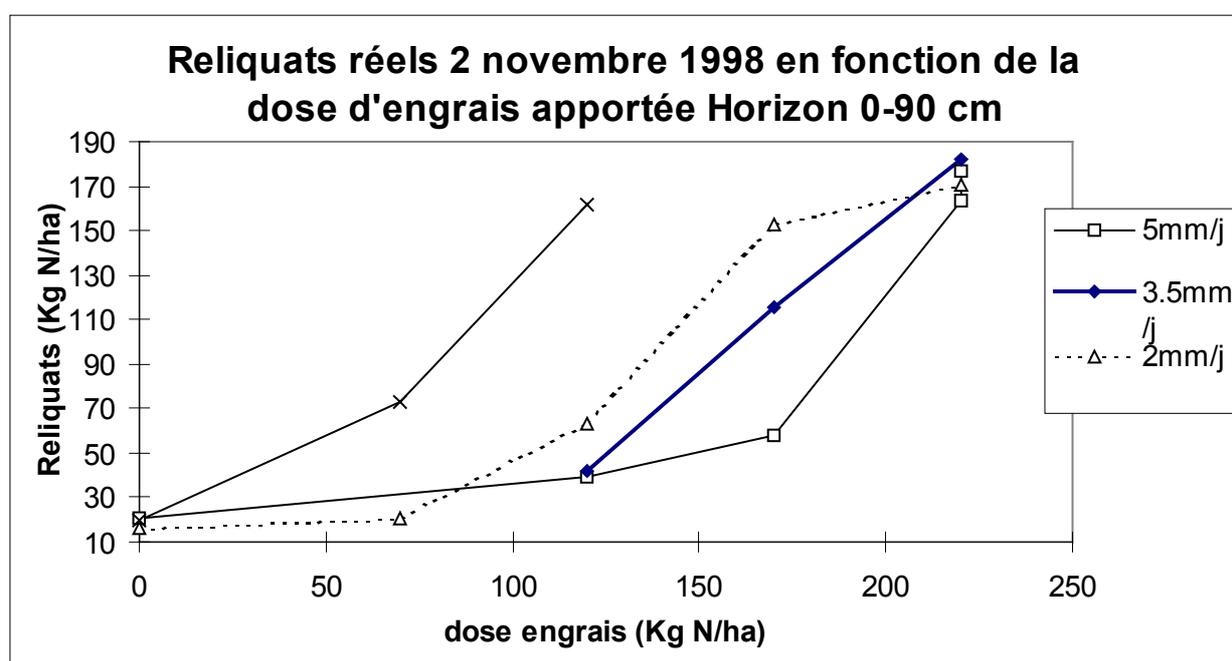
### 5.2.2 Les reliquats réels à la récolte

Pour les valeurs de reliquats du 2 novembre 98, 2 courbes ont été tracées. L'une sur l'horizon entier 0-90cm avec quelques valeurs de l'horizon 0-30cm ayant été évaluées pour cause de résultats du laboratoire aberrants, et une autre sur l'horizon 30-90 cm pour laquelle aucune valeur n'a été changée. Ces deux courbes conservent cependant la même allure avec un classement logique des traitements. Les valeurs de reliquats sont fortes (160 Kg N/ha) pour une dose de 120 unités épandue quand le maïs n'est pas irrigué. Pour les régimes 2 et 3.5 mm/j, les reliquats augmentent à partir de la dose

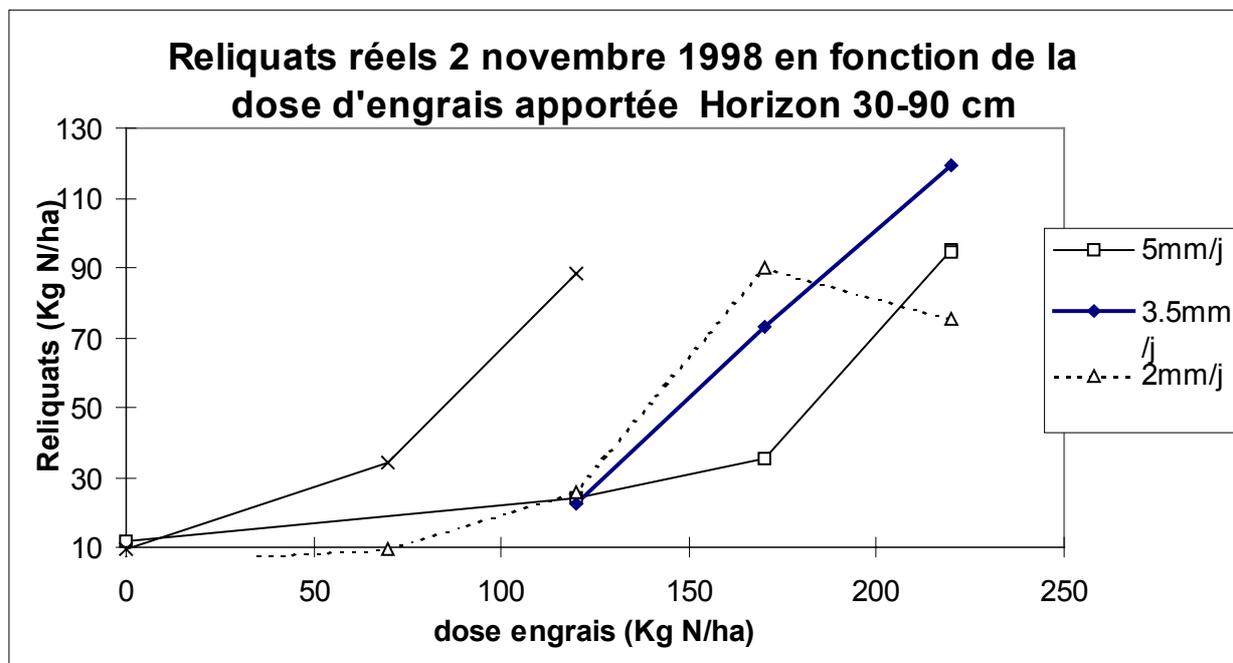
unités avec des valeurs plus fortes pour le régime 2 mm/j (110 et 150 Kg N/ha respectivement pour les régimes 3.5 et 2 mm/j pour une dose de 170 Kg N/ha épandue). Enfin, pour le régime 5 mm/j, les reliquats n'augmentent nettement qu'au-delà d'une dose de 170 unités (autour de 50 Kg N/ha pour une dose de 170 unités).

Des deux optimums de rendement relevés (120\*5 mm/j et 170\*3.5 mm/j), la combinaison 120\*5 mm/j apparaît comme la plus favorable pour l'environnement (40 Kg N/ha contre 120).

Cependant, l'emploi d'un régime hydrique apportant un excédent d'eau peut amener le sol à être saturé en eau et favoriser ainsi l'entraînement des nitrates en-dessous de la zone d'exploitation racinaire, condamnant ainsi ces nitrates à être lessivés. Or d'après les graphes d'évolution de la RU dans le sol, on observe ponctuellement celle-ci comme étant pleine et ce, pour les trois années (surtout 97 et 98). Aussi, il n'est pas sûr que les faibles quantités de reliquats observées pour le régime hydrique 5 mm/j à la dose 170 soient le résultat d'une meilleure absorption de l'azote par le maïs, mais plutôt d'un lessivage de faible intensité, récurrent, ayant survécu plus précocement.



		AZOTE						
		0-90 cm	0	70	120	170	220	220+
DOSE IRRIGATION	3.5 mm/j				41.8	115.5	181.8	
	5 mm/j	21			39.7	57.6	163.7	176.9
	2 mm/j	16.5	20.3		62.8	153.1	170.2	
	0 mm	19.5	73.2	161.3				



		AZOTE						
		30-90 cm	0	70	120	170	220	220+
DOSE IRRIGATION	3.5 mm/j				22.4	72.9	119.2	
	5 mm/j	11.9			23.9	35.5	95.1	94.4
	2 mm/j	5.72	9.5		25.9	90	75.1	
	0 mm	9.7	34.5	88.4				

### 5.2.3 Comparaison reliquats théoriques et réels à la récolte.

Les reliquats calculés sont globalement sous-estimés. Les températures élevées observées au début de l'automne 98 pourraient être à l'origine d'une minéralisation intense comme en 1997, expliquant de ce fait cette sous-estimation. Cette sous-estimation peut également être attribuée à l'arrière effet de fertilisation non pris en compte dans le calcul des reliquats théoriques (confert précédemment).

Les valeurs de reliquats d'azote minéral dans le sol aux autres périodes sont présentées en annexe 2.

## 6. L'interaction eau-azote pendant les trois années

Ce chapitre a pour but d'analyser l'interaction entre régime hydrique et dose d'engrais apporté en comparant différents graphiques pour chacune des trois années.

### 6.1. Les graphiques de corrélation : introduction

Plusieurs graphiques d'interaction peuvent être tracés : rendement, biomasse, N absorbé... en fonction de la dose d'engrais. Ces trois graphiques par année montrent les mêmes conclusions concernant l'interaction entre régime hydrique et dose d'engrais.

Ainsi en 1996, les 4 courbes correspondant aux 4 régime hydriques sont très proches et on ne peut donc pas mettre en évidence une quelconque interaction (voir page 113).

Par contre, en 1997, on peut mettre en évidence une interaction faible entre régime hydrique et dose d'azote : les courbes des régimes irrigués et celle du régime non irrigué ne suivent pas la même tendance (voir page 118).

Enfin pour 1998, on observe une interaction très nette : pour une même dose d'azote apporté, la plante irriguée avec un régime hydrique de 3.5 mm/j valorise mieux l'azote que la plante irriguée avec un régime de 2 mm/j, qui à son tour valorise mieux l'azote que la plante non irriguée. Cependant, il n'y a pas de différences d'interaction mises en évidence entre les deux régimes hydriques 3.5 et 5 mm/j (voir page 122).

Plus généralement, lors d'une année très humide comme cela a été le cas en 1996, on ne peut pas mettre en évidence une interaction entre régimes hydriques et dose d'azote : l'irrigation n'est pas nécessaire pour valoriser l'azote jusqu'à une dose de 120 unités. Lors d'une année se situant dans la médiane climatique comme 1997, le maïs valorise mieux l'azote lorsqu'il est irrigué avec un régime hydrique de 2 mm/j que lorsqu'il n'est pas irrigué, et ce, dès la dose de 120 unités. Par contre, une irrigation de 2 mm/j paraît suffisante pour valoriser l'azote mis à la disposition de la plante, quelle que soit la dose. Enfin, lors d'une année très sèche, une irrigation de 3.5 mm/j est nécessaire pour que la plante valorise au mieux l'azote apporté par l'engrais. C'est en 1998 que l'interaction entre régime hydrique et dose d'engrais est la plus nette.

Voyons plus en détail les paramètres explicatifs de cette interaction plus ou moins marquée selon les années.

### 6.2. L'azote absorbé en fonction de la dose d'azote : les CAU

La détermination des Coefficients Apparents d'Utilisation de l'azote de l'engrais se fait géométriquement à partir des graphiques de l'azote absorbé en fonction de la dose d'engrais. Deux ou trois points ont été pris en fonction des données disponibles afin de tracer les droites pour chaque régime hydrique. Les CAU de chaque régime hydrique sont les pentes de ces droites.

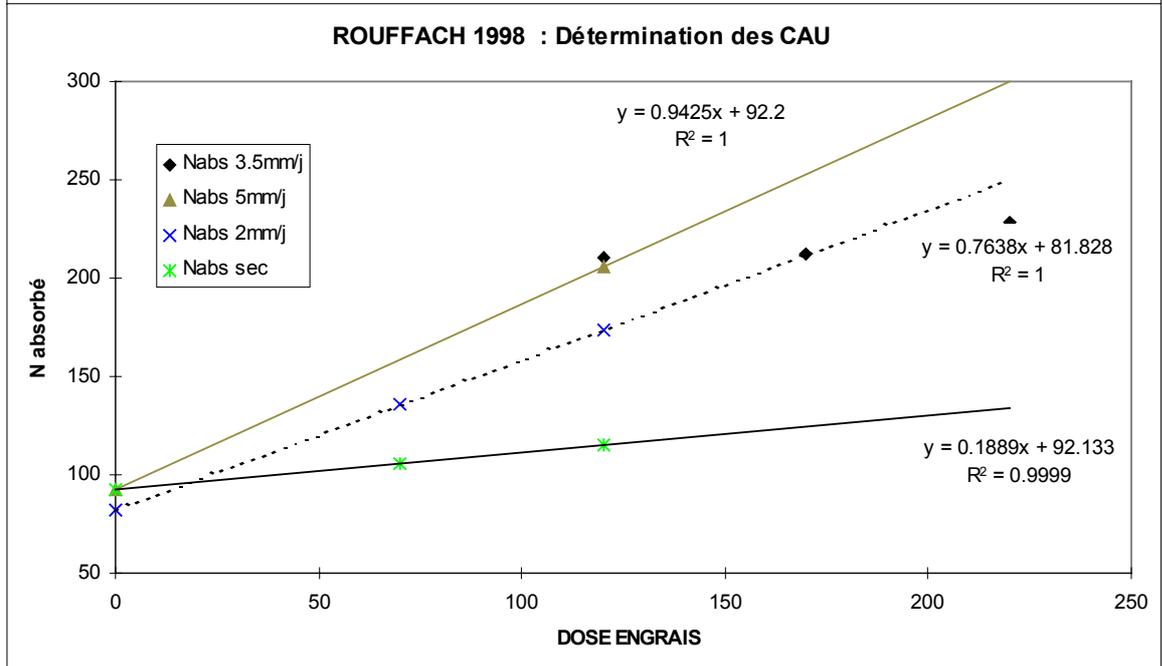
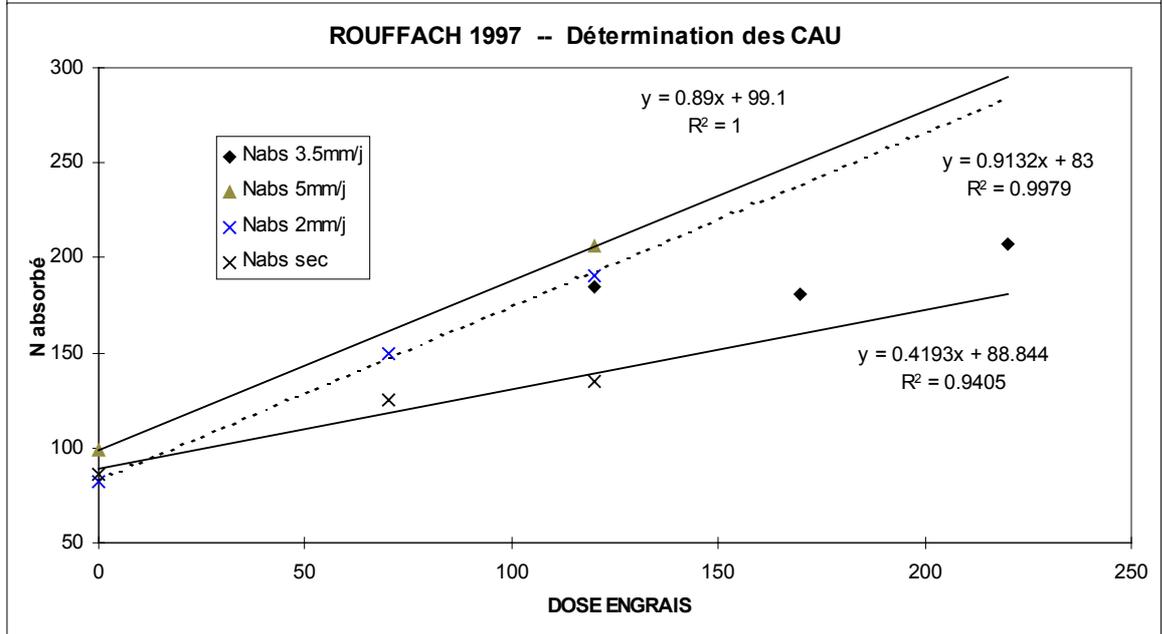
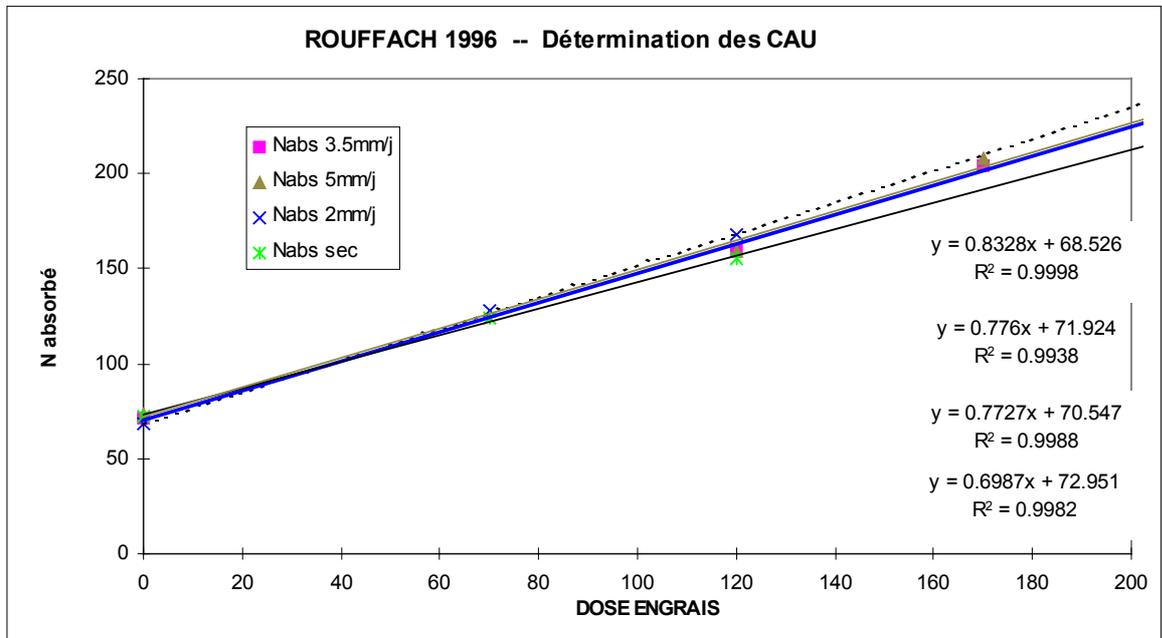
En 1996, les quatre droites correspondantes aux régimes hydriques sont quasiment parallèles avec une pente comprise entre 0.7 et 0.85. Le CAU de cette année est donc compris entre 70% et 85% quel que soit le régime hydrique considéré. L'azote provenant de l'engrais est utilisé par la plante de la même façon en condition irriguée et non irriguée.

En 1997, on distingue deux valeurs de CAU différentes : un CAU de 90% pour les régimes hydriques irrigués et un CAU de 60% pour le régime non irrigué.

En 1998, des différences de CAU apparaissent plus nettement entre les régimes hydriques. Ainsi, on observe un CAU de 20% pour le régime non irrigué, 75% pour le régime hydrique de 2 mm/j et un CAU de 95% pour le régime hydrique de 5 mm/j. Le CAU afférent au régime hydrique de 3.5 mm/j n'est pas directement accessible par manque de valeurs aux faibles doses d'azote (0 et 70 unités), mais en considérant que les fournitures du sol sont sensiblement les mêmes pour tous les traitements, la droite qui passerait par ce point à 0 N et par le point à 120 kg N/ha serait quasiment parallèle à celle du régime hydrique 5 mm/j.

En conclusion, une interprétation claire se dégage de ces graphiques selon laquelle le CAU diminue lorsque l'alimentation hydrique est défavorable. En 1996, cette alimentation hydrique défavorable n'intervient pas, même pour le régime hydrique non irrigué puisque les pluies étaient relativement fréquentes ; en 1997, elle intervient quand la plante n'est pas irriguée ; et en 1998, elle intervient pour les régimes hydriques non irrigués et restrictif à 2 mm/j. Ceci rejoint les précédentes conclusions.

De plus, on remarque que les valeurs de CAU maximales en fonction des régimes hydriques sont plus élevées en 1998 qu'en 1997, elles mêmes plus élevées que les CAU de 1996 (95%, 90% et 80% respectivement). Ainsi, avec un régime permettant une bonne alimentation hydrique, l'azote est mieux utilisé par la plante en 1998 qu'en 1997 et mieux utilisé en 1997 qu'en 1996. Les différences de température observées entre les trois années peuvent expliquer ces différences inter annuelles d'utilisation de l'azote par la plante (Cf Annexe 21).



### 6.3. Rdt et biomasse en fonction de l'azote absorbé

L'analyse des graphiques de rendement et de biomasse en fonction de l'azote absorbé traduisent l'efficacité de l'azote absorbé par la plante.

#### ◆ 1996

Le tracé des courbes de corrélation du graphique représentant le **rendement en fonction de l'azote absorbé** peut paraître illusoire, surtout pour le régime 5 mm/j pour lequel 3 des 5 points de la courbe sont au même endroit. Les courbes n'ont été tracées que pour les régimes 2 et 5 mm/j car c'est pour ces deux régimes que l'on a le plus de points (5).

Pour le régime 2 mm/j, on observe bien un aplatissement de la courbe à partir de 180 Kg N/ha, au-delà de laquelle le rendement n'augmente plus. Cette valeur semble être plus élevée pour le régime 5 mm/j. L'interprétation pour le régime 3.5 mm/j semble plus difficile en raison d'une valeur anormalement élevée.

Les points des 3 régimes irrigués sont globalement assez proches et mettent donc en évidence qu'en 1996, les rendements ont été peu influencés par le régime d'irrigation.

Le graphique représentant la biomasse en fonction de l'azote absorbé confirme cette interprétation : **il n'y a pas d'effet irrigation sur l'efficacité de l'azote en 1996.**

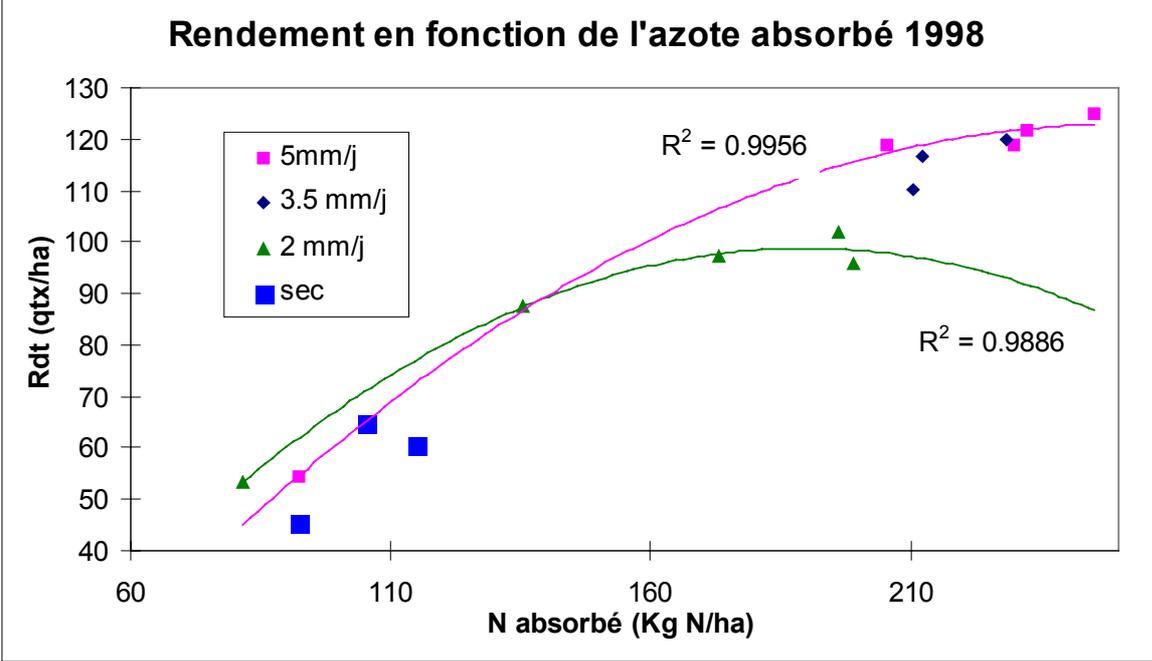
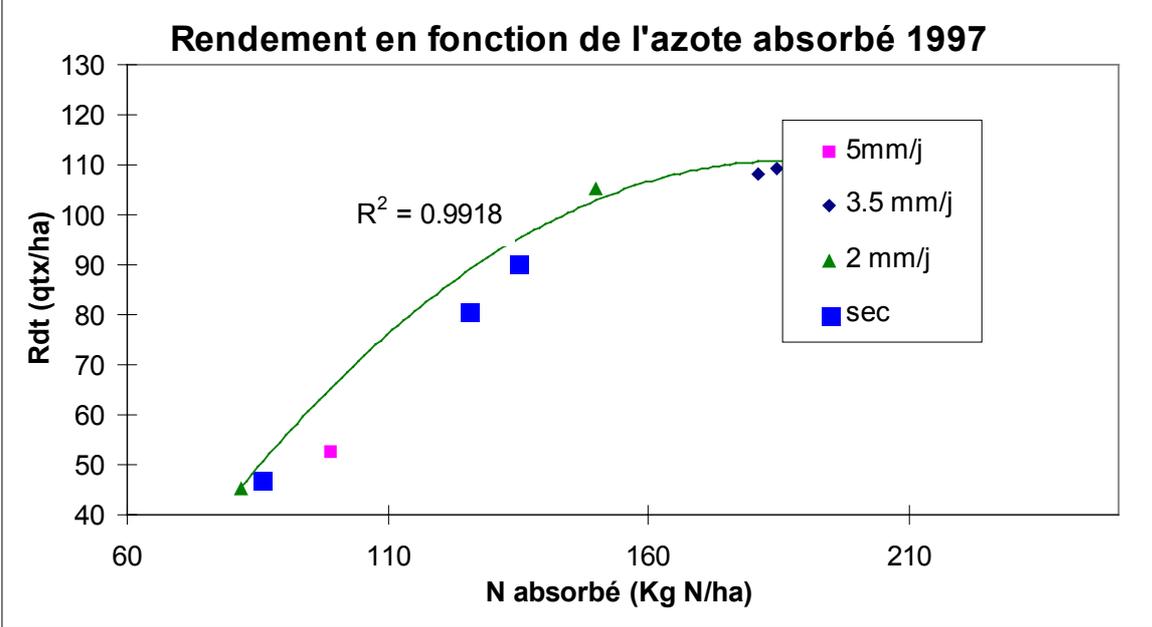
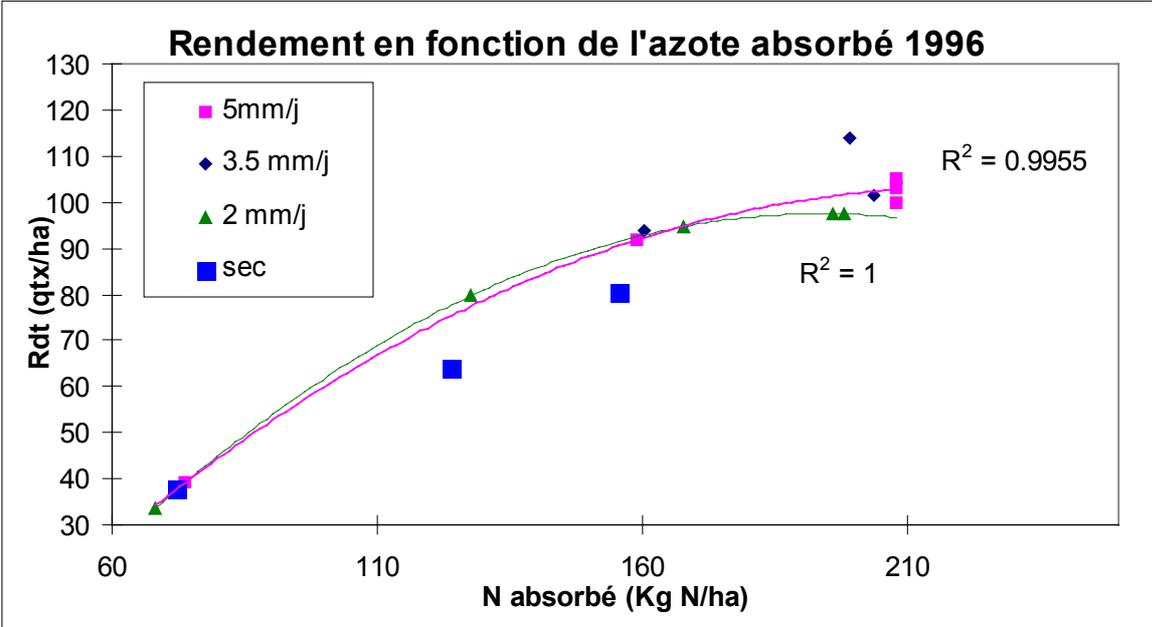
#### ◆ 1997

En ce qui concerne le graphique du rendement en fonction de l'azote absorbé, la limite à partir de laquelle on n'observe plus d'augmentation du rendement se situe proche de la valeur 170 Kg N/ha absorbé pour le régime 2 mm/j. On observe comme en 96, un point élevé pour le régime 3.5 mm/j, difficilement interprétable.

Les points restent dans l'ensemble, comme en 96, relativement proches démontrant ainsi que le régime hydrique a moins d'importance sur le rendement que la dose d'engrais apporté. Ceci est confirmé par le graphique de biomasse : comme en 1996, il n'y a **pas d'effet irrigation sur l'efficacité de l'azote.**

#### ◆ 1998

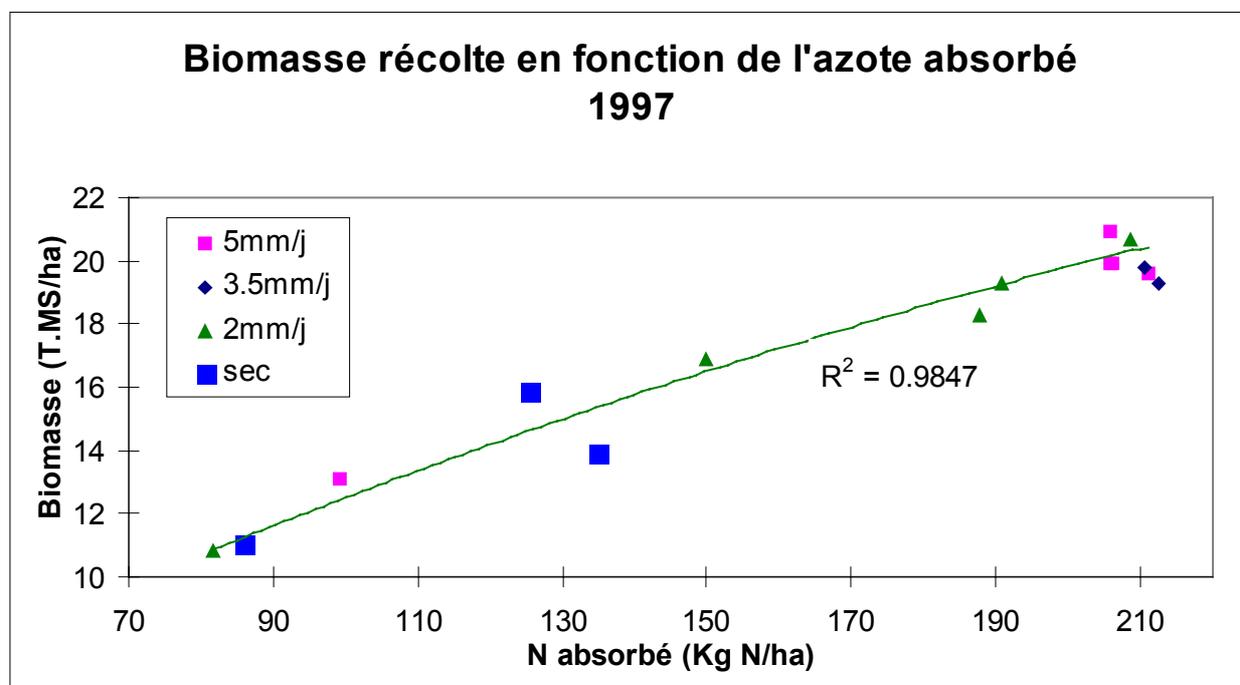
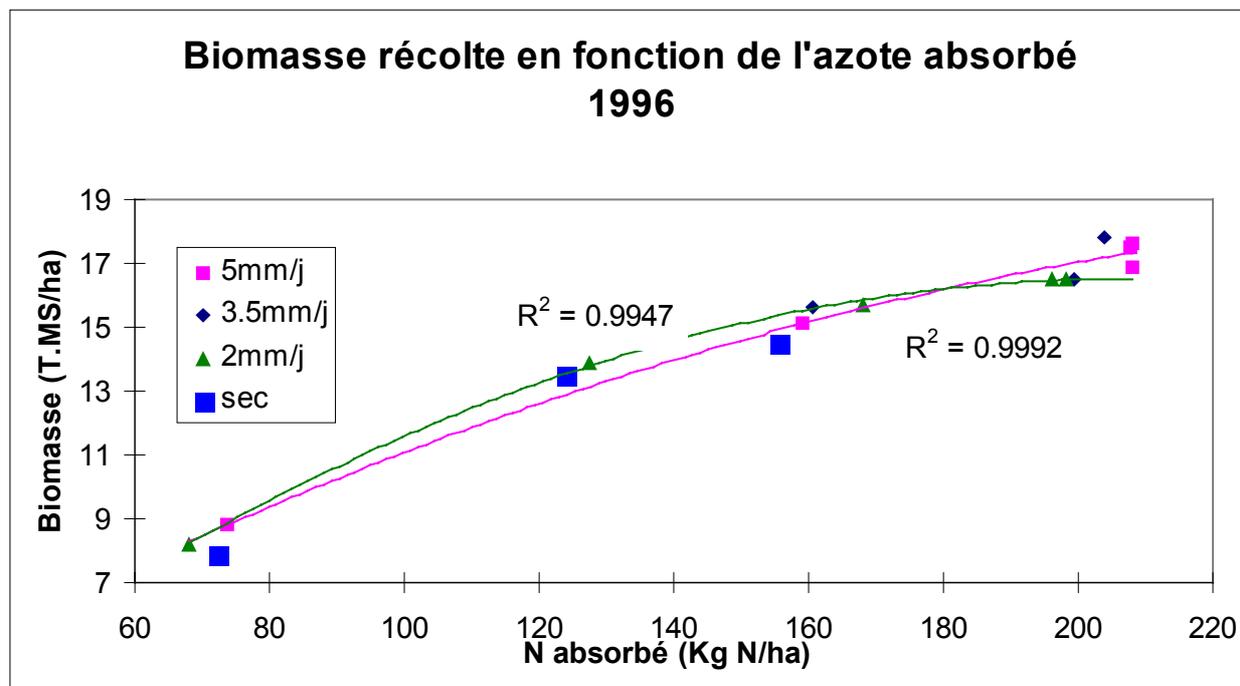
Les valeurs de rendements et de biomasse en fonction de l'azote absorbé pour les 2 régimes 3.5 et 5 mm/j sont proches. Ces 2 régimes permettent à la plante de bien valoriser l'azote. On observe une nette différence entre d'une part les régimes 3.5 et 5 mm/j et d'autre part le régime 2 mm/j, que l'on n'observait pas les autres années.

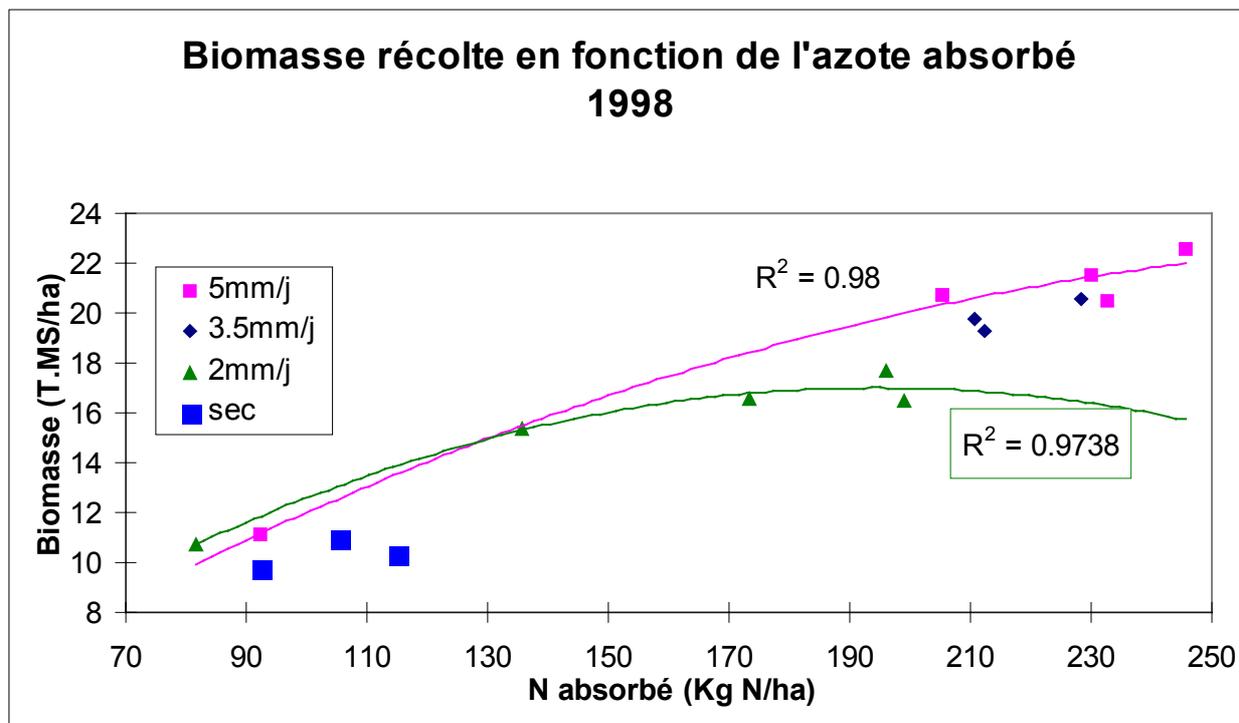


Au-delà d'une dose d'azote absorbé d'environ 150 Kg N, les rendements des 2 régimes 2 et 5 mm/j sont très différents pour une même dose d'azote absorbé. Il y a donc une meilleure efficacité de l'azote absorbé lorsque le régime hydrique n'est pas limitant.

Le régime hydrique de 2 mm/j permet d'alimenter en eau une biomasse restreinte, c'est à dire jusqu'à 150 unités d'azote absorbé.

En 1998, on observe donc des **efficacités différentes d'une part pour les régimes hydriques 0 et 2 mm/j qui apparaissent limitants pour la culture et d'autre part pour les régimes hydriques 3.5 et 5 mm/j qui permettent au maïs d'avoir une bonne efficacité de l'azote qu'il absorbe.**





#### Conclusion.

Ces résultats montrent qu'en 1996 et 1997, le déficit hydrique ne change pas l'état de nutrition azotée pour les différents régimes hydriques. Par contre, en 1998, l'état de nutrition azotée des régimes non-irrigué et sous-irrigué (2 mm/j) est nettement inférieur à celui des régimes 3.5 et 5 mm/j. En 1996 et 97, la période sèche a été interrompue de quelques épisodes pluvieux qui ont aidé à maintenir la disponibilité de l'azote concentré dans les couches superficielles du sol. En 1998, le sol a été asséché sur une profondeur plus importante (Cf les graphes d'évolution de la RU et les relevés tensiométriques), et les plantes ont été obligées de puiser l'eau plus en profondeur, alors que l'azote est concentré surtout vers la surface.

Ces deux situations amènent à des efficacités d'utilisation de l'eau tout à fait différentes : quand les plantes consomment l'eau préférentiellement des couches superficielles du sol où la concentration en azote minéral est élevée, l'efficacité de l'utilisation de l'eau est similaire pour les régimes irrigués et non-irrigués, et quand les plantes sont obligées, avec des régimes hydriques restrictifs (2 mm/j), de consommer l'eau des couches plus profondes où la concentration en azote est faible, l'efficacité de l'utilisation de l'eau en est diminuée à cause du manque d'azote induit par la sécheresse. (*Lemaire et Denoix, 1987*).

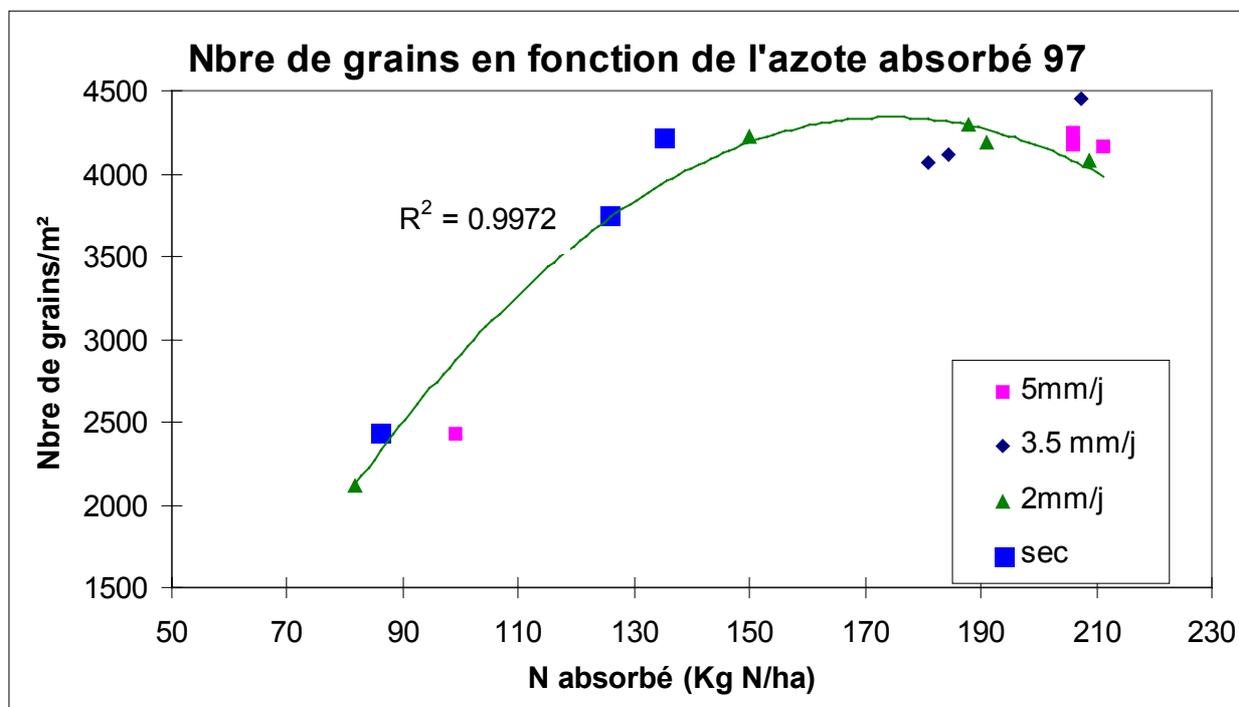
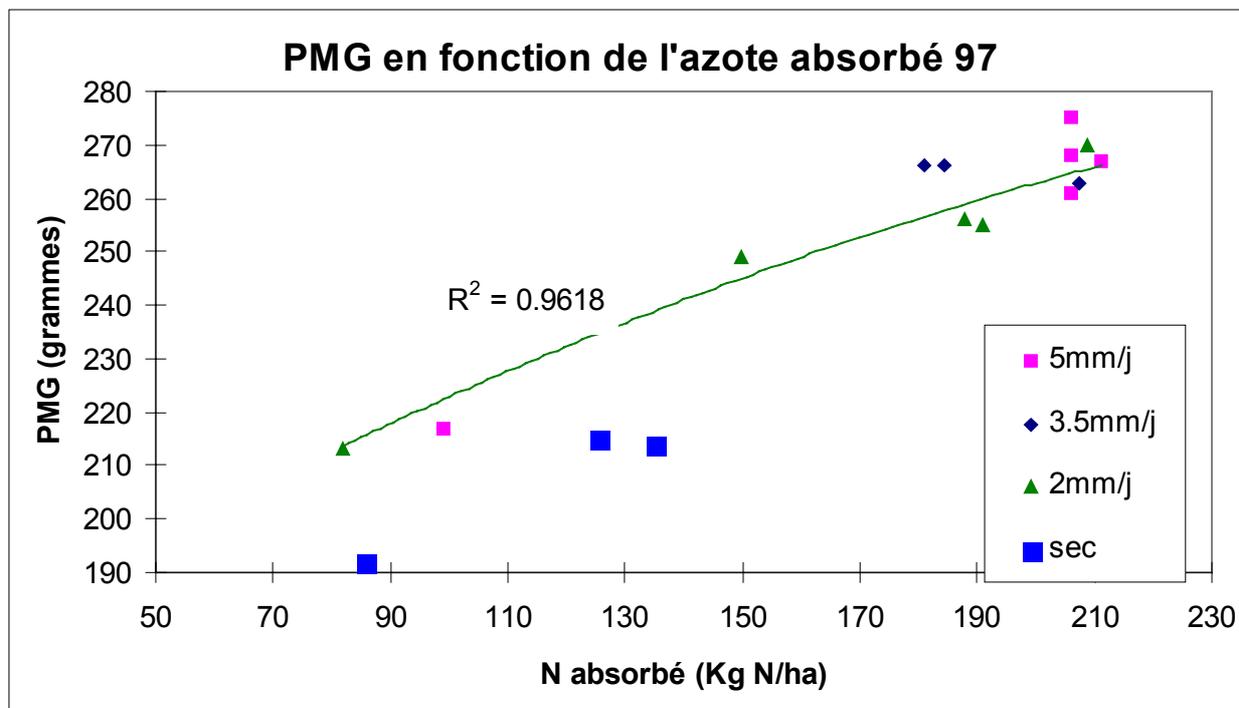
#### **6.4. PMG et nombre de grains/m<sup>2</sup> en fonction de l'azote absorbé**

L'analyse des courbes graphiques du PMG et du nombres de grains/m<sup>2</sup> en fonction de l'azote absorbé nous permet d'expliquer plus en détail les résultats mis en évidence dans le paragraphe précédent par l'explication des phénomènes sur les composantes du rendement et de la biomasse.

Cependant, l'analyse de ces courbes n'est possible qu'en 1997 et 1998 par manque de données disponibles en 1996.

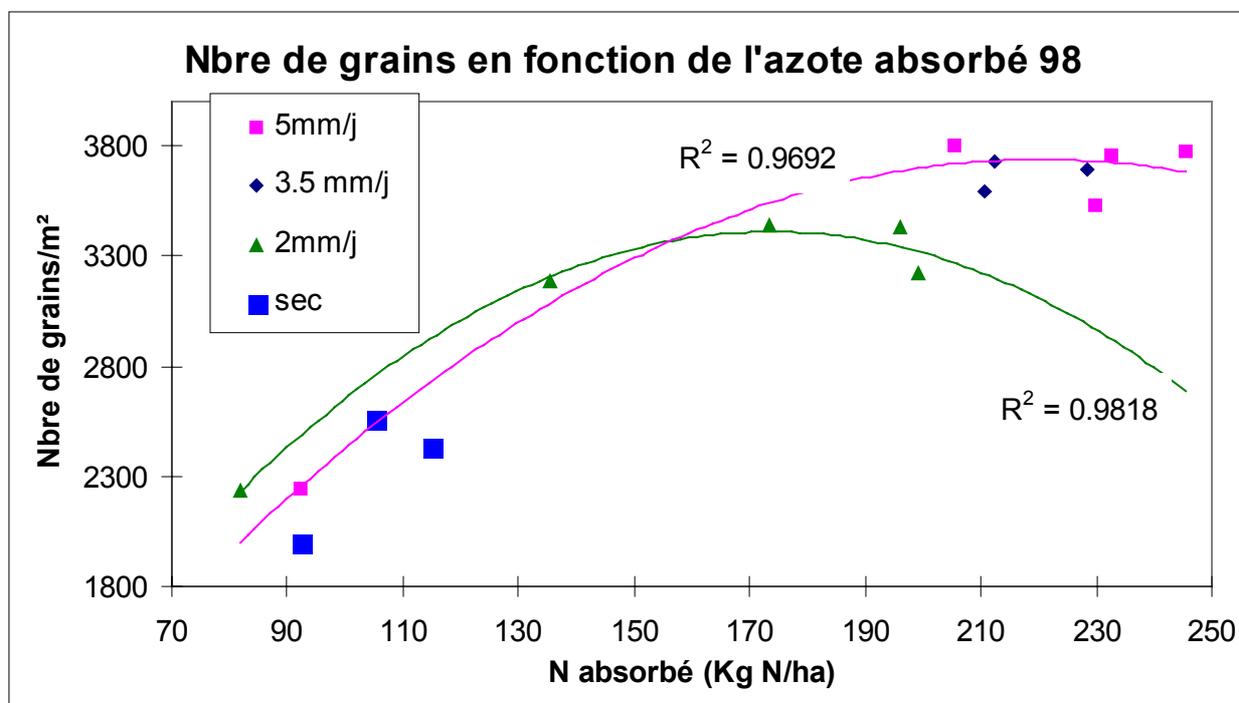
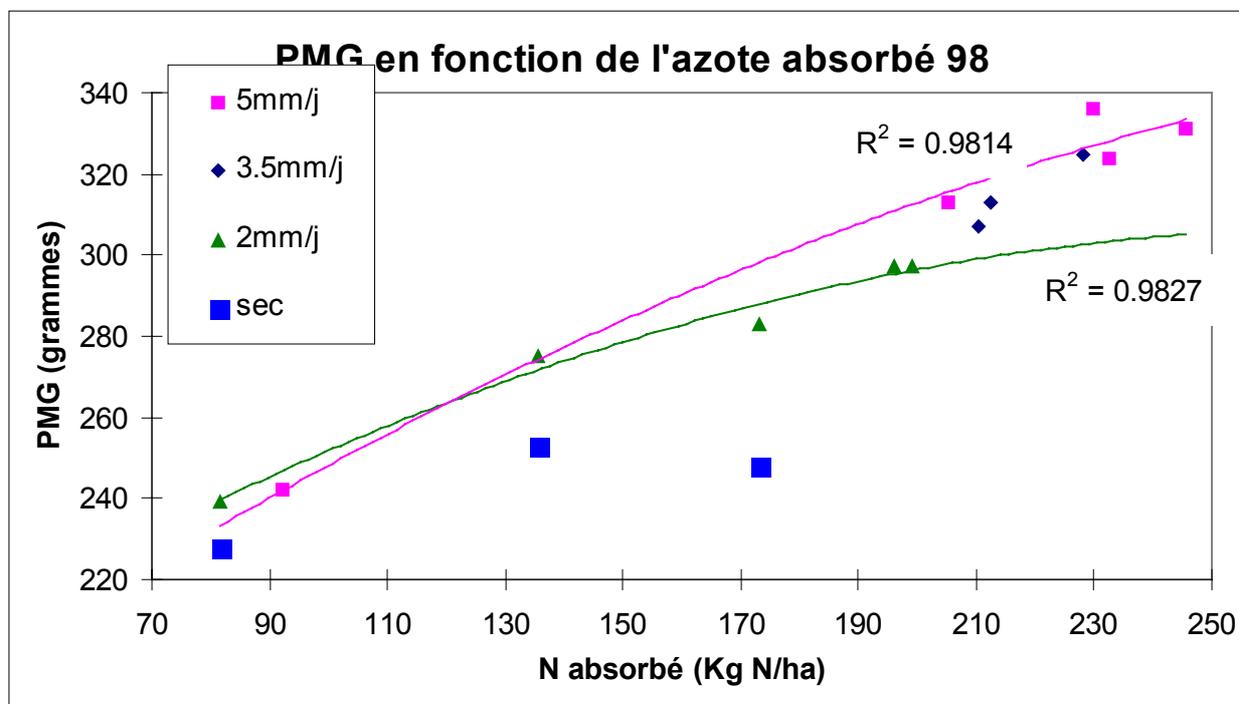
◆ 1997

Les différences d'efficacité mises en évidence précédemment affectent principalement le Poids de 1000 grains . Par contre, la courbe du nombre de grains/m<sup>2</sup> pour le régime non irrigué est très proche de celles des autres régimes irrigués, le nombre de grains/m<sup>2</sup> ne semble pas avoir été affecté par un régime hydrique limitant pour de faibles quantités d'azote absorbé. **Pour une même quantité d'azote absorbé, la baisse de rendement observée pour le régime non irrigué est due à une baisse du poids des grains.**



◆ 1998

Comme en 97, c'est la composante poids de 1000 grains qui a été affectée dans l'élaboration du rendement, par une moins bonne efficacité de l'azote absorbé dans les régimes 0 et 2 mm/j. Le nombre de grains/m<sup>2</sup> ne semble avoir été pénalisé par une restriction hydrique pour de faibles quantités d'azote absorbé. Par contre, à partir de 150 kg N absorbé, le nombre de grains/m<sup>2</sup> diminue pour le régime hydrique 2 mm/j, comparativement aux régimes hydriques 3.5 et 5 mm/j.



En conclusion, la faible efficacité d'azote absorbé observée pour le rendement et la biomasse s'explique par un effet du stress hydrique sur le PMG quelles que soient les quantités d'azote absorbé. De plus, quand l'azote devient moins limitant (autour de 150 kg d'azote absorbé), le stress hydrique affecte aussi le nombre de grains/m<sup>2</sup>.

## 6.5. Tableau récapitulatif

Relation étudiée	Conclusions
◆ N absorbé/dose d'azote	Effet du régime hydrique sur le CAU : 1996 : pas d'effet 1997 : effet du régime 0 mm/j. 1998 : effet des régimes 0 et 2 mm/j
◆ Rdt / N absorbé ◆ Biomasse / N absorbé	Effet du régime hydrique sur l'efficacité de l'azote absorbé: 1996 : pas d'effet 1997 : pas d'effet 1998 : effet des régimes 0 et 2 mm/j
◆ PMG / N absorbé ◆ Nbre de grains/m <sup>2</sup> / N absorbé	Explication des phénomènes sur les composantes en 1997 et 98 : Effet sur le PMG Effet sur le nombre de grains/m <sup>2</sup> à partir de 150 kg N absorbé.

L'interprétation des résultats synthétiques du tableau ci-dessus permet d'expliquer le phénomène suivant :

L'effet du régime hydrique a des conséquences directes sur le taux d'humidité dans le sol, qui détermine la disponibilité du sol en azote, susceptible d'être absorbé par la plante. D'autre part, l'apport d'eau conditionne le fonctionnement des plantes, notamment la croissance racinaire et le développement des feuilles. Une alimentation correcte en eau favorise une bonne croissance racinaire permettant ainsi l'absorption de l'azote. Ainsi le **CAU** est-il affecté quand il s'agit d'un régime hydrique limitant. L'azote absorbé par les racines est utilisé pour la croissance des feuilles, déterminant ainsi **l'efficacité de l'azote absorbé**. Enfin, grâce à la photosynthèse des feuilles, cette efficacité de l'azote absorbé est concrétisée par le **rendement**.

Nous venons donc de voir quels étaient les effets couplés de l'apport d'azote et d'eau sur le fonctionnement de la plante, quelles étaient leurs interactions et les conséquences sur l'élaboration du rendement. Il ressort de ces conclusions que l'apport d'azote et d'eau ne doivent pas être considérés séparément, mais bien en adéquation l'un avec l'autre et avec les conditions du milieu afin de valoriser au mieux l'investissement que représentent ces deux apports pour l'agriculteur. De plus, le non-équilibre entre les besoins de la plante et les apports sont préjudiciables pour l'environnement, notamment par le phénomène de lessivage qui peut entraîner des eaux fortement concentrées en ion nitrate vers l'aquifère. C'est ce que montre le chapitre suivant.

# Simulation du lessivage sur les sites de Rouffach et Hausen

## 1. Estimation des quantités lessivées pendant l'été

### 1.1. Présentation du modèle

Le principe du modèle utilisé est de calculer les stocks d'eau journaliers à partir des données météorologiques et de comparer les valeurs obtenues avec les stocks d'eau calculés à partir des profils d'humidité réalisés sur des prélèvements de terre à la tarière. En comparant ces deux valeurs par période, nous sommes capables d'estimer les quantités d'eau drainées en mm et les quantités d'azote minéral lessivé grâce aux mesures de concentrations en nitrate réalisées avec les bougies tensionics à 80 cm de profondeur.

$$\text{Stock « mesuré » (en mm)} = H_p \times d_a \times e$$

avec :

- ◆ **H<sub>p</sub>** : humidité pondérale relevée à la tarière.
- ◆ **d<sub>a</sub>** : densité apparente de terre fine.
- ◆ **e** : épaisseur de l'horizon en dm.

Pour chaque horizon (10 à 20 cm), on est ainsi capable de calculer le stock d'eau présent et de calculer le stock d'eau sur 0-80 cm par addition. La valeur obtenue est comparée avec :

$$\text{Stock « calculé » (en mm) au jour } j = \text{Stock } (j-1) - k \cdot \text{ETP} + P + I.$$

avec :

- ◆ **k** : coefficient cultural poste météorologique de Meyenheim.
- ◆ **ETP** décadaires du poste de Meyenheim
- ◆ **P** : Puiés en mm.
- ◆ **I** : Irrigations en mm.

De plus, on calcule un Intervalle de Confiance IC égal à :

$$IC = [ T (\text{Student au risque } \alpha=5\%) \times \text{Ecart-Type} ] / \sqrt{(\text{nombre de répétitions})}.$$

Le nombre de répétitions des mesures d'humidité étant égal à 8.

Si, pour une période donnée, le stock d'eau mesuré est inférieur au stock d'eau calculé +/- l'intervalle de confiance, alors il y a eu des pertes en eau, c'est à dire que de l'eau a été lessivée au-dessous de 80 cm. Si le stock d'eau mesuré est supérieur au stock d'eau calculé +/- IC, alors il y a eu des remontées capillaires. Enfin, si la différence des deux valeurs est inférieure ou égale à IC, alors on estime qu'il n'y a eu ni drainage, ni remontées capillaires.

Si on trouve des quantités d'eau drainées supérieures à IC pendant une période donnée, on peut estimer les quantités d'azote minéral qui sont lessivées par la formule suivante :

$$L = D \times [NO_3^-]$$

avec :

- ◆ **L** : quantités lessivées
- ◆ **D** : drainage en mm
- ◆ **[NO<sub>3</sub>-]** : concentration moyenne des 8 répétitions de mesure des bougies tensionics à 80 cm de profondeur sur la période donnée.

## 1.2. Résultats

En 1996, le calcul a été réalisé à partir de 4 dates de mesures du 18/6 au 13/8 pour les 3 régimes hydriques. En 1997, le calcul a été mené à partir de 5 dates de mesure pour les régimes 3.5 et 5 mm/j du 2/6 au 4/9 ; en ce qui concerne le régime hydrique 2 mm/j, 3 dates de mesures sont disponibles du 16/7 au 4/9. Pour l'année 98, 3 dates sont disponibles du 10/7 au 20/8.

### Quantités lessivées en Kg NO<sub>3</sub> /ha en fonction du régime d'irrigation et de la dose d'azote.

	2 mm/j x 120 unités	3.5 mm/j x 170 unités	5 mm/j x 220 unités
1996	<b>8.1</b>	<b>4.1</b>	<b>11.9</b>
1997	<b>0</b>	<b>2.2</b>	<b>3.7</b>
1998	<b>0.8</b>	<b>0</b>	<b>10.1</b>

La comparaison interannuelle paraît difficile et peu rigoureuse puisque il s'agit de périodes différentes d'une année sur l'autre. En revanche, la comparaison des quantités lessivées entre les 3 régimes hydriques montrent en 96 et 98 le même classement : le régime hydrique excédentaire de 5 mm/j combiné à une dose excédentaire d'azote (dose X+50 unités) favorise un lessivage d'une dizaine de kg NO<sub>3</sub>/ha en 1 mois et demi (soit à peine 2 kg de N/ha). La combinaison 3.5 mm/j x 170 unités apparaît comme limitant le plus le lessivage avec des quantités très faibles d'azote minéral entraînées en profondeur. Le régime 2 mm/j combiné avec une dose de 120 unités paraît favoriser des pertes en nitrates légèrement supérieures à celles du régime hydrique 3.5 mm/j. Cependant, les quantités restent faibles.

Les quantités lessivées plus importantes pour la combinaison 5 mm/j x 220 unités peuvent être expliquées d'une part par la dose d'azote excédentaire de 50 unités induisant des quantités d'azote non absorbé par la plante plus importantes susceptibles d'être entraînées en profondeur, et d'autre part en émettant l'hypothèse que la parcelle irriguée avec un débit de 5 mm/j se retrouve épisodiquement à la capacité au champ, ce qui favorise l'écoulement en profondeur de l'eau chargée en nitrate. C'est ce que confirme les graphiques de l'évolution de la RU les 3 années avec une réserve en eau du sol qui remonte à saturation très ponctuellement pendant certaines périodes.

Par contre, le régime hydrique de 3.5 mm/j combiné avec la dose X, qui apparaît comme le plus adapté aux besoins du maïs à Rouffach est moins favorable au lessivage de l'azote du sol pendant la période de culture. En effet, le sol n'est pas saturé en eau et on se garde une marge de sécurité pour d'éventuels orages.

### 1.3. Les limites du modèle

Il est tout d'abord regrettable que l'on ne puisse pas comparer la seule influence du régime hydrique mais bien celle couplée du régime hydrique et de la dose d'engrais.

De plus, les chiffres cités précédemment peuvent être biaisés par plusieurs facteurs :

- ◆ manque de données à certaines dates, donc diminution de la précision des résultats (par manque de répétitions).

- ◆ les remontées capillaires ne sont pas considérées comme source d'apport d'une eau étant chargée en nitrate.

- ◆ le lessivage est calculé au-dessous de 80 cm, profondeur à laquelle les racines du maïs sont plus rares mais encore présentes. De ce fait, elles peuvent encore prélever de l'azote en quantités non négligeables.

A cause des deux derniers points, les chiffres des quantités de nitrate lessivé auraient tendance à être surestimés, renforçant l'idée que le lessivage estival est un phénomène de faible intensité, comparativement au lessivage hivernal que nous allons voir en détail dans les paragraphes suivants.

## 2. Simulation du lessivage hivernal par LIXIM

Dans le cadre du programme de l'ITADA, deux sites ont servi à réaliser les essais concernant l'interaction eau-azote chez le maïs : un site en France : **Rouffach** et l'autre en Allemagne : **Hausen**, situé également en plaine du Rhin.

L'objectif de ces simulations pendant l'hiver est de paramétrer le modèle LIXIM (présenté et décrit dans la partie bibliographique) sur ces deux sites afin de voir l'effet du régime hydrique et de la dose d'engrais azoté sur la minéralisation, le drainage, et le lessivage.

Pour des raisons de manque de données disponibles pour Rouffach, l'application du logiciel de simulation LIXIM se retrouve restreinte à la seule simulation de l'hiver 97-98 (ce n'était pas prévu dans le protocole initial). Par contre, en ce qui concerne le site de Hausen, les données sont beaucoup plus nombreuses, de sorte que la simulation a pu être conduite de façon plus précise et ce pendant trois années consécutives.

### 2.1. Simulation pendant l'hiver 97-98 à ROUFFACH

LIXIM simulant le lessivage sous sol nu, les seules valeurs de reliquats exploitables pour la simulation sont celles de l'hiver. Or pendant l'hiver 96-97, une seule date de données a pu être relevée sur le terrain ; en 98-99, deux seulement. La simulation pendant l'hiver 98-99 a été réalisée mais les résultats de simulation sont globalement de mauvaise qualité et leur interprétation paraît de ce fait très incertaine, de sorte qu'ils ont été écartés de la suite des commentaires (annexe 3).

Par contre, on dispose de trois dates de relevés de reliquats pendant l'hiver 97-98 pour lequel la simulation a pu être effectuée. En voici les résultats.

### **2.1.1. Calage du modèle**

Quatre simulations successives ont été effectuées afin que la corrélation entre les valeurs simulées et observées soit la plus précise possible.

Une première simulation a été lancée avec des paramètres initiaux. La visualisation graphique de la corrélation entre valeurs simulées et valeurs observées d'humidité de cette première simulation a permis de mettre en évidence des valeurs observées aberrantes.

Une deuxième simulation a donc été réalisée en corrigeant ces valeurs aberrantes, améliorant ainsi la qualité de la simulation. Cependant, la simulation des valeurs d'humidité semblait globalement surestimer les valeurs observées. De plus, pour de nombreux traitements, on observait des valeurs simulées d'humidité égales aux valeurs d'humidité à la capacité au champ. Ceci nous a conduit à reconsidérer à la hausse les valeurs initialement entrées d'humidité à la capacité au champ.

Ainsi, une troisième simulation a été réalisée en prenant comme valeurs d'humidité à la capacité au champ 26 au lieu de 25 sur l'horizon 0-30 cm, et 23 au lieu de 22 sur l'horizon 30-60 cm. Ceci a eu pour effet d'améliorer globalement la corrélation entre valeurs simulées et observées d'humidité et de reliquats. Cependant, on observait encore une légère sous-estimation des valeurs d'azote minéralisé sur 0-30 cm ainsi qu'une légère surestimation des valeurs d'humidité.

Quelques valeurs de paramètres ont par conséquent été modifiées pour la dernière simulation :

Le facteur de pondération sur l'humidité de la première couche est passé de 2 à 3.

Le coefficient puissance de décroissance de l'évaporation est passé de 2 à 1.

L'épaisseur de la couche « minéralisante » est passée de 32 à 30 cm.

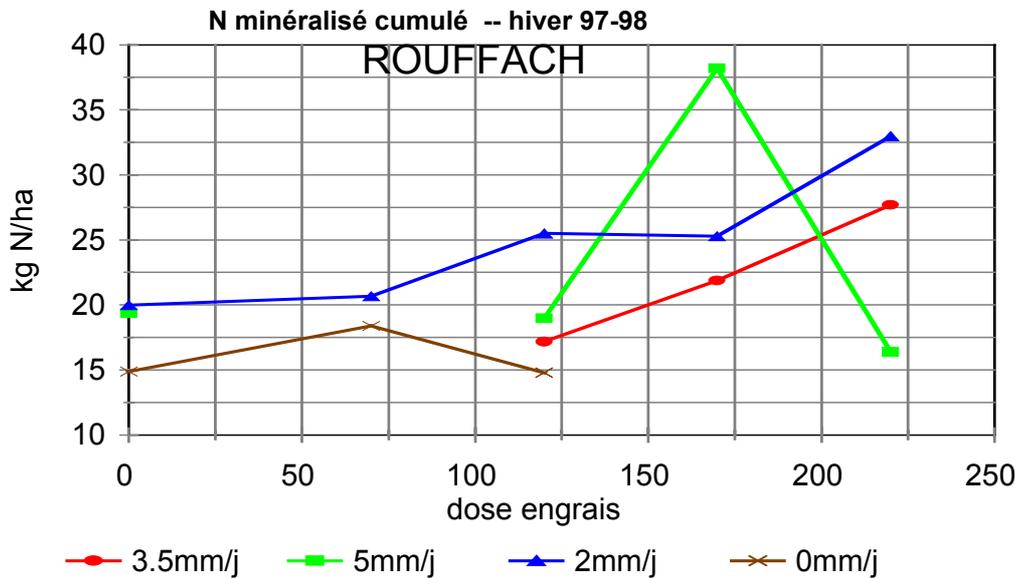
Enfin, le coefficient d'Arrhenius de température est passé de 0.115 à 0.125.

C'est avec ce nouveau fichier de paramètres (Cf Annexe 4) que la dernière simulation a été lancée et que les résultats définitifs ont été recueillis.

### **2.1.2. Résultats de simulation**

#### **2.1.2.1. Les résultats concernant l'azote minéralisé cumulé**

L'analyse des quantités d'azote minéralisé pendant la période simulée ne peut être que grossière en raison du faible nombre de dates de données. Ainsi, le graphique représente en réalité 16 droites sur lesquelles il n'est pas possible de distinguer différentes phases comme c'est le cas pour Hausen (voir plus loin). L'analyse de l'évolution dans le temps n'est donc pas possible.

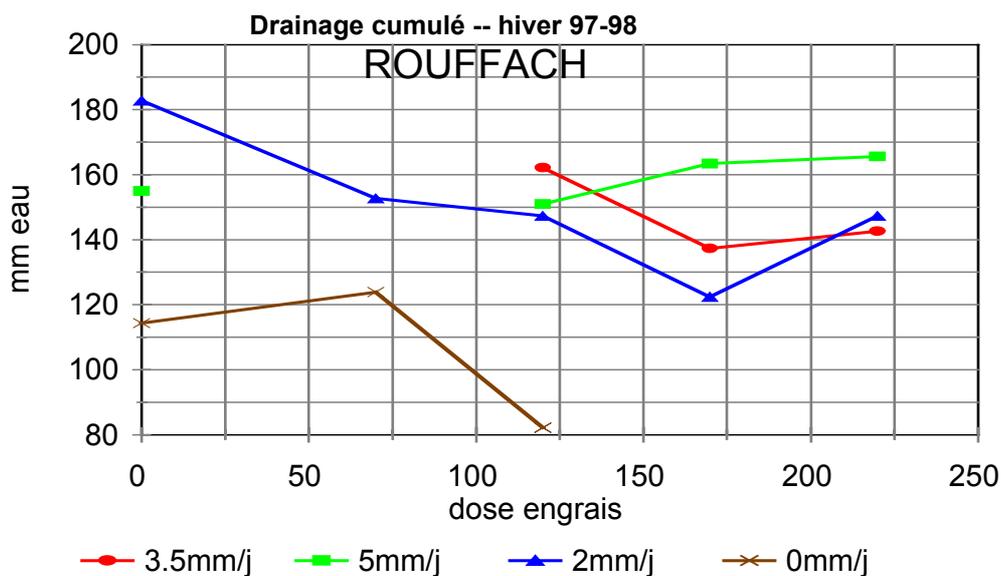


On peut toutefois noter que le niveau d'irrigation conjugué au niveau de fertilisation ne semble pas avoir d'influence sur les quantités d'azote minéralisé pendant la période. L'écart maximum relevé entre traitement est de 25 Kg NO<sub>3</sub>/ha.

### 2.1.2.2. Les résultats concernant le lessivage

Préalablement à l'analyse du lessivage à proprement parler, le drainage est un phénomène indissociable de celui du lessivage, qui doit de ce fait être analysé en parallèle.

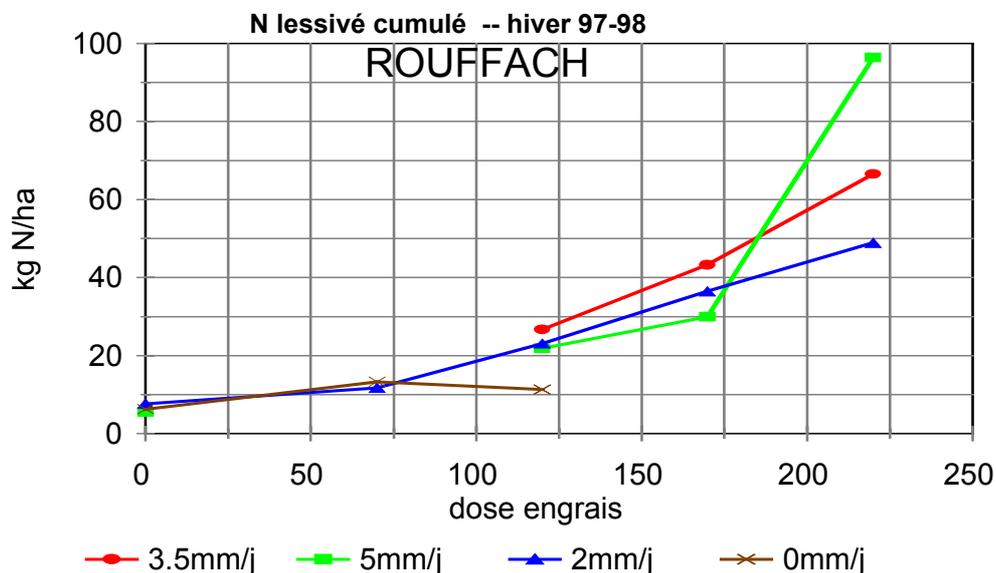
Sur le graphe représentant le drainage cumulé sur la période, il semble qu'il y ait une différence significative entre les quantités totales drainées des traitements irrigués et non irrigués. En effet, les quantités drainées du régime hydrique non irrigué sont nettement en-dessous des valeurs observées des régimes irrigués (entre 40 et 80 mm de moins). Ainsi, l'irrigation du maïs pendant la campagne favoriserait les quantités d'eau drainées pendant l'hiver.



On peut en effet penser que sous un régime irrigué, l'humidité du sol se retrouve plus tôt à la capacité au champ, comparativement à un sol qui n'a pas été irrigué, favorisant ainsi un drainage plus précoce.

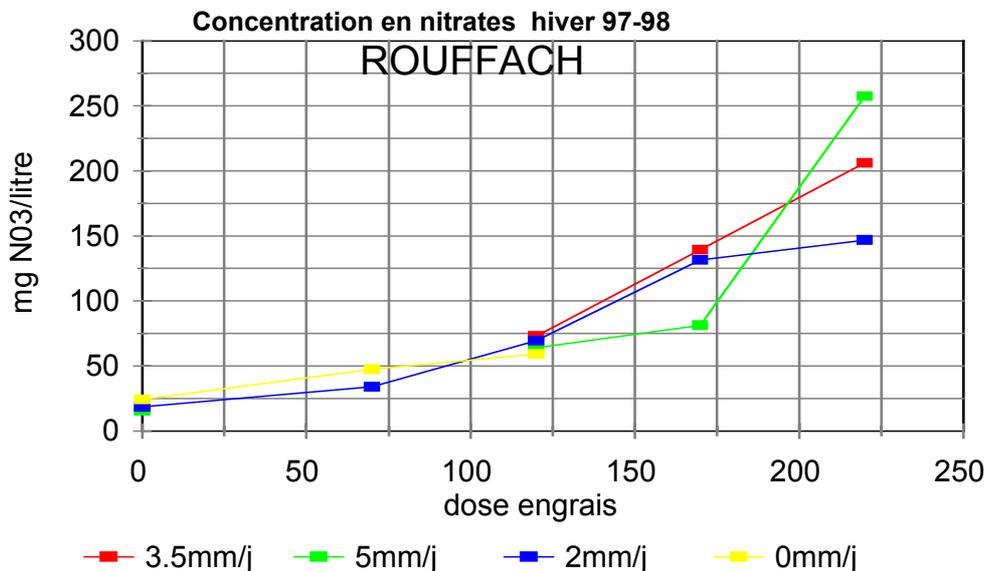
Sur le graphique représentant les quantités cumulées d'azote minéral lessivé du 8 octobre 1997 au 20 février 1998 pour les 4 régimes hydriques, on constate que pour une dose d'engrais comprise entre 0 et 170 unités (dose X), les quantités lessivées restent faibles aux alentours de **30-40 kg N /ha**, indépendamment du régime hydrique employé pour l'irrigation. Par contre, au-delà de cette dose, les quantités d'azote minéral lessivé augmentent vite, et ce d'autant plus que le dépassement de la dose X est accompagné d'un régime hydrique excédentaire comme le régime 5 mm/j. Pour ce dernier, quand il est conjugué à une dose de 220 unités, on obtient des quantités d'azote minéral lessivé proches de **100 kg N-NO<sub>3</sub>**. Il faut rajouter que les reliquats mesurés à l'automne 1997 étaient relativement importants (proche de 150 kg pour une dose de 220 kg d'engrais - voir page 55).

Ce classement des quantités lessivées cumulées entre traitements s'explique d'une part par le régime hydrique d'irrigation qui affecte le drainage, et d'autre part par les reliquats mesurés le 8 octobre qui laissent apparaître le même classement entre traitements.



**Le dépassement de la dose X (adaptée aux besoins de la plante) est donc toujours accompagné d'une augmentation des quantités de nitrates lessivées. De plus, un régime hydrique apportant de l'eau en excès pendant la période de culture constitue un facteur aggravant du lessivage pendant l'hiver.**

Le graphique page suivante présente les concentrations en nitrates (NO<sub>3</sub>) dans l'eau lessivée pendant l'hiver 97-98.



Les concentrations en nitrates, simulées par le modèle LIXIM, à Rouffach sont supérieures à la norme de potabilité de 50 mg/l dès que l'on dépasse une fertilisation azotée de 120 kg N/ha (qui était l'optimum de fumure en 1997). Jusqu'à la dose de 170 U le régime hydrique semble ne pas influencer les concentrations, mais au-delà l'écart se creuse et les concentrations en nitrates de l'eau en hiver sont d'autant plus fortes que les quantités d'eau apportées par l'irrigation sont élevées.

La tendance est la même que pour les quantités lessivées : ce sont les modalités excédentaires qui "fabriquent" une eau à 150, voire 250 mg/l de nitrates, et c'est, du moins au vu des résultats de 97/98, le facteur "dose d'azote" qui constitue le premier facteur de risque.

La modalité 170 u x 3,5 mm/j, qui correspond à une pratique courante chez les irrigants de la plaine, pose toutefois question sur le plan environnemental puisqu'elle procure, d'après le modèle, une eau fortement chargée en nitrates (140 mg/l). De telles concentrations ne sont, bien sûr, pas acceptables pour un gestionnaire de la qualité de l'eau. Il faut cependant préciser que ces résultats sont fournis par un modèle que l'on a alimenté avec les valeurs du seul hiver 97/98 (octobre 97 à février 98) et avec un nombre de données insuffisant pour apporter une réponse indiscutable. La question de la qualité de l'eau lessivée en hiver sous un champ de maïs irrigué reste posée. Un renouvellement de ce type de mesures sur plusieurs séquences climatiques devrait être poursuivi de manière à obtenir une réponse précise.

Ces résultats doivent néanmoins être considérés avec précaution car il ne s'agit que d'une année de mesures et le nombre de données qui a permis de faire tourner le modèle était limité au minimum nécessaire.

## 2.2. Simulation à HAUSEN

La simulation a pu être conduite durant trois hivers. Contrairement à l'essai de Rouffach, deux répétitions de mesures ont été effectuées, ce qui nous donne la possibilité d'introduire dans le modèle des valeurs d'écart-type de reliquats et d'humidité, augmentant de ce fait la qualité de la simulation.

### 2.2.1. Présentation sommaire de l'expérimentation de Hausen

L'expérimentation de Hausen permet le croisement de deux régimes d'irrigation et de trois niveaux de fertilisation azotée. Les 6 traitements étudiés sont présentés dans le tableau ci-dessous :

<b>Régimes non irrigués</b>	<b>0</b>	<b>T1</b>
	<b>X-20%</b>	<b>T2</b>
	<b>X</b>	<b>T3</b>
<b>Régimes irrigués</b>	<b>0</b>	<b>T4</b>
	<b>X-20%</b>	<b>T5</b>
	<b>X</b>	<b>T6</b>

Concernant le type de sol, il s'agit d'un limon-sableux, sans cailloux avec 2.8% de M.O., un pH de 5.3, une RU de 180 mm et une RFU de 120 mm. A Hausen, la teneur moyenne en nitrate de la nappe phréatique est de 22 mg NO<sup>3</sup>/litre.

#### 2.2.1.1. Conduite de la fertilisation.

La dose totale X à apporter est calculée d'après l'équation suivante :

- un premier apport, DI, de **40 kg N/ha** est réalisé au semis,
- la dose Z du 2ème apport est basée sur une équation du bilan :

$$Z = bY + 20 - R6F - D1/2 - Mh - Mr - Ma - Mci$$

avec :

**Z** = dose d'engrais minéral à apporter au 2ème apport

**b** = 2.2 kg N/q de grain

**Y** = objectif de rendement

**R6F** = quantité d'azote nitrique présent dans le sol au stade 6 feuilles du maïs

**D1/2** = moitié de la dose apportée au semis

**Mh** = minéralisation nette de l'humus

**Mr** = minéralisation nette des résidus de récolte

**Ma** = minéralisation nette des amendements organiques

**Mci** = minéralisation nette due à une culture intermédiaire.

**Ma = Mci = 0** (pas d'amendements organiques ni cultures intermédiaires).

Des tableaux mis en place après la synthèse de résultats obtenus sur plusieurs années permettent d'apprécier différents termes de l'équation précédente en fonction du type de sol considéré, de la date de mesure du reliquat et du type de maïs (ensilage ou grain).

A Hausen, on a :

Minéralisation nette de l'humus (Mh) : **40 kg N/ha.**

Minéralisation nette des résidus de récolte (Mr) : **10 kg N/ha.**

L'objectif de rendement à Hausen est de **120 quintaux** et le reliquat d'azote nitrique dans le sol au stade 6 feuilles est de **30 kg N/ha.**

Dans ces conditions, la dose Z d'engrais à apporter lors du 2ème apport est de 180 unités. Par conséquent, la dose X totale d'engrais à apporter est de **220 unités.**

### 2.2.1.2. Conduite de l'irrigation

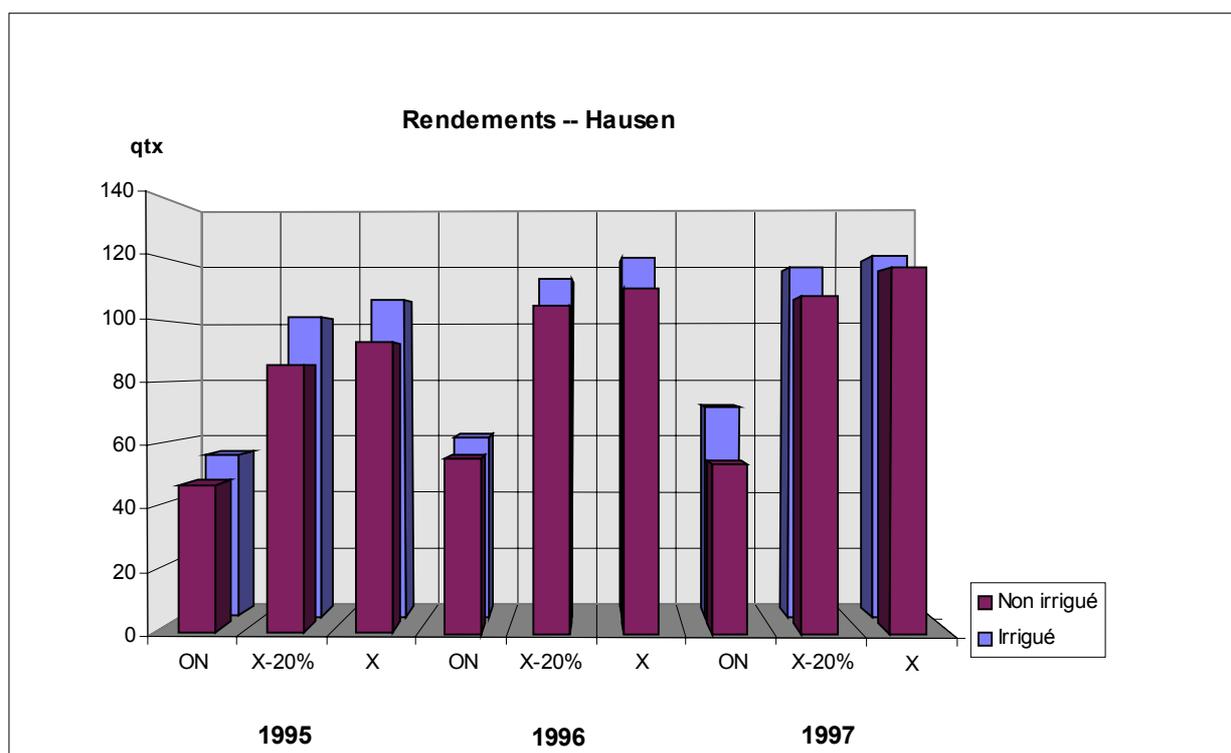
Description du régime hydrique irrigué lors des 3 années 1995, 1996, 1997 :

	Nbre d'irrigations	Dose totale	mm d'irr/j	mm de P+I/j
1995	4	80 mm	3 mm/j	4.4 mm/j
1996	3	80 mm	1.34 mm/j	1.9 mm/j
1997	3	115 mm	5.6 mm/j	5.9 mm/j

Dates des irrigations :

1995	1996	1997
13/7/95	26/7/96	13/8/97
20/7/95	5/8/96	19/8/97
28/7/95	9/8/96	27/8/97
3/8/95		

L'irrigation est conduite grâce au suivi de l'évolution de la RU : l'irrigation est déclenchée lorsque la réserve en eau du sol n'est plus que de 50% de la RU et l'irrigation est stoppée lorsque la réserve en eau du sol dépasse 80% de la RU.



## 2.2.2. Calage du modèle

### 2.2.2.1. Hiver 1995-96

La simulation a été réalisée avec 11 dates de mesures, permettant ainsi une précision beaucoup plus importante que celle que l'on avait en ce qui concerne Rouffach. La simulation débute 15 jours après la récolte de 95 et s'arrête 13 jours avant le semis de 1996. 28 jours de lessivage potentiel ne sont donc pas pris en compte par la simulation, il faudra en tenir compte pour la suite.

Trois simulations successives ont été lancées :

Une première simulation a été lancée avec des paramètres initiaux. Celle-ci a montré deux valeurs aberrantes d'humidité. Elle en outre mis en évidence une légère surestimation des valeurs d'humidité sur 0-30 cm et une légère sous-estimation sur 30-60 cm. Enfin, les valeurs de reliquats de l'horizon 30-60 cm étaient légèrement surestimées.

De ce fait, les valeurs d'humidité à la capacité au champ ont été modifiées : 27 au lieu de 29 sur l'horizon 0-30 cm ; 22.5 au lieu de 22 sur 30-60 cm, et 18.5 au lieu de 18 sur 60-90 cm. De plus, l'épaisseur de la couche minéralisante est passée de 35 à 30 cm dans le fichier de paramètres. La deuxième simulation ne présentait pas de surestimation ou de sous-estimation des valeurs d'humidité ou des quantités d'azote minéral.

La troisième simulation a consisté à imposer les valeurs moyennes de coefficients culturaux relevés entre les traitements. En effet, toutes les simulations depuis le début ont été réalisées avec des valeurs de coefficients culturaux ajustées par le modèle. Ces valeurs ont donc été relevées et une moyenne a été calculée entre les différents traitements, ces moyennes ont ensuite été réinjectées dans le modèle. Voici le tableau de ces coefficients culturaux :

	20/11	5/12	19/12	4/1	30/1	14/2	28/2	13/3	26/3	11/4
<b>T1</b>	0.05	0.05	0.05	0.05	1	1	0.98	0.93	0.55	0.48
<b>T2</b>	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.38	0.84	0.88	0.57	0.51
<b>T3</b>	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.66	1	0.96	0.46	0.38
<b>T4</b>	0.05	0.05	1	0.07	1	0.26	0.5	0.93	0.28	0.45
<b>T5</b>	1	0.05	0.05	0.05	1	1	0.75	0.93	0.51	0.42
<b>T6</b>	1	0.05	0.05	0.05	0.94	0.9	0.89	0.97	0.48	0.4
<b>Moyenne</b>	0.37	0.05	0.21	0.05	0.67	0.7	0.83	0.93	0.48	0.44

Au vu des différences importants jusqu'au 30 janvier 1996 entre les traitements (0.05 étant la valeur seuil minimale et 1 étant celle maximale), les valeurs moyennes ont été imposées au modèle à partir du 14 février.

Les résultats de cette dernière simulation sont très peu différents de la précédente, sans amélioration visible.

Dans l'ensemble, peu de différences entre valeurs observées et simulées sont à remarquer (Cf Annexe 5).

Enfin, les données météorologiques nécessaires pour l'élaboration du fichier climatique de LIXIM proviennent du poste météorologique de Meyenheim (en France), distant d'une trentaine de kilomètres de Hausen.

#### 2.2.2.2. Hiver 1996-97

La simulation a été réalisée avec 13 dates de mesures. Elle débute 2 jours après la récolte de 96 et s'arrête 3 jours avant le semis de 1996. On peut donc considérer que la simulation du lessivage englobe toute la période pendant laquelle le sol est nu.

La démarche concernant la simulation est la même que précédemment, les mêmes paramètres ont été conservés.

Dans l'ensemble, peu de différences entre valeurs observées et simulées sont à remarquer (1 seule donnée paraissait aberrante).

### 2.2.2.3. Hiver 1997-98

La simulation a été réalisée avec 11 dates de mesures. Elle débute le jour de la récolte en 97 et s'arrête 2 jours avant le semis de 1998. On peut donc considérer que la simulation du lessivage englobe toute la période d'interculture.

La démarche concernant la simulation est la même que précédemment, les mêmes paramètres ont été conservés.

Dans l'ensemble, peu de différences entre valeurs observées et simulées sont à remarquer (pas de valeur aberrante).

### 2.2.3. Les résultats de simulation

#### 2.2.3.1. Hiver 1995-96

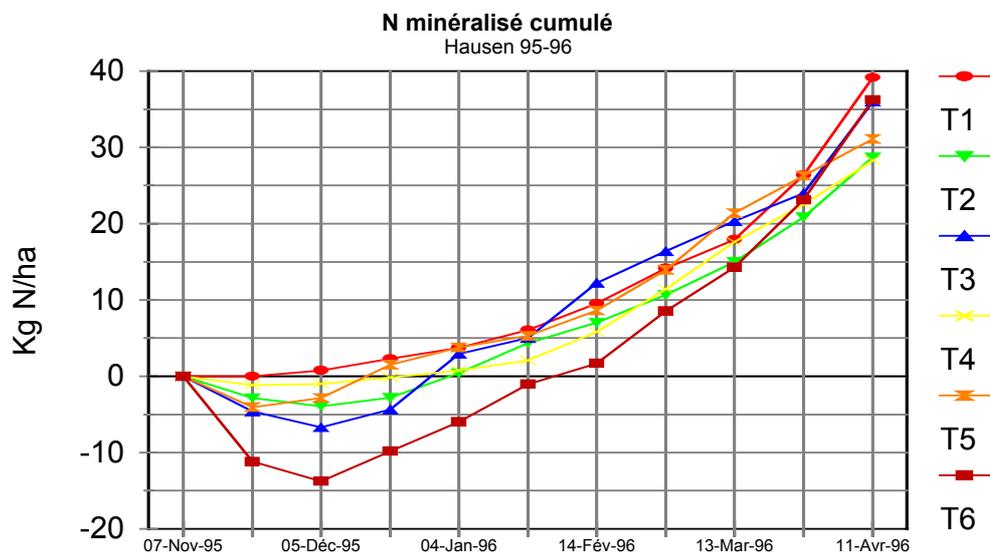
##### 2.2.3.1.1. Les résultats concernant l'azote minéralisé cumulé

Les 6 courbes des traitements restent assez groupées avec des écarts maximums de 15 Kg N/ha que l'on note début décembre. Pour la majorité des traitements, la courbe de l'azote minéralisé cumulé passe par des valeurs négatives lors d'une première phase de novembre à janvier, traduisant ainsi l'effet de l'organisation de l'azote minéral par les micro-organismes. Cette phase d'organisation est plus ou moins marquée pour les traitements, elle n'est pas visible pour le traitement 1 et très nette et plus étalée dans le temps pour le traitement 6 (jusqu'à 13 kg d'azote organisé). Ce phénomène peut s'expliquer par les quantités plus ou moins importantes de cannes de maïs restituées à la parcelle par enfouissement. En effet, le traitement 1 permet d'obtenir un rendement de 46 qx, alors que le traitement 6, un rendement de 107 qx, aussi les quantités de biomasse enfouies dans la parcelle sont plus importantes pour le traitement 6. De même, le traitement 4 qui a permis d'obtenir un rendement de 55 qx a une phase d'organisation très limitée en intensité et dans le temps.

Traitements		Rendements (qx/ha)
<b>T1</b>	N.I. - ON	<b>46</b>
T2	N.I. - X-20%	86
T3	N.I. - X	93
<b>T4</b>	I - ON	<b>55</b>
T5	I - X-20%	102
<b>T6</b>	I - X	<b>107</b>

N.I. : Non irrigué      I : Irrigué

Les différences observées des quantités d'azote minéral dans le sol lors de cette phase d'organisation s'estompent cependant fin janvier -début février. A partir de cette date, les quantités d'azote minéralisé depuis la récolte sont semblables entre les traitements. Ainsi, l'intensité de la phase d'organisation semble « stimuler » la phase de minéralisation suivante.

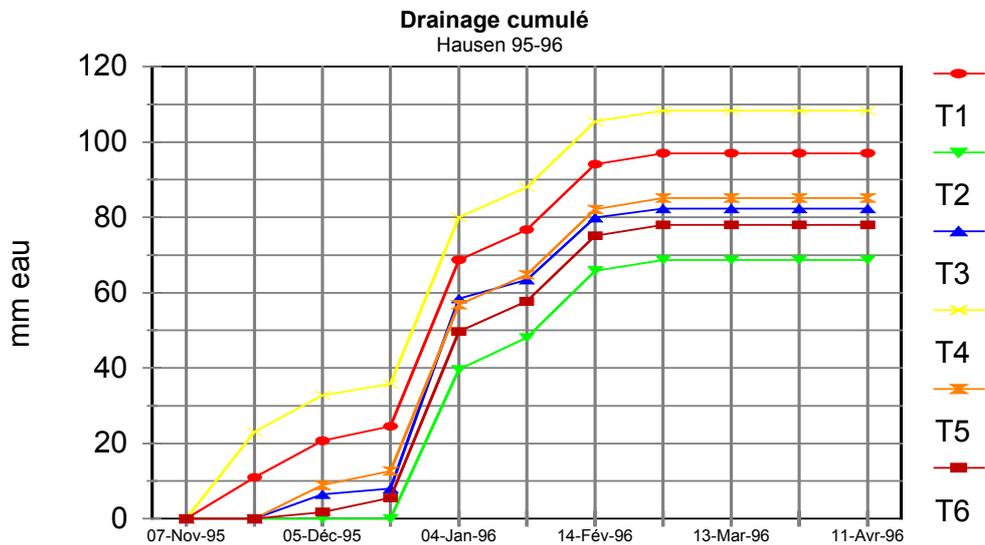


La phase d'organisation est suivie d'une phase de minéralisation d'autant plus intense que l'a été la phase d'organisation. Ainsi, le traitement 6 pour lequel la phase d'organisation est la plus marquée connaît également la phase de minéralisation la plus intense avec une pente moyenne la plus élevée à partir de début Décembre. Ainsi, pendant l'hiver se constitue un « pool » d'azote organique plus important qui relâchera plus d'azote minéral quand les conditions climatiques du printemps seront favorables à la minéralisation.

L'effet couplé de l'irrigation et de la fertilisation azotée n'est qu'indirect sur les quantités d'azote minéralisé. Ces modalités d'irrigation et de fertilisation agissent par les plus ou moins bons rendements obtenus pendant la campagne. Ainsi, dans de bonnes conditions de développement du maïs, l'objectif de rendement est atteint et la quantité de biomasse enfouie après la récolte entraîne une phase d'organisation d'autant plus intense que les quantités enfouies sont importantes. Cependant, au total sur toute la période d'interculture, les quantités d'azote minéralisé sont semblables entre traitements grâce à une phase de minéralisation qui semble « compenser » les effets de la phase d'organisation.

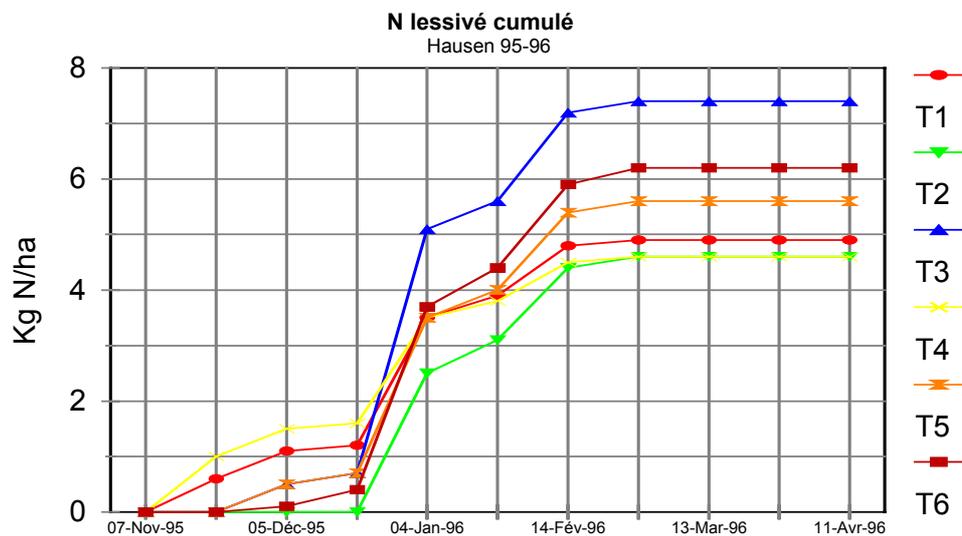
#### 2.2.3.1.2. Les résultats concernant le lessivage

Concernant les quantités drainées sur la période d'interculture, des différences restant faibles sont observées du 7 novembre au 19 décembre, après quoi, les 6 courbes sont quasiment parallèles jusqu'au semis suivant. En effet, alors que les parcelles des traitements 1 et 4 (témoins ON) drainent dès le début (respectivement 25 et 35 mm jusqu'au 19 décembre), la parcelle du traitement 2 ne draine pratiquement pas pendant toute cette période, les autres sont intermédiaires mais drainent peu.



Le sol restant nu pendant toute la période, l'évaporation et les précipitations sont les mêmes entre les parcelles des différents traitements, ce qui signifie que les différences de drainage observées sont la conséquence de profils d'humidité dans le sol différents à la récolte. Ainsi, les parcelles des traitements T4 et T1 seraient à la capacité au champ dès début novembre, contrairement aux parcelles des autres traitements. T4 et T1 étant les deux traitements 0 N, on peut penser que les biomasses produites pendant la campagne étant faibles (46 et 55 qx), limitent ainsi l'absorption d'eau par les plantes ainsi que leur transpiration. Par conséquent, contrairement aux traitements azotés favorables au bon développement du maïs, les traitements T1 et T4 permettent un drainage plus précoce de la parcelle.

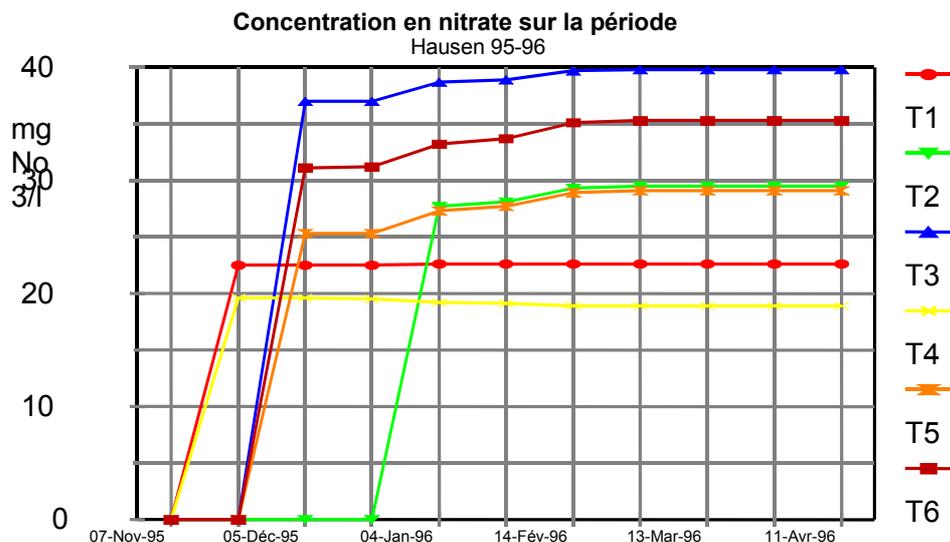
Au total sur la période, on note un écart maximum de 40 mm d'eau drainée entre les traitements. Les quantités drainées restent faibles (autour de 100 mm), ce qui est à mettre en relation avec les précipitations faibles pendant l'hiver de cette année (164 mm en 6 mois).



Très globalement sur l'hiver, les quantités d'azote simulées lessivées sont très faibles, quel que soit le traitement : inférieures à 10 kg/ha. Ces quantités lessivées très faibles s'expliquent par le drainage peu important qu'on observe cette année.

En 95-96, c'est le traitement 3 qui favorise le plus le lessivage, puis le traitement 6, les autres traitements montrent des quantités lessivées similaires. Les deux traitements 3 et

6 sont ceux qui emploient la dose d'engrais la plus élevée. Cependant, les quantités lessivées ne sont supérieures que de 3 ou 4 Kg à celles observées pour les traitements n'ayant reçu aucun engrais. Il est difficile de comparer les traitements entre eux, vu les quantités lessivées infimes.



Les concentrations en nitrate de l'eau lessivée observées depuis le 7 novembre sont stables très tôt : fin novembre, début décembre. A partir de cette date, elles ne varient pratiquement plus jusqu'au semis prochain. **Globalement sur toute la période d'interculture, pour une même dose d'engrais apporté à la parcelle, les concentrations en nitrate de l'eau lessivée sont plus fortes quand le maïs n'a pas été irrigué.** Le facteur déterminant de la concentration en nitrate reste toutefois la dose apportée puisque le classement suit exactement les quantités d'engrais apportées.

Les concentrations moyennes en nitrate de l'eau s'exportant de la parcelle qui a reçu un maïs, fertilisé avec la dose X, restent en dessous de 40 mg NO<sub>3</sub>/l, même lorsque ce maïs n'a pas été irrigué.

### 2.2.3.2. Hiver 1996-97

#### 2.2.3.2.1. Les résultats d'azote minéralisé cumulé

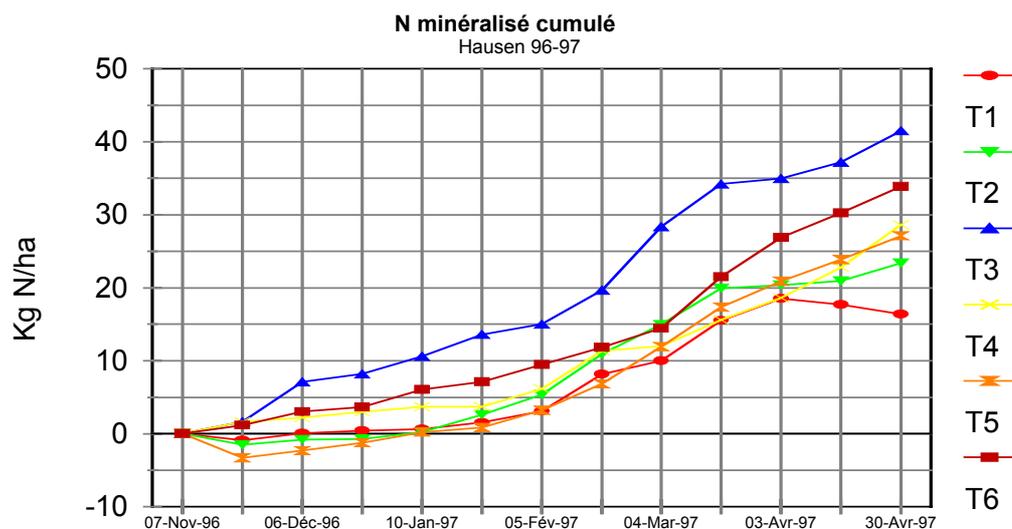
La phase d'organisation bien marquée en 95-96 est très peu marquée en 96-97 : seuls 1 à 3 kg d'azote sont organisés pour 3 traitements. Ci-dessous, les rendements obtenus en 1996 :

Traitements		Rendements (en quintaux)
T1	N.I. - ON	56
T2	N.I. - X-20%	104
T3	N.I. - X	109
T4	I - ON	61
T5	I - X-20%	114
T6	I - X	121

Le profil des courbes et la hiérarchie entre les traitements ne sont pas les mêmes qu'en 95/96 mais globalement, il y a peu de différences entre les traitements.

L'organisation, très faible cette année, ne semble pas être liée aux quantités de biomasse enfouies après récolte. On peut penser que l'effet d'une teneur en azote des cannes plus importante que l'année précédente a conduit à un rapport C/N plus faible

après l'enfouissement des cannes de maïs et par conséquent à une organisation moins marquée.

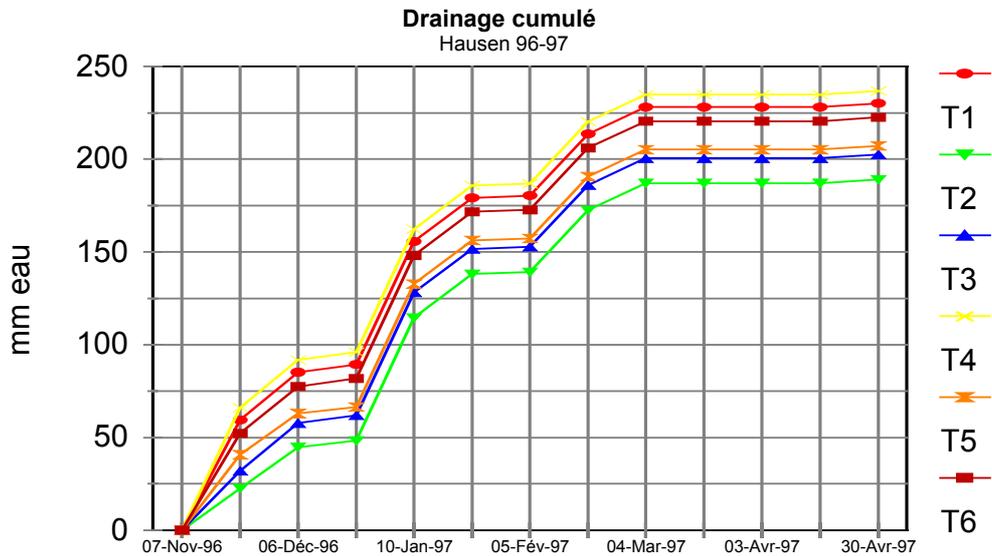


Malgré une légère baisse d'azote minéralisé cumulé pour le traitement 1 début avril, les courbes d'évolution semblent similaires pour les différents traitements, ce qui amène à dire que les pratiques de fertilisation et d'irrigation pendant la campagne du maïs n'ont pas d'effet sur la cinétique de minéralisation dans le sol pendant l'hiver.

#### 2.2.3.2.2. Les résultats concernant le lessivage

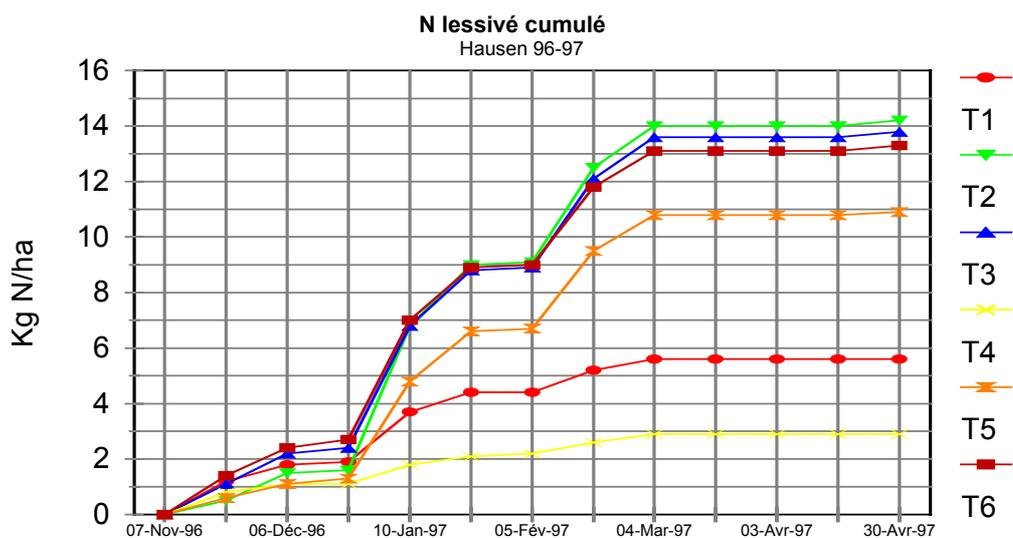
◆ Les quantités drainées pendant l'interculture sont plus importantes que l'année précédente : 306 mm de pluies au total, contre 164 mm en 95-96. A partir de début mars, les parcelles ne drainent plus. Au total sur toute la période, on note un écart maximum de 50 mm d'eau drainée entre les traitements 4 et 2 pour un drainage cumulé total aux environs de 220 mm, traitements confondus.

Comme pour l'année précédente, le drainage est plus important pour les traitements des témoins non fertilisés (T1 et T4) mais les différences entre traitements sont nettement moins marquées. L'importance des pluies a gommé la différence entre traitements.



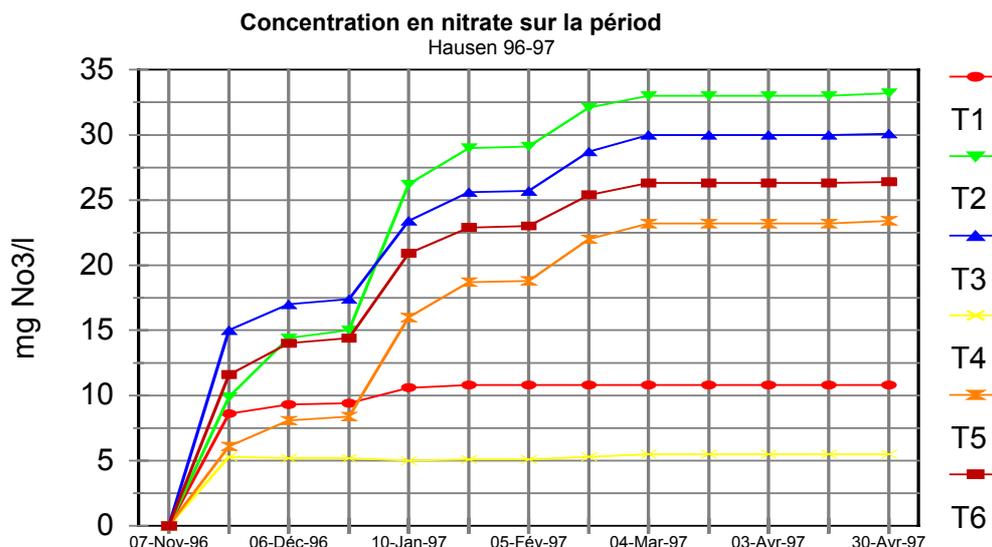
◆ Concernant le lessivage, les différences entre traitements trop infimes pour être analysé l'année précédente sont plus marquée en 96-97. Pour une même dose d'engrais apporté, les quantités d'azote minéral lessivé sont plus importantes quand le maïs n'a pas été irrigué. Ainsi, une bonne alimentation en eau du maïs pendant son cycle lui permet de mieux valoriser l'azote mis à sa disposition et limite les quantités d'azote lessivé pendant l'hiver. La parcelle qui a reçu un maïs non irrigué, fertilisé avec une dose X-20.% de 175 unités (T2) indique des quantités lessivées semblables à celles d'une parcelle ayant reçu un maïs fertilisé avec la dose X de 220 unités (T6) mais **irrigué** : l'irrigation a ainsi permis au maïs d'utiliser 44 unités d'azote de plus pour produire 17 qx de plus à la récolte sans augmenter les quantités lessivées pendant l'hiver suivant.

Même quand la parcelle n'est pas fertilisée, l'irrigation permet à la plante de mieux valoriser l'azote des fournitures du sol (le témoin non irrigué fait des rendements supérieurs au témoin non irrigué) et ainsi d'obtenir des quantités d'azote minéral lessivé plus faibles pendant l'interculture.



Les concentrations en nitrate de l'eau lessivée depuis le 7 novembre restent stables à partir de début Mars jusqu'au semis. Les différences entre traitements sont plus nettes qu'en 95-96. On retrouve le même classement des traitements que pour les quantités

lessivées, avec des concentrations moyennes en nitrate sur toute la période allant de 5 mg NO<sub>3</sub>/l pour T4 à 33 mg NO<sub>3</sub>/l pour T2.



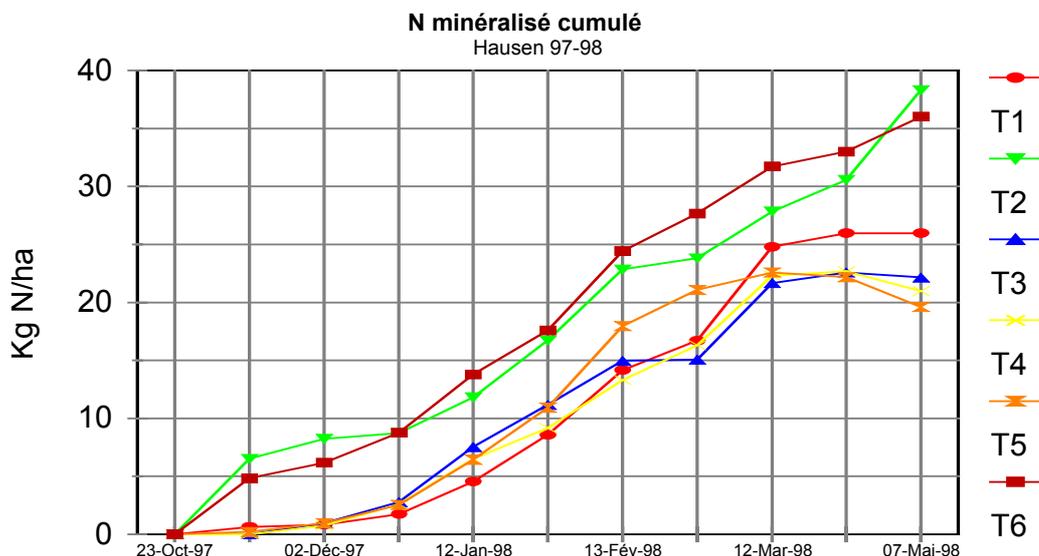
### 2.2.3.3. Hiver 97-98

#### 2.2.3.3.1. Les résultats d'azote minéralisé cumulé

Contrairement aux deux autres années, la phase d'organisation en début de période est totalement absente. On peut l'expliquer comme en 96 par le possible effet d'une teneur en azote des cannes de maïs plus élevée qu'en 1995. Ci-dessous, les rendements de 1997 :

Traitements		Rendements (en quintaux)
T1	N.I. - ON	54
T2	N.I. - X-20%	107
T3	N.I. - X	116
T4	I - ON	71
T5	I - X-20%	118
T6	I - X	122

Les cinétiques de minéralisation semblent être semblables entre traitements jusqu'à la mi-mars où l'on observe une divergence entre les 6 courbes. Cette diminution de l'azote minéralisé, visible seulement pour le traitement 1 en 96-97, est observée pour les traitements 3, 4 et 5 en 97-98. Alors qu'il y a toujours une minéralisation prédominante pour les traitements 2 et 6, le cumul d'azote minéral stagne pour le traitement 1 et diminue pour les traitements 3, 4 et 5.



Ces cinétiques d'évolution du cumul d'azote minéral différentes à partir de mi-mars ne semblent pas être dues aux pratiques de fertilisation et d'irrigation pendant la campagne précédente. On peut émettre l'hypothèse que certaines conditions (celles des traitements 3, 4 et 5) sont favorables à des pertes d'azote minéral par dénitrification. Ces différences observées entre traitements ne peuvent s'expliquer que par l'hétérogénéité des parcelles (conditions d'aération, densité apparente...).

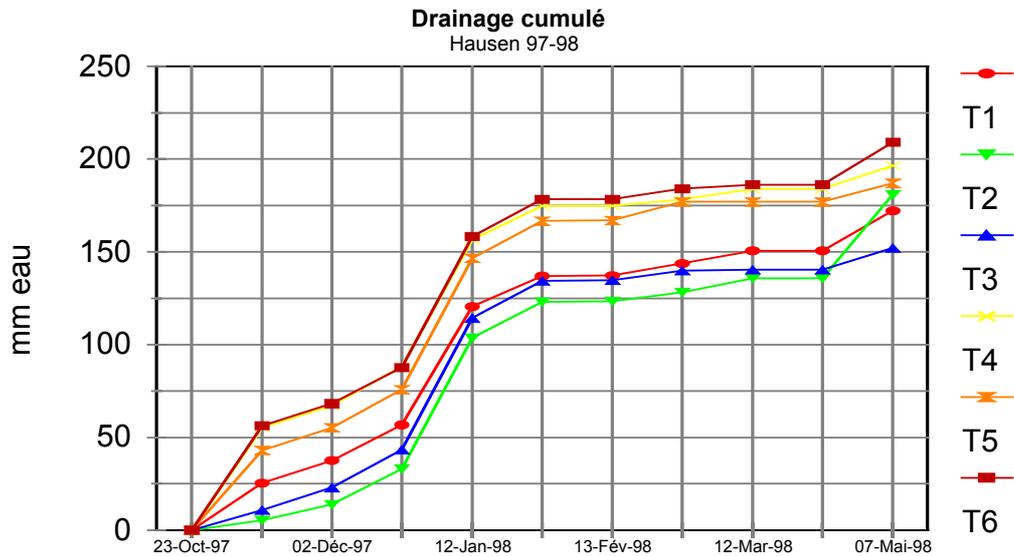
Les pertes d'azote minéral observées pour un traitement en 96-97 et pour 3 traitements pendant l'hiver 97-98 pourraient être dues à des différences importantes de températures entre les trois années. Voici les précipitations cumulées en mm ainsi que les sommes de températures moyennes du 5/11 au 24/4 de chaque hiver :

	Pluviométrie cumulée	Températures moyennes cumulées
Hiver 95-96	<b>164 mm</b>	<b>182</b>
Hiver 96-97	<b>306 mm</b>	<b>553</b>
Hiver 97-98	<b>332 mm</b>	<b>658</b>

Ainsi, des températures élevées pendant la fin de l'hiver et le début du printemps pourraient favoriser des pertes d'azote minéral par dénitrification lorsque les conditions pédologiques sont favorables (parcelles des traitements 3, 4 et 5 en 97-98).

#### 2.2.3.3.2. Les résultats concernant le lessivage

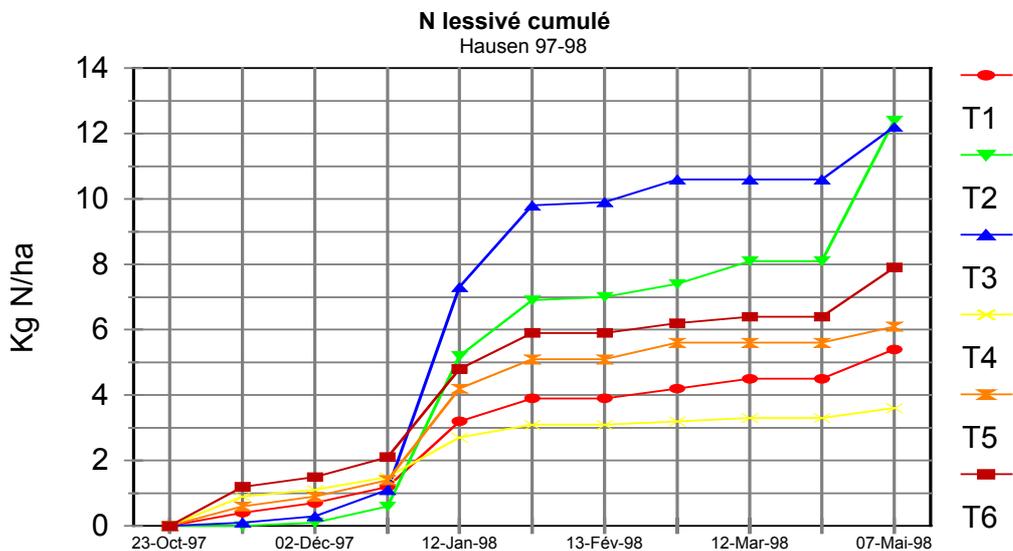
♦ **Les quantités d'eau drainées** sur toute la période sont proches de celles observées en 96-97. Ceci peut s'expliquer par des précipitations de même importance les deux années (310 mm en 96-97 et 330 mm en 97-98).



Excepté pour la période juste après la récolte pour laquelle on observe des différences entre traitements comme les deux autres années, les courbes sont quasiment parallèles et on ne peut pas mettre en évidence un quelconque effet traitement sur les différences d'intensité de drainage. Contrairement aux deux autres années, les différences observées en début de période font apparaître un classement différent des traitements : les parcelles des 3 traitements irrigués (T4, T5 et T6) drainent des quantités d'eau plus importantes que les parcelles des traitements non irrigués (T1, T2 et T3). On peut penser qu'en raison d'un été 97 plus sec que les deux années précédentes, même dans une parcelle non fertilisée propice à une absorption en eau par la plante plus faible, le sol est plus asséché au moment de la récolte que le sol des parcelles irriguées, ce qui amène un classement entre traitements différent des deux autres années.

Au total sur toute la période, l'écart maximum relevé entre traitement est de 60 mm pour des quantités totales drainées de l'ordre de 180 mm.

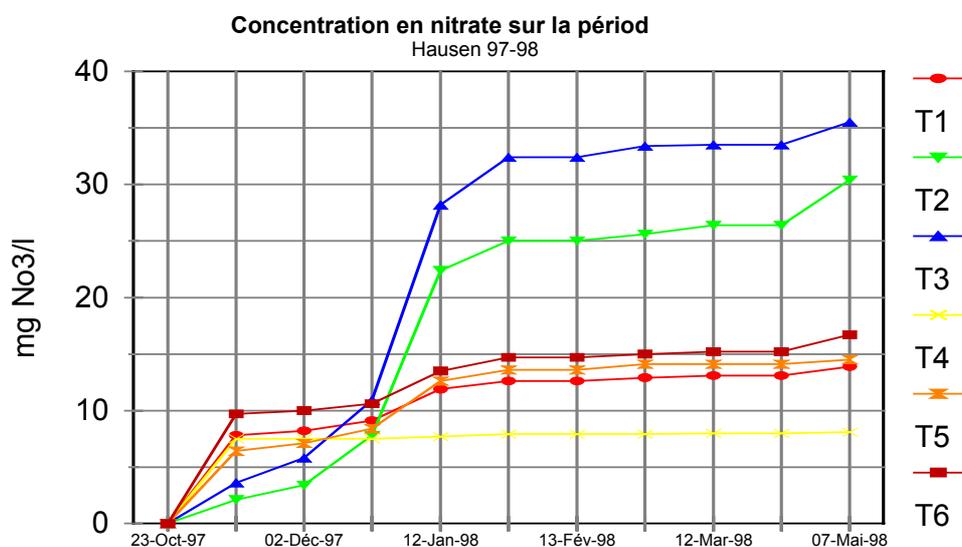
◆ **Pour les quantités d'azote lessivées**, les différences entre traitements sont nettes. On retrouve les deux traitements non irrigués (dose X et X-20%) en tête des quantités lessivées avec environ 12 kg N/ha. Secondairement, on note les traitements 6 et 5 (irrigués avec dose X et X-20%) avec 8 et 6 kg N/ha. Enfin, les quantités lessivées les moins importantes se retrouvent pour les deux traitements non fertilisés avec moins de 5 kg N/ha pour les deux régimes hydriques.



On peut noter une forte augmentation des quantités lessivées entre les deux dernières dates que l'on explique par des précipitations importantes et une période plus longue (150 mm du 25 mars au 7 mai).

Comme le laissent supposer les résultats des deux années précédentes, les traitements qui n'ont pas apporté d'eau pendant la période de culture favorisent nettement le lessivage : même avec 20 unités d'azote épandu en moins, les quantités lessivées sont plus importantes quand il s'agit d'un traitement non irrigué. Ainsi, l'eau d'irrigation apportée à bon escient favorise l'absorption de l'azote minéral par la culture et permet de ce fait d'obtenir des reliquats post-récolte moins importants, et donc un lessivage des nitrates nettement atténué.

**L'irrigation adaptée aux besoins hydriques du maïs limite donc la pollution nitrique par lessivage.**



Comme l'indique le graphique ci-dessus, les modalités fertilisées et non irriguées libèrent des concentrations plus importantes que les autres traitements.

Les concentrations en nitrates dans l'eau lessivée restent du même ordre de grandeur que celles des deux premières années et toujours inférieures à 40 kg NO<sub>3</sub>/litre d'eau.

## **Conclusion : Récapitulation des résultats de Hausen et Rouffach**

L'analyse des résultats de simulation de Hausen permet d'observer un effet du régime hydrique sur la cinétique de minéralisation de l'azote après la récolte par une phase d'organisation de l'azote d'autant plus marquée que les quantités de biomasse enfouies au moment de la récolte sont importantes. Cependant, pas d'effet du régime hydrique sur les quantités totales d'azote minéralisé pendant toute la période d'interculture.

Le régime hydrique semble influencer les quantités drainées en début de période (le premier mois suivant la récolte) par deux phénomènes. D'une part, en favorisant la croissance du maïs, le régime hydrique permet à la plante d'absorber des quantités d'eau plus importantes et peut donc conduire à un épuisement de la réserve en eau du sol plus important au moment de la récolte. C'est ce que l'on peut penser en observant les résultats de Hausen en 95 et en 96 de manière moins marquée. D'autre part, le régime hydrique peut influencer directement le drainage grâce à des valeurs d'humidité du sol au moment de la récolte plus importantes dès que l'apport d'eau est supérieur aux besoins de la plante, c'est l'hypothèse que l'on peut avancer en observant les résultats de

Rouffach et de Hausen en 97-98. Globalement, les différences entre traitements des quantités totales drainées sur toute la période d'interculture ont un écart maximum de 40 à 50 mm.

Les résultats obtenus pour Rouffach et pour Hausen permettent de mettre en évidence un effet significatif couplé de la fertilisation et de l'irrigation sur les quantités d'azote lessivé ainsi que sur les concentrations en nitrate. Globalement à Hausen sur les trois années, on retrouve le même classement des **quantités d'azote lessivé** en fonction des traitements :

	Hiver 95-96	Hiver 96-97	Hiver 97-98	Global
+ ↓		T2	T2=T3	N.I. - X-20%
	T3	T3		N.I. - X
	T6	T6	T6	I - X
	T5	T5	T5	I - X-20%
	T1	T1	T1	N.I. - ON
	T4 = T2	T4	T4	I - ON

Seul le traitement T2 en 95-96 ne concorde pas avec les résultats des deux autres années à cause d'un drainage très tardif après la récolte de 95.

Les résultats concernant les **concentrations moyennes en nitrate de l'eau** lessivée sous la parcelle pendant toute la période d'interculture montrent un classement des traitements similaire à Hausen :

	Hiver 95-96	Hiver 96-97	Hiver 97-98
+ ↓	T3	T2	T3
	T6	T3	T2
	T2	T6	T6
	T5	T5	T5
	T1	T1	T1
	T4	T4	T4

A Hausen, quel que soit le traitement considéré, on n'obtient jamais des concentrations en nitrate supérieure à 40 mg/l.

D'après le modèle LIXIM, mis en œuvre avec les données de Hausen, les traitements sans apport d'eau pendant la période de culture favorisent les pertes en azote par lessivage et procurent globalement une eau plus riche en nitrates que des traitements qui apportent l'eau dont la culture a besoin. Les plantes se développent en puisant dans la solution du sol le plus possible de nitrates. Ces résultats vont dans le même sens pendant deux années climatiques différentes, 96/97 et 97/98, mais sont plus nettement marquées en 97/98.

A Rouffach, le même modèle indique que dès que la dose d'azote raisonnée est dépassée, le régime hydrique intervient aussi. Ce résultat doit être considéré avec précaution puisque l'utilisation de LIXIM à Rouffach, n'a pu se faire que sur les mesures d'une seule année et avec un nombre de données limité, donnant donc des résultats contestables sur le plan méthodologique.

## Rentabilité économique de l'irrigation à Rouffach et Hausen

Une évaluation rapide et approximative de la rentabilité de l'irrigation peut être réalisée pour les 2 situations étudiées, qui se caractérisent par un sol à réserve utile relativement forte.

Sur les 3 années d'expérimentation, bien différenciées du point de vue climatique, le gain moyen de rendement permis par l'irrigation par rapport aux traitements non irrigués est de :

- + 27.4 q/ha à Rouffach
- + 11.2 q/ha à Hausen

Si l'on considère un prix moyen du quintal de maïs à 70 F , et que l'on tient compte de la différence moyenne de 96 à 98 entre la prime PAC pour un maïs irrigué et celle d'un maïs en sec, soit 479 F/ha,

On a un produit supplémentaire de :

- + 2397 F à Rouffach
- + 1263 F à Hausen

De ce produit il faut déduire les charges de structure liées à l'irrigation. Celles-ci sont bien sûr variables, mais en moyenne pour la petite région de la Hardt elles s'élèvent en 98 à 1350 F/ha (données du Centre de Gestion du Haut-Rhin).

Si l'on prend cette base pour notre calcul, il reste à l'agriculteur irrigant :

- 2397 – 1350 = + 1047 F/ha à Rouffach
- 1263 – 1350 = - 87 F/ha à Hausen

Le niveau de charges est probablement surévalué dans ces situations à bonne réserve utile, en particulier pour Hausen.

Mais même si l'on estime les charges à 1000 F/ha, la rentabilité de l'irrigation se pose nettement à Hausen. En effet, il ne faut pas oublier que le bénéfice dégagé doit servir à rémunérer la main d'œuvre (installation du matériel, déplacement du canon etc...) dont il est difficile d'estimer le coût mais qui n'est pas négligeable compte tenu parfois de la pénibilité du travail.

En outre, il existe des coûts fiscaux et sociaux supplémentaires, qui seront d'autant plus importants que les résultats sont importants (impôts et cotisations sociales). Dès lors, on peut également se poser la question de la rentabilité de l'irrigation à Rouffach.

Les chiffres moyens ci-dessus sont indicatifs. Une analyse annuelle sur 2 années bien différenciées sur le plan de la pluviométrie comme 96, année humide, et 98, année sèche, permet de mieux cerner la notion de rentabilité :

L'exemple est calculé sur les résultats de Rouffach où en moyenne l'irrigation est plus rentable qu'à Hausen et parce que les données économiques proviennent d'exploitations alsaciennes.

Les différences de rendement permises par l'irrigation sont celles des modalités :  
120 kg/ha N x 3.5 mm/j. Pour 96, les charges sont estimées à 1000 F au lieu de 1350 F.

Année	Différence de rendement permise par l'irrigation	Surplus prime PAC	Produit supplémentaire	Solde
1996	13.4 q	391 F	1329 F	+ 329 F
1998	49.8 q	562 F	4048 F	+ 2698 F

Ce calcul, basé sur les références acquises dans l'essai de Rouffach, illustre très bien la différence de rentabilité de l'irrigation en fonction de la pluviométrie estivale. En année humide l'irrigation est peu, voire pas rentable dans ce type de sol, mais elle le devient nettement en année sèche.

Les agriculteurs qui s'équipent en matériel d'irrigation dans ces sols assez profonds jouent la sécurité du rendement et estiment qu'ils risquent de perdre plus à ne pas irriguer une année sèche qu'à irriguer et ne rien gagner en année humide.

## CONCLUSION GENERALE

### **Dose d'azote et régime hydrique conseillés en sol profond de la Plaine Rhénane :**

Pour élaborer un rendement et procurer un revenu à l'agriculteur, le maïs a besoin d'azote et d'eau.

Ces deux facteurs de production sont étroitement liés. Sans azote, le rendement est fortement pénalisé. Sans eau, le maïs ne valorise pas l'azote qui se trouve à sa disposition dans le sol (minéralisation + engrais) et le risque de lessivage hivernal des reliquats de nitrates est aggravé.

En revanche, quand la dose d'azote fournie à la culture dépasse largement ses besoins, celle-ci est en partie perdue car l'engrais excédentaire ne permet pas d'augmenter le rendement au delà d'un optimum. C'est une perte économique, mais aussi un risque pour l'environnement car l'azote non consommé sera lessivé vers la nappe phréatique. Bien que la combinaison 170 unités x 2 mm/j paraisse la mieux adaptée pour des années moyennes sur le plan climatique comme 1997 et humides comme 1996, cette combinaison apparaît cependant limitante lors d'années sèches comme 1998. Afin de réduire au maximum les coûts des charges d'exploitation, tout en assurant un rendement convenable, la combinaison **170 unités x 3.5 mm/j** s'avère être la mieux adaptée au contexte pédoclimatique de la région de Rouffach (117 q obtenus avec 170 x 3.5 mm/j en 98).

Quand la dose d'azote est ajustée, une sous-irrigation aggrave le risque de lessivage hivernal des nitrates comme le montrent les résultats de Hausen fournis par le modèle LIXIM.

A Rouffach, les résultats contestables sur le plan méthodologique (modèle non calé suite à un nombre de mesures trop faible), fournis par LIXIM posent néanmoins la question de la qualité de l'eau qui percole en hiver sous un champ de maïs irrigué. Le lessivage estival reste, quant à lui, très limité quelle que soit la modalité appliquée.

On peut raisonnablement estimer qu'avec une dose d'azote ajustée aux besoins de la culture et avec une irrigation bien pilotée, on aboutit à un optimum économique et une situation acceptable pour l'environnement. Ceci mérite cependant d'être encore mieux précisé.

Cependant, tous les maïs irrigués de la plaine du Rhin ne font pas l'objet d'un raisonnement aussi pointu au niveau des deux intrants, azote et eau, et l'expérimentation conduite dans le cadre de ce projet n'apporte pas de réponses pour les terres plus légères et plus filtrantes de la Hardt superficielle.

La solution minimale passerait sans doute par une intensification du conseil qui existe déjà à travers les messages Ferti-Mieux et les avertissements irrigation, mais probablement aussi par un équipement plus important des agriculteurs en outils de pilotage ou par une adaptation du matériel d'irrigation.

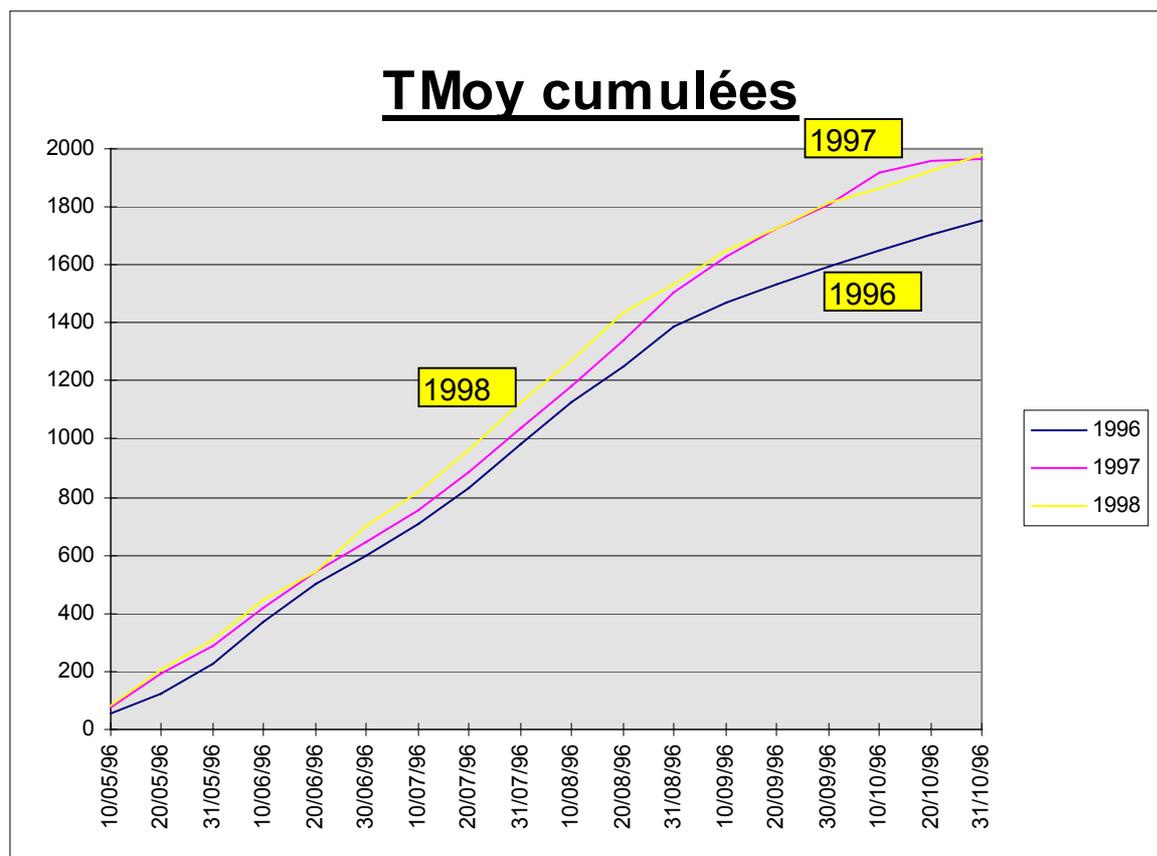
# ANNEXE 1

## Les températures moyennes cumulées

01/05/96	30/09/96	1588 °C
01/05/96	31/10/96	1748 °C
01/05/97	30/09/97	1800 °C
01/05/97	31/10/97	1956 °C
01/05/98	30/09/98	1784 °C
01/05/98	31/10/98	1952 °C

Le tableau ci-dessus montre pour chaque période du 1/5 au 30/9 et du 1/5 au 31/10 les sommes de températures moyennes supérieures à 6°C écartées à 30 pour les trois années 96, 97 et 98.

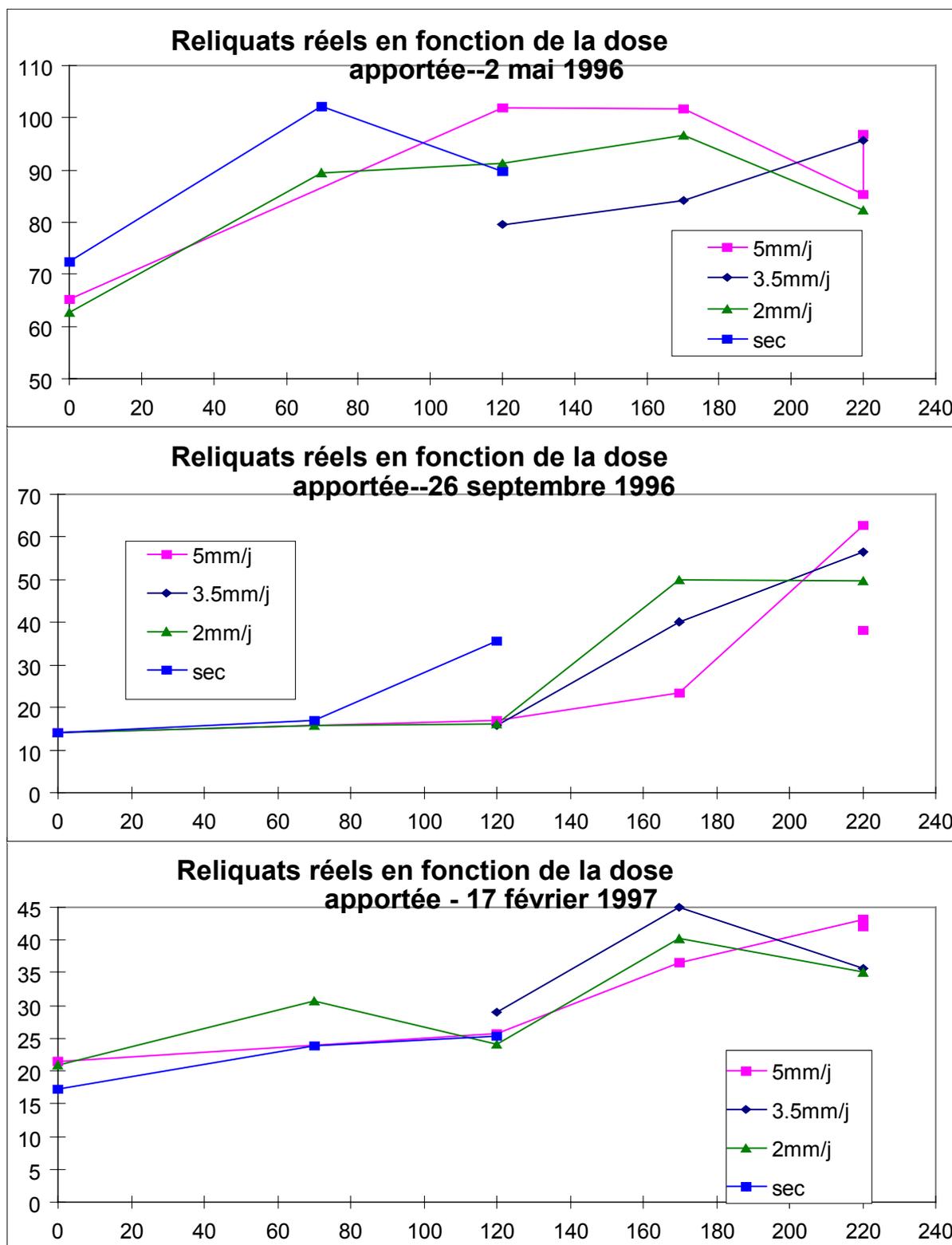
Le graphique ci-dessous représentent les valeurs cumulées de sommes de températures moyennes classiques :  $(T_{\max} + T_{\min})/2$  du 10/5 au 31/10 de chaque année.



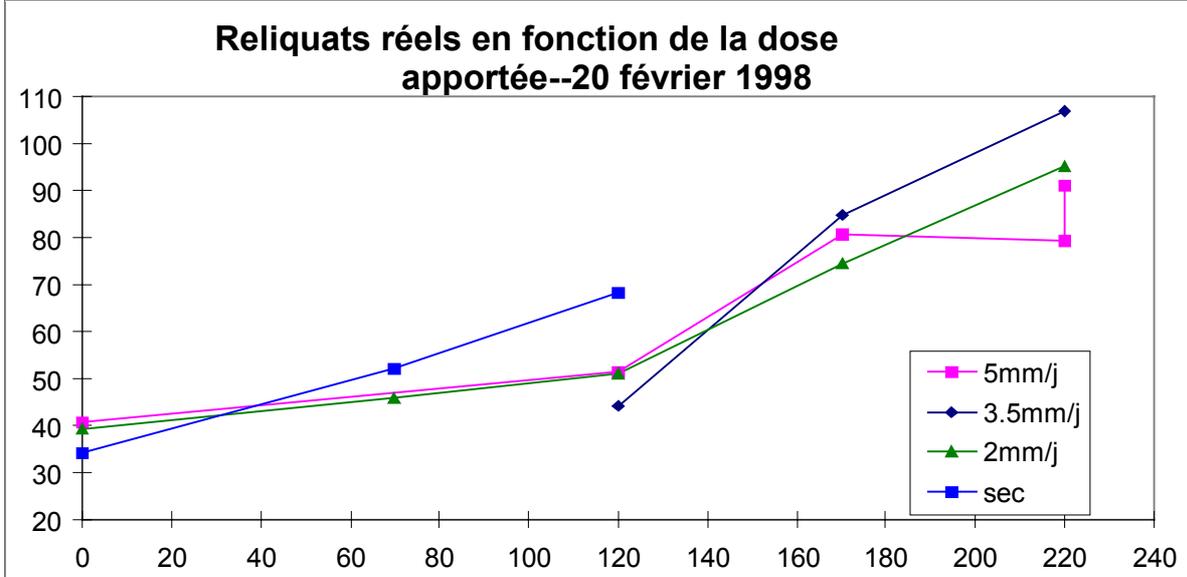
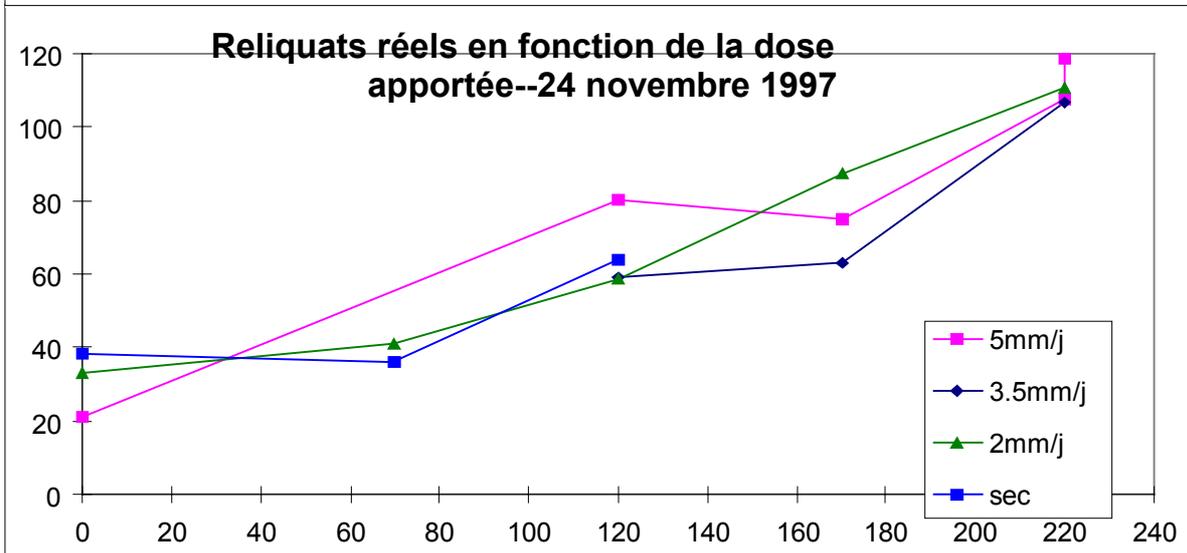
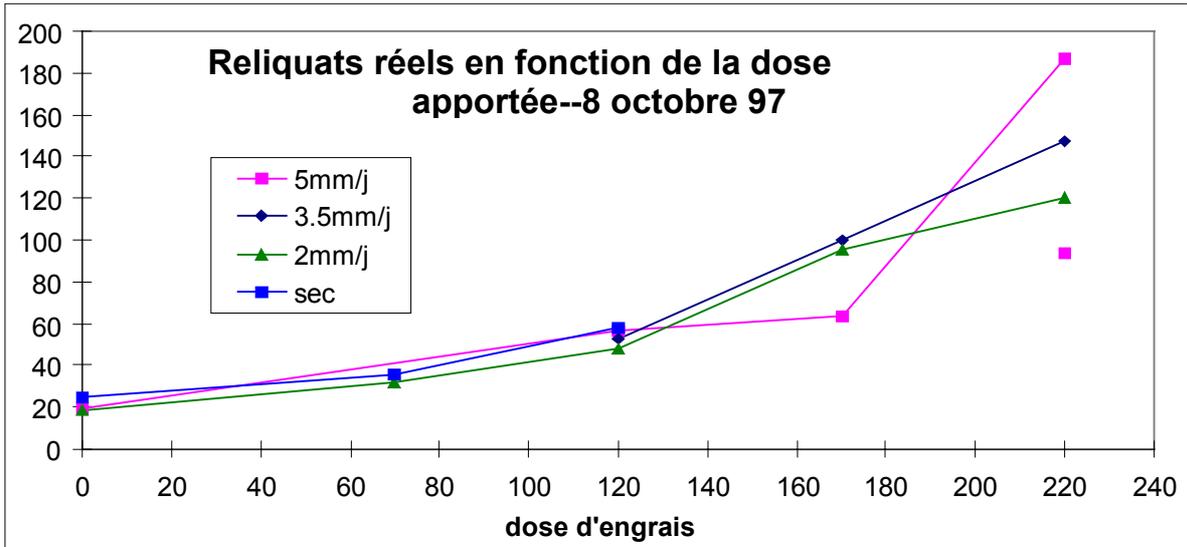
# ANNEXE 2

## Les reliquats d'azote minéral dans le sol à Rouffach

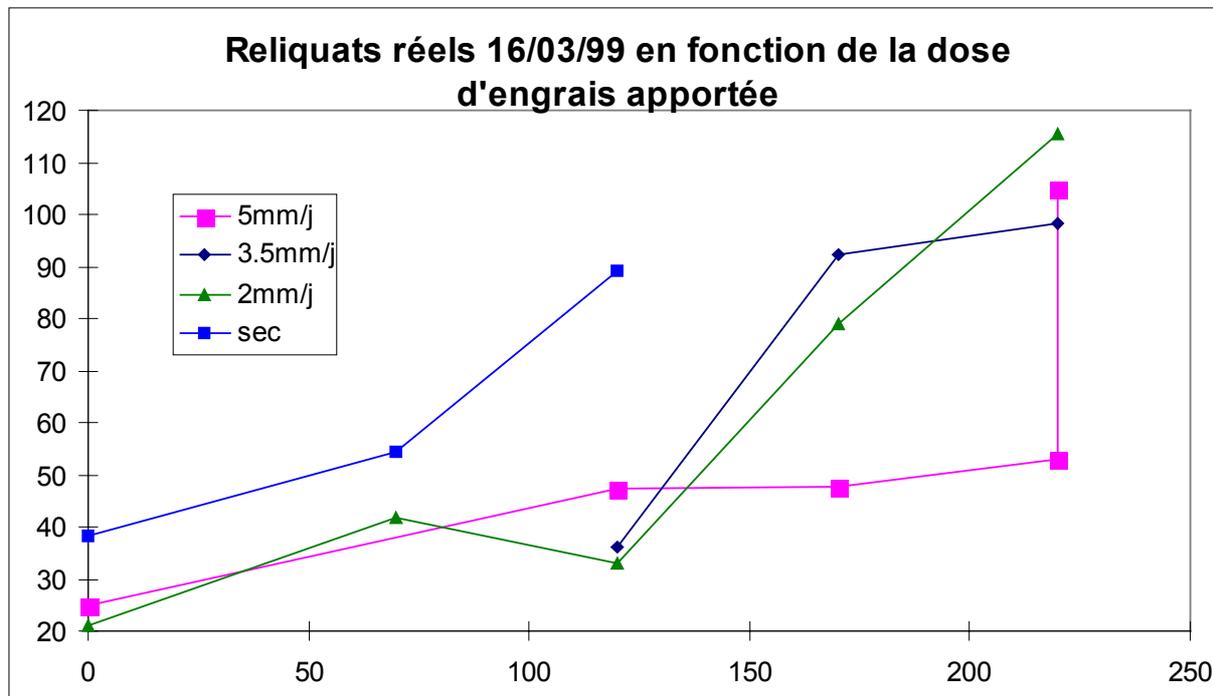
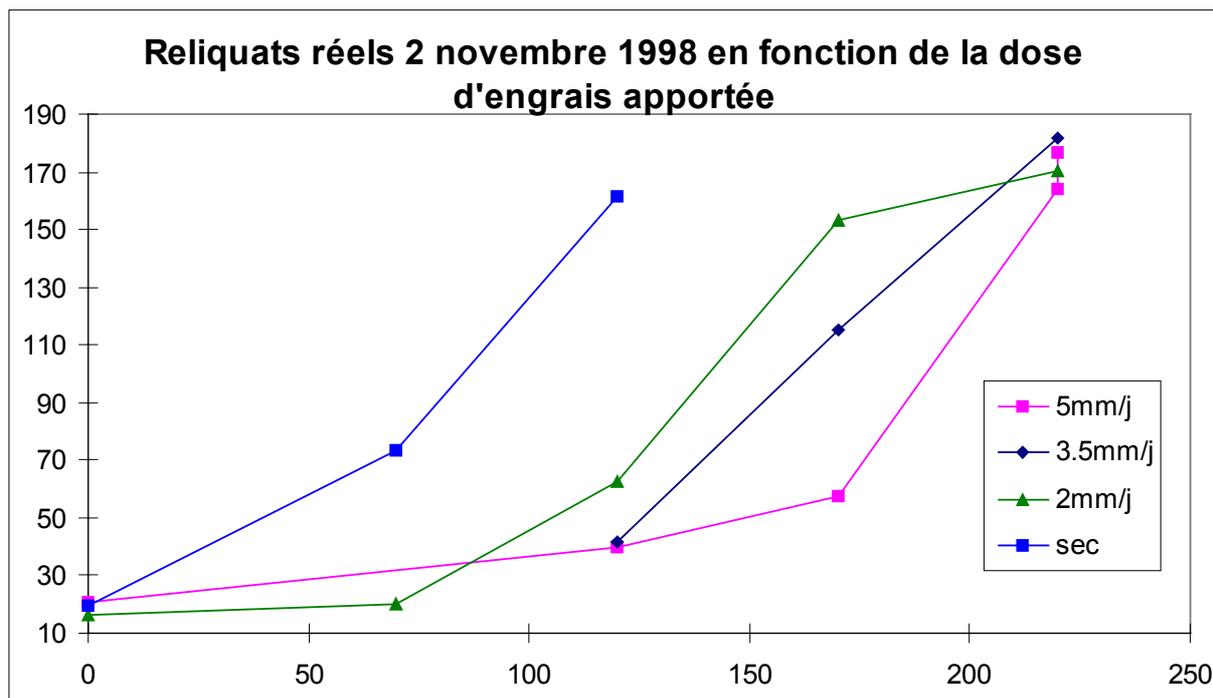
1996



1997



1998

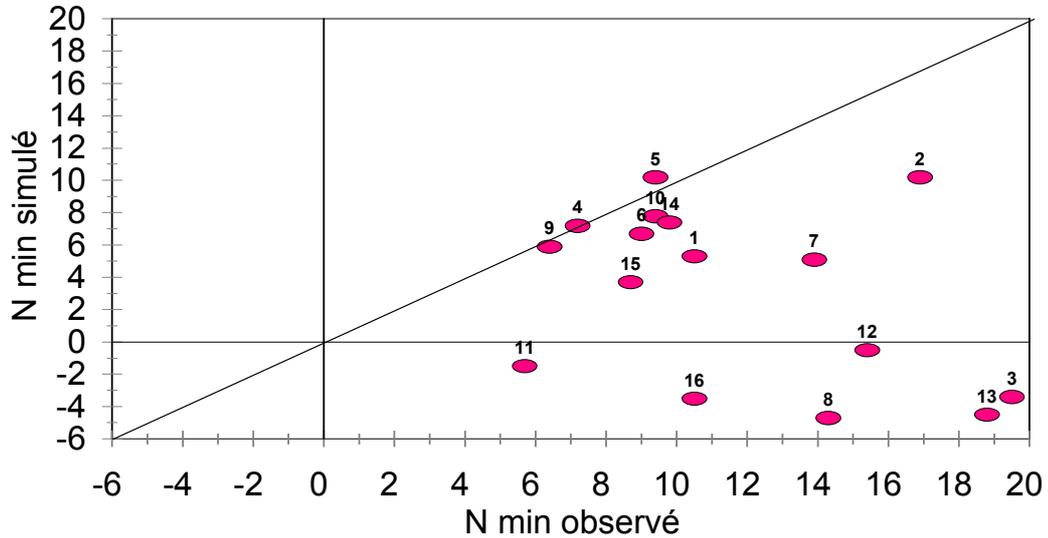


# ANNEXE 3

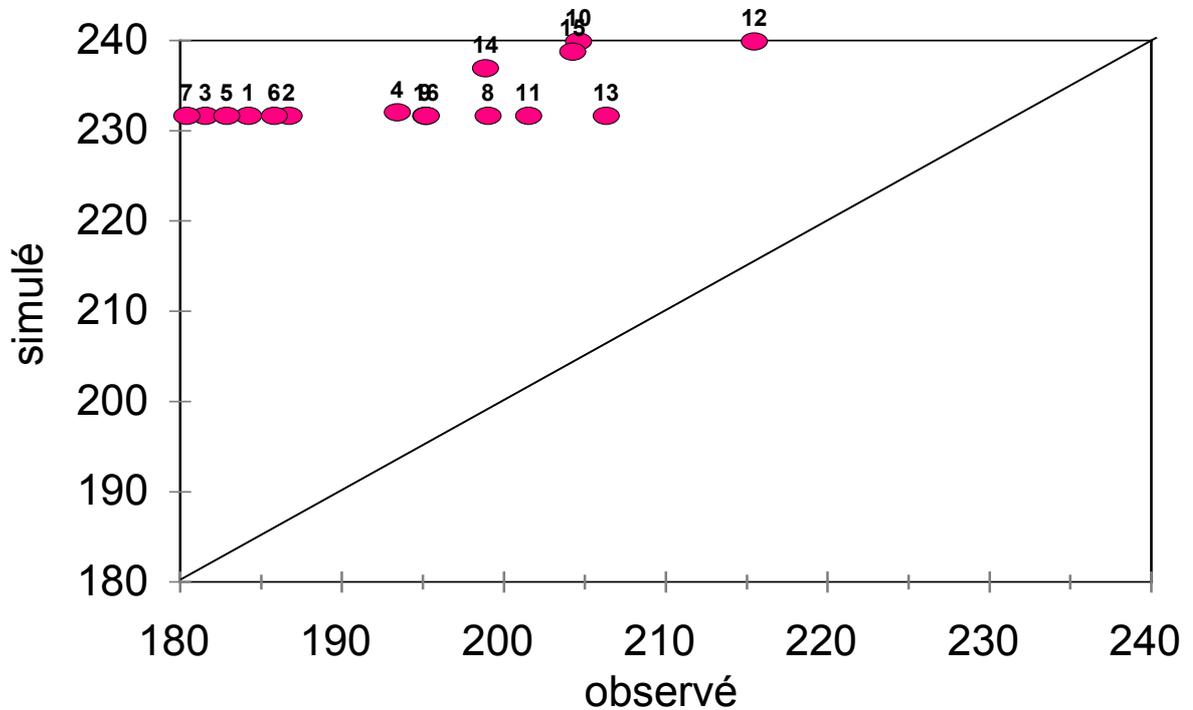
## LIXIM -- Simulation 98-99 -- Rouffach

Ci-dessous, deux graphiques de comparaison entre les valeurs simulées et observées : on note des différences importantes qui, rajoutées au faible nombre de date de données (seulement 2) compromettent la précision des résultats.

**N min 0-30 - Rouffach**



**Stock d'eau 0-90 Rouffach**



# ANNEXE 4

## LIXIM -- Fichiers de paramètres

Trois fichiers d'entrée sont nécessaires pour faire tourner LIXIM : un fichier climatique, un fichier de données (Confert Annexe 25) et un fichier de paramètres.

Voici les deux fichiers de paramètres concernant la simulation de Rouffach et de Housen. Il s'agit des fichiers finaux après corrections apportées. Le fichier de paramètres de Housen a servi pour les simulations des trois années.

### **ROUFFACH.**

Nombre d'intervalles de calcul (1 ou 2)  
2  
Coefficient d'Arrhenius de temperature : valeur nominale 0.115  
0.125  
Temperature de reference : valeur nominale 15  
15  
Taux de mineralisation a l'humidite minimale : valeur nominale 0.20  
0.20  
Mode de calcul du profil initial : homogene par horizon (0) ou spline (1)  
1  
Facteur de ponderation sur l'humidite de la premiere couche (1 a 8)  
3  
Epaisseur de la couche evaporante (cm) : valeur nominale 60  
60  
Coefficient puissance de decroissance de l'evaporation : valeur nominale 2  
1.  
Epaisseur de la couche mineralisante (cm) : valeur nominale 35  
30  
Concentration moyenne de l'eau de pluie (mgN/l) : valeur nominale 2.0  
2.0  
Nombre de colonnes du fichier (-2, 2, 3, 4, 5 ou 6)  
3  
Fraction mobile d'eau  
1.00

### **HAUSEN**

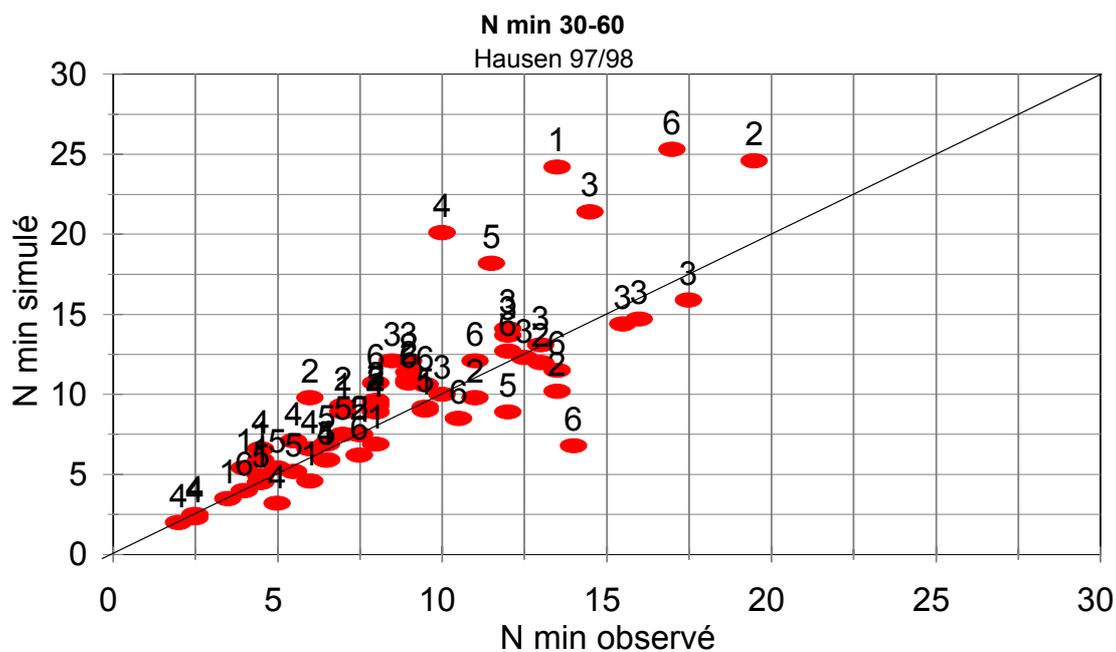
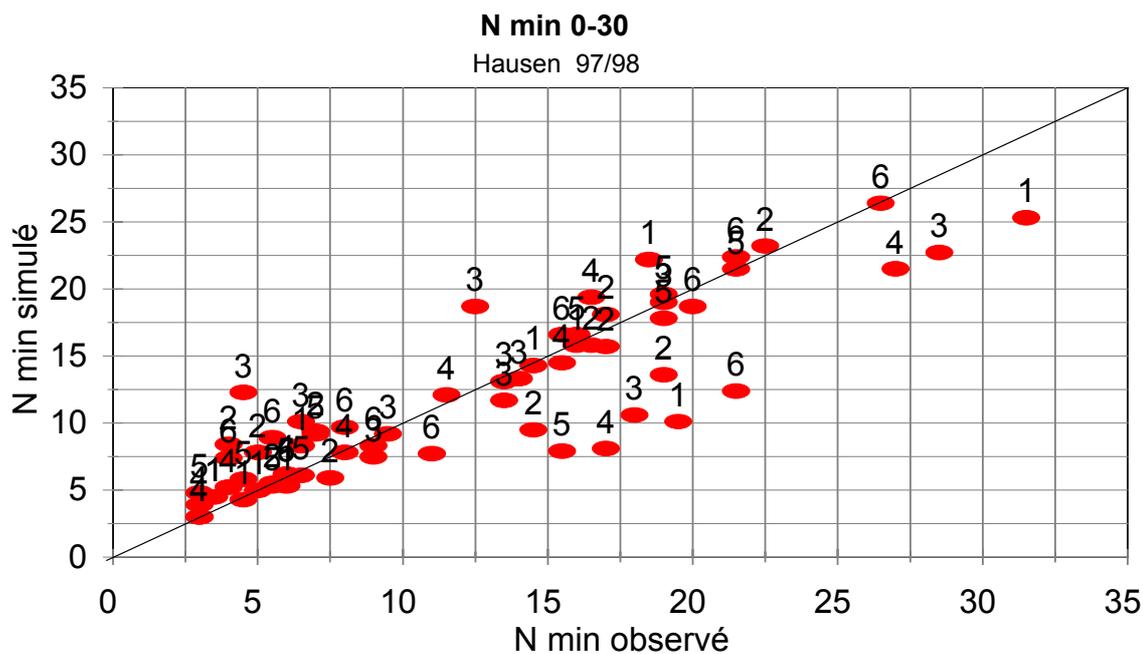
Nombre d'intervalles de calcul (1 ou 2)  
2  
Coefficient d'Arrhenius de temperature : valeur nominale 0.115  
0.115  
Temperature de reference : valeur nominale 15  
15  
Taux de mineralisation a l'humidite minimale : valeur nominale 0.20  
0.20  
Mode de calcul du profil initial : homogene par horizon (0) ou spline (1)  
1  
Facteur de ponderation sur l'humidite de la premiere couche (1 a 8)  
2  
Epaisseur de la couche evaporante (cm) : valeur nominale 60  
60  
Coefficient puissance de decroissance de l'evaporation : valeur nominale 2  
2.  
Epaisseur de la couche mineralisante (cm) : valeur nominale 35  
30  
Concentration moyenne de l'eau de pluie (mgN/l) : valeur nominale 2.0  
2.0  
Nombre de colonnes du fichier (-2, 2, 3, 4, 5 ou 6)  
4  
Fraction mobile d'eau 1.00

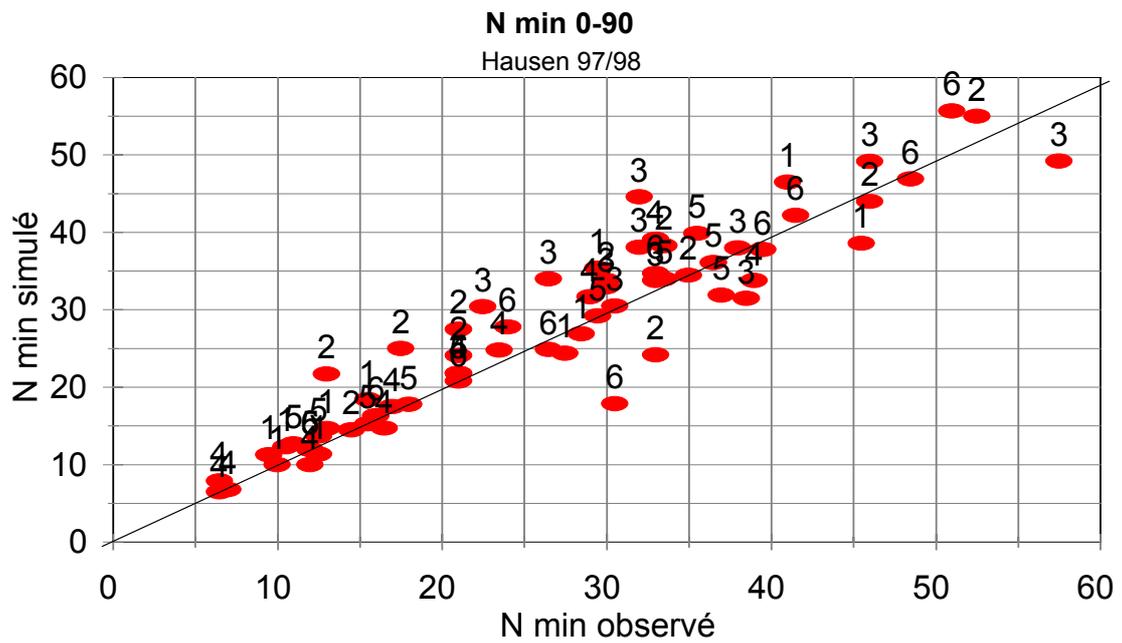
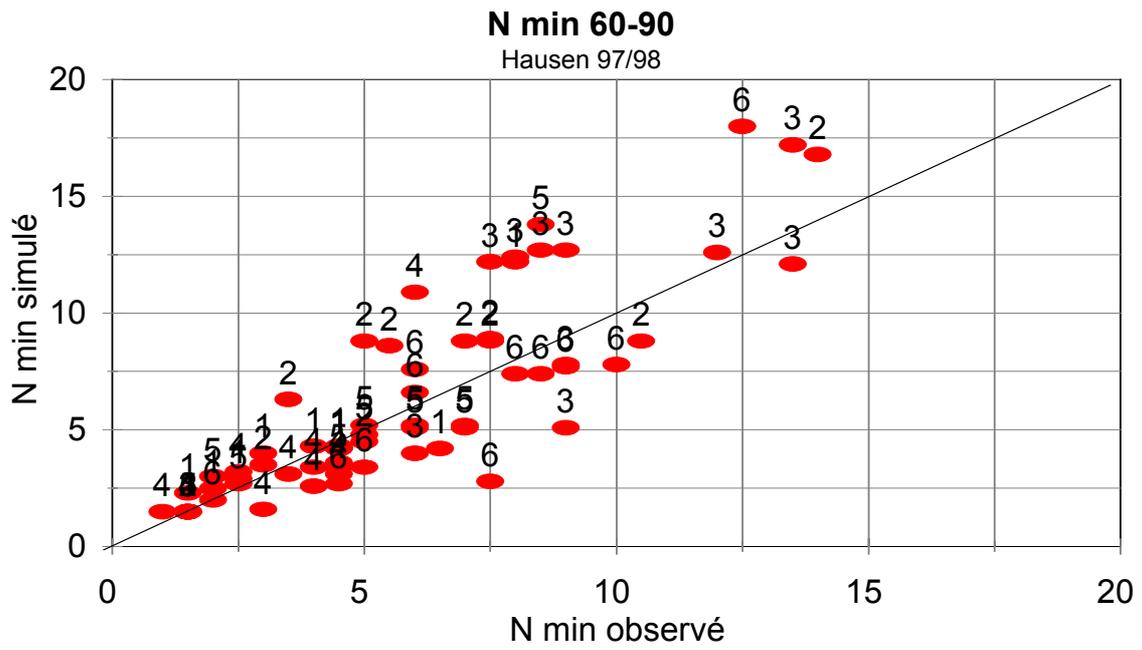
# ANNEXE 5

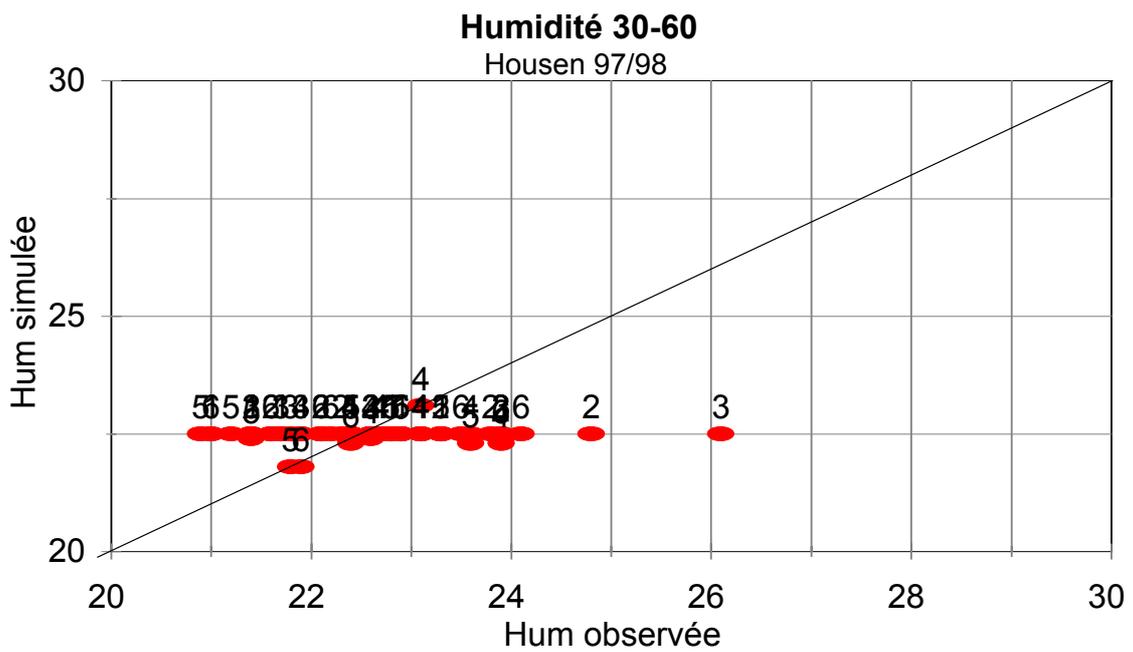
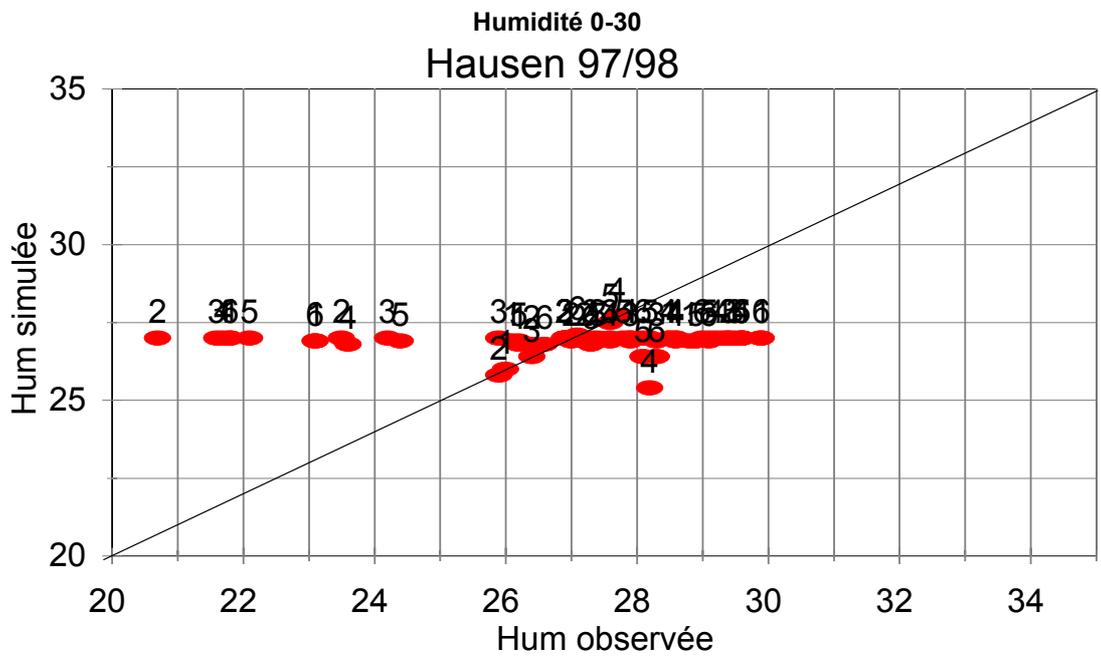
## LIXIM -- Hausen

Voici les graphiques qui ont servi à apprécier la qualité de la simulation et de pouvoir apporter des corrections appropriées en conséquences. Il s'agit de l'essai de Hausen pour l'hiver 97-98 et des graphiques finaux, après corrections.

Les deux premières pages concernent les humidités sur chaque horizon ainsi que le stock d'eau sur 0-90 cm ; les deux dernières pages concernent les quantités d'azote minéral en kg N-NO<sup>3</sup> dans chaque horizon et sur 0-90 cm.









# ANNEXE 6 : calendrier des interventions

1996

## DATE

**20-avr** SEMIS  
PACTOL

**02-mai** RELIQUATS  
SOL

**04-mai** 1<sup>er</sup> APPORT AZOTE 3 FEUIL

**24-mai** MISE EN PLACE TENSIO.

**06-jun** 2<sup>eme</sup> APPORT AZOTE 8 FEUIL

**12-jun** DEMARIAGE 110000 PL

**18-jun** MISE EN PLACE SONDE  
NEUTRON

**20-jun** + DEBUT IRRIGATION

**22-jun** PRELEVEMENT  
TENSIONIC

**04-jul** MESURE SONDE  
NEUTRON

**20-jul** FLORAISON FEMELLE

**22-jul** PRELEVEMENT  
TENSIONIC

**24-jul** MESURE SONDE  
NEUTRON

**12-aoû** MESURE TENSIONIC

**14-aoû** MESURE SONDE  
NEUTRON

**06-sep** PRELEVEMENT  
TENSIONIC

**08-sep** MESURE SONDE  
NEUTRON

**25-sep** RECOLTE STADE ENSILAGE + TENEUR AZOTE PLANTES

**26-sep** RELIQUATS AZOTE  
POST RECOLTE

**17-oct** PRELEVEMENT  
TENSIONIC

**17-oct** MESURE SONDE  
NEUTRON

**28-oct** RECOLTE  
GRAINS

1997

## DATE

**17-fév** mesure reliquats sortie  
hiver

**01-avr** Prélèvement d'eau des bougies à 80 et  
100cm.

**17-avr** semis

## ANJOU 285

- 30-avr** installation bougie terrain
- 07-mai** 1er apport azote 50u stade  
3 feuille
- 30-mai** démariage à 84 plantes/10m---calage  
des bougies
- 02-jun** 1er prélèvement d'eau des bougies et prélèvement de sol dans  
parcelles 2 et 8
- 03-jun** 2ème apport azote
- 20-jun** 2ème prélèvement d'eau des bougies et prélèvement de sol dans  
parcelles 2 et 8
- 16-jul** 3ème prélèvement d'eau des bougies et prélèvement de sol dans  
parcelles 2, 8 et 11
- 20-jul** Floraison  
femelle
- 05-aoû** 4ème prélèvement d'eau des bougies et prélèvement de sol dans  
parcelles 2, 8 et 11
- 04-sep** 5ème prélèvement d'eau des bougies et prélèvement de sol dans  
parcelles 2, 8 et 11
- 19-sep** ensilage
- 02-oct** récolte grain
- 08-oct** mesure reliquats après récolte
- 24-nov** mesure reliquats début  
drainage

## 1998

### DATE

- 20-fév** Mesure reliquats sortie hiver
- 18-mar** prélèvement d'eau des bougies
- 19-mai** piquetage de l'essai + 1er apport d'azote
- 05-mai** Semis ANJOU 285
- 08-jun** démariage à 80plantes/10m
- 09-jun** 2ème apport d'azote +  
binage
- 17-jun** mise en place des tensionics (parcelles 2,8,11)au stade  
10 feuilles
- 23-jun** stade 11 feuilles
- 03-jul** prélèvement d'eau des bougies
- 10-jul** prélèvement d'eau des bougies et prélèvement de sol
- 17-jul** floraison femelle
- 31-jul** prélèvement d'eau des bougies et prélèvement de sol
- 06-oct** récolte ensilage
- 07-oct** récolte machine
- 02-nov** prélèvement reliquats
- 13-nov** labour
- 16-nov** mise en place des  
tensionics
- 16-mar-99** prélèvement reliquats

# Bibliographie

## ARTICLES

- ◆ ACKERER P. et al., PIREN-Eau/Alsace CNRS, Institut de Mécanique des fluides, Contamination des eaux souterraines par les nitrates dans la plaine d'Alsace. Incidences de l'agriculture, *Nitrates-agriculture-eau*, International Symposium organized by INA PG Paris -- La Défense, 7 et 8 novembre 1990. Editions : R. CALVET. pp. 245-249. *Nitrates, agriculture, eau*. Paris, 7-8 novembre 1990.
- ◆ BALABANE M., BALESSENT J., INRA Versailles, Medium-term transformations of organic N in a cultivated soil, *European Journal of Soil Science*, 46, pp.497-505. Décembre 1995.
- ◆ BALLAND D. et DRIEU Y. ITCF, Fertilisation et irrigation du maïs - Essai de Greoux-les-bains, *Perspectives agricoles*, n°75. Novembre 1983.
- ◆ BENOIT M., SAINTOT D., GAURY F., INRA Mirecourt, Measurements of the losses of nitrates in farmers' fields. Variability under different farming systems and modelling of the water quality of a watershed, *C.R.Acad.Agric.Fr*, n°4, pp. 175-188. Séance du 5 avril 1995.
- ◆ BOUWER H; et al., U.S. Water Conservation Laboratory, Irrigation management for groundwater quality protection, *Irrigation and drainage Systems* n°4, pp.375-383. 1990.
- ◆ BRISSON N. et al., INRA Avignon, ITCF, Agroturf Poitou-Charentes, STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. *Agronomie* 18, 311-346, INRA/Elsevier, Paris. 1998.
- ◆ BRISSON N., VOLTZ M., INRA Avignon et Montpellier, Le compartiment hydrique des modèles de simulation de la culture du maïs, *Physiologie et production du maïs*, Colloque " La vie du maïs " à Pau les 13, 14 et 15 novembre 1990. pp. 373-381.
- ◆ BRUCKLER L. Transferts hydriques et transferts couplés (eau et chaleur) dans le sol.
- ◆ COSTA D. et GIOVANARDI R., Italie, Nitrogen fertility and water regime influence on N use efficiency in sunflower and maize, *Proc. 3ème Congrès ESA, Abano-Padova, 1994*.
- ◆ DEUMIER J.M., ITCF, Conseils pratiques pour l'utilisation des tensiomètres. Réf.Clas : JMD/CC/3/021.
- ◆ DEUMIER J.M., LACROIX B., BOUTHIER A., ITCF-AGPM, Alimentation en eau du maïs en période préfloraison et élaboration du rendement en grain, *Physiologie et production du maïs*, Colloque " La vie du maïs " à Pau les 13, 14 et 15 novembre 1990. pp. 341-347.
- ◆ DEUMIER J.M., LACROIX B., ITCF-AGPM, Peut-on faire des économies d'eau sur le maïs?, *L'irrigation en grandes cultures, Synthèse des acquis et perspectives d'avenir*. Recueil des communications de la journée du 9 avril 1992. Chambre régionale d'agriculture Midi-Pyrénées.
- ◆ DEUMIER J.M., LACROIX B., RENOUX J.P., ITCF, AGPM, Adapter la conduite d'irrigation à la ressource en eau, *Optim'Eau*, Mai 1993. pp.28-35.
- ◆ DEUMIER J.M., LEROY P., PEYREMONTE P, ITCF, INRA, Société du Canal de Provence, Systèmes irrigués, des outils pour une meilleure maîtrise, *Perspectives agricoles*, n°212, avril 1996.pp. 60-71.
- ◆ EVANS R.O., GILLIAM J.W., SKAGGS R.W., Controlled drainage and subirrigation effects on drainage water quality, 14ème congrès, Rio de Janeiro Q.42 R.2, 1990.
- ◆ FOLLETT R.F. et al., Agricultural Research Service of USDA, NLEAP simulation of residual soil nitrate for irrigated and nonirrigated corn, *Soil and Water Conservation Journal*, n°49 pp.375-382, juillet-août 1994.
- ◆ GISSY M., Pollution préoccupante de la nappe phréatique, *DNA Région*, 30 juin 1998.
- ◆ GOSS M.J., Macaulay Land Use Research Institute, UK, The effects of soil and crop management on the leaching of nitrates, *Nitrates-agriculture-eau*, International

Symposium organized by INA PG Paris -- La Défense, 7 et 8 novembre 1990. Editions : R. CALVET. pp. 389-394.

◆ GUIRESSE M. et al., INP-ENSAT, Evolution de la qualité des eaux de drainage sous une monoculture de maïs. Bilan des quantités d'azote exporté par le drainage.

◆ HUBBARD R.K. et al., USDA-ARS, Shallow groundwater quality beneath an intensive multiple-cropping system using center pivot irrigation, *J. Environ. Quality*, Vol.13, n°1. 1984.

◆ ISBERIE C., Cemagref d'Aix-en-Provence -- Division Irrigation, Le tensiomètre, principe, mise en oeuvre, intérêt pour l'irrigation. Février 1985.

◆ LACROIX B., AGPM, Axes de travail sur l'irrigation du maïs dans le cadre du programme AGPM-ITCF -- Débit mobilisable et conduite de l'irrigation du maïs.

◆ LACROIX B., DEUMIER J.M., AGPM-ITCF, Stratégies de conduite de l'irrigation du maïs, L'irrigation en grandes cultures, Synthèse des acquis et perspectives d'avenir. Recueil des communications de la journée du 9 avril 1992. Chambre régionale d'agriculture Midi-Pyrénées.

◆ LE GALL A., LEGARTO J., PFLIMLIN, A., Institut de l'élevage, Systèmes fourragers laitiers et environnement : incidence de l'équilibre herbe-maïs. 1998.

◆ LEFEVRE G., INRA, Transferts d'azote dans le sol, *Cultivar*, n°164, Sept 1983, pp.97-99.

◆ LEMAIRE G., CHARRIER X., HEBERT Y., INRA Lusignan, Nitrogen uptake capacities of maize and sorghum crops in different nitrogen and water supply conditions, *agronomie*, 16, pp. 231-246. 1996.

◆ LEMAIRE G., MEYNARD J.M., INRA Lusignan, INRA-INA PG, Use of the nitrogen nutrition index for the analysis of agronomical data, *Diagnosis of the nitrogen status in crops*, édition G.LEMAIRE, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1997.

◆ LORD E.I., SHEPHERD M.A., UK, Developments in the use of porous ceramic cups for measuring nitrate leaching, *Journal of Soil Science*, 1993, n°44, 435-449.

◆ MARTIN E.C. et al., American Society of Agricultural Engineers, Use of drainage lysimeters to evaluate nitrogen and irrigation management strategies to minimize nitrate leaching in maize production, pp.79-83, 1994.

◆ MARY B., BEAUDOIN N., JUSTES E., MACHET J.M., INRA Laon et Reims, Calculation of N mineralization and leaching in fallow soils using a simple dynamic model, soumis à *European Journal of Soil Science*, 1998.

◆ MARY B., INRA Laon, Lixim2, 1998.

◆ MOREL R., INA PG, Cinétiques relatives de l'azote et du carbone dans le sol.

◆ MULLER J.C., INRA Chalons-sur-marne, Le rôle du sol dans les mécanismes d'enrichissement en nitrates des eaux de percolation, *Pollution des eaux par les pesticides et les nitrates*, 18 et 19 mars 1987. n°5. ANPP-COMIFER. 1987.

◆ NORMAND B. et al, L.T.H.E., Nitrogen-15 tracers combined with tensio-neutronic method to estimate the nitrogen balance of irrigated maize, *Soil Sci.Soc.Am.J.*61, pp.1508-1518. 1997.

◆ PAVARD P., Le tensiomètre : un outil d'alerte, *La France agricole*, 7.05.93.pp. 31.

◆ PEYREORTE P., SCP, Des tensiomètres pour améliorer la conduite des arrosages, *Perspectives agricoles*, n°67. Février 1983.

◆ PLANTUREUX S., GIRARDIN P., VINCENT G., INRA-ENSAIA et INRA Colmar, Prise en compte du stress hydrique dans Céréales-maïs, *Physiologie et production du maïs*, Colloque " La vie du maïs " à Pau les 13, 14 et 15 novembre 1990. *Physiologie et production du maïs*, pp. 451-457, 1985 ???.

◆ PLENET D., CRUZ P., INRA Villenave d'Ornon, Pointe-à-pitre et Toulouse, Maize and sorghum, *Diagnosis of the nitrogen status in crops*, édition G.LEMAIRE, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1997.

- ◆ POSS R. et al., ORSTOM INRA, Evaluation of ceramic cup samplers to measure nitrate leaching in the field, *European Journal of Soil Science*, n°46, pp.667-674. Décembre 1995.
- ◆ PRUNTY L. et MONTGOMERY B.R., US, Lysimeters study of nitrogen fertilizer and irrigation rates on quality of recharge water and corn yield, *Environ.Quality Journal* 20, pp.373-380. 1991.
- ◆ RECOUS S., INRA Laon., Les mécanismes de transformation de l'azote dans le sol, Contrat CIFRE colloque universitaire Lyon I.
- ◆ RITTER W.F. et al., US, Effect of irrigation efficiencies on nitrogen leaching losses, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 111, n°3, September, 1985.
- ◆ S.R., Premier aperçu d'ensemble, *PHR, Actualités*, 12 juillet 1998.
- ◆ SCHENCK C., L'azote coûte cher! L'azote pollue!, INRA, Station d'économie Colmar. *L'est agricole et viticole*, 16 janvier 1987. pp. 92, 124.
- ◆ TARDIEU F. et BETHENOD O., INRA de Thiverval Grignon, Quels indicateurs du fonctionnement hydrique des plantes permettent de rendre compte des variations de rendement du maïs?, *Physiologie et production du maïs*, Colloque " La vie du maïs " à Pau les 13, 14 et 15 novembre 1990. pp. 303-312.
- ◆ TAUREAU J.C., DESVIGNES P., ITCF-AGPM, Fournitures du sol et coefficient d'efficacité : deux points clé de la méthode du bilan, *Nitrates-agriculture-eau, International Symposium* organized by INA PG Paris-La Défense, 7 et 8 novembre 1990. Editeur : R.CALVET.
- ◆ TAYOT X. et al., Agroturfert, INRA Avignon et Lusignan, CRA Poitou-charentes, Le modèle de simulation de culture STICS, *Perspectives agricoles* - n°241, déc 1998.
- ◆ TAYOT X., RUGET F., GUEYE S., RIPOCHE D., Agroturfert Poitou-charentes, INRA Avignon, COGITO 1.0, Manuel d'utilisation du logiciel, CRAPC (Agroturfert) - INRA, version provisoire. 1998.
- ◆ URVOY C., Une irrigation bien pilotée n'est pas source de pollution, *La France Agricole*, 10 octobre 1997.
- ◆ VONG P.C., JASQUIN F., ENSAIA INPL, Cinétiques de réorganisation et de minéralisation secondaire d'un engrais azoté apporté à un sol brun lessivé, *C.R. Acad.Agric.Fr.*, 1989, 75, n°1, pp.43-49. Séance du 1er février 1989.
- ◆ WIENHOLD B. et al., USDA-ARS, Yield and nitrogen use efficiency of irrigated corn in the northern great plains, *Agron.Journal*.87 pp.842-846. 1995.
- ◆ YLARANTA T. et al., Finlande. Leaching of nitrogen in barley, grass ley and fallow lysimeters, *Agric.Sci.Finl.n°2*, pp.281-291. 1993.

## OUVRAGES

- ◆ Guide pratique Irrigation, RNED-HA, 2ème édition, Coédition France agricole -- Cemagref.1992.
- ◆ La conduite de l'irrigation -- De la stratégie au pilotage de l'irrigation, RNED-HA, Cemagref Editions, 1995. pp.16-25, 21-35, 38-63, 85-90, 109-123.
- ◆ La recherche aujourd'hui pour mieux agir demain, Institut de recherche sur l'Environnement. IFARE DFIU Edition 1998, pp.90-159.
- ◆ Mineral Nutrition of Maize, I.ARNON, International Potash Institute Bern/Switzerland, 1975. pp.130-142 .
- ◆ Nitrogen in crop production ; symposium tenu les 25-27 mai 1982 à Sheffield, Alabama. Publié par American Society of Agronomy ; Crop Science Society of America ; Soil Society of America, Madison, Wisconsin, USA, 1984. pp250-261 ; 264-272 ; 308-316 ; 335-346 ; 493-505 ; 522-532.
- ◆ Traité d'irrigation, coordonateur : J.R. Tiercelin. Editions : Lavoisier, Technique et documentation. 1998. pp. 612-625, 199-206, 37-42, 154-161, 163-170, 230-236, 140-142, 447-450, 471-475, 746-757, 794-798, 900-912, 488-491, 54-62, 90-95.

## REVUES

- ◆ AGPM-Info, n°250, juin 1999 ; n°236, juin 1998 ; n°64, juin 1987 ; n°144, juin 1992 ; n°97, août 1989 ; n°111, août 1990 ; n°126, juillet 1991 ; n°198, décembre 1995 ; n°262, décembre 1994 ; n°274, décembre 1995 ; n°223, juillet 1997 ; n°191, juin 1995 ; hors-série, juin 1994.
- ◆ Drôme maïs plus, l'irrigation et sa conduite par le tensiomètre, AGPM, ONIC, ITCF.
- ◆ EAU, ressources, gestion, qualité. Angers - 42ème congrès 18-19-20 septembre 1991., AGPM.
- ◆ Fiches techniques, Opération " Maïs 68-Champion " Maïs conseil, Haut-Rhin.
- ◆ La fertilisation du maïs, ITCF-AGPM, réalisée avec le concours de M. LUBET, INRA Bordeaux, 1989.
- ◆ La nappe phréatique rhénane, Conseil Régional d'Alsace. Edition/Ausgabe 04.1998.
- ◆ Les cahiers techniques de france maïs, Bien ma^triser l'irrigation, 2ème série, n°4.
- ◆ Maïs 4, irrigation, AGPM-ITCF, THEVENET G., DEGOULET A., DEUMIER J.M., le service communication de l'ITCF, Martin Holger Communications consultant, Soft publicité.

## RAPPORTS ET THESES

- ◆ AGPM, Compte rendu d'expérimentation maïs, Etoile 1997.
- ◆ AGPM, Résultats d'essais campagne 1997, station expérimentale LE RHEU.
- ◆ BOUTHIER A., ITCF, Gestion de l'azote en rotation céréalière sur terres de groies, Synthèse de 4 années d'expérimentation à la station du Magneraud. Sept 1995.
- ◆ CARLOTTI B., Recueil des bases de préconisations de la fertilisation azotée des cultures, CORPEN. 1992.
- ◆ Carte du risque de lessivage des nitrates dans les sols, Feuille 6 - HIRTZFELDEN-FESSENHEIM, Commission interministerielle d'étude de la nappe phréatique de la plaine d'Alsace. Université Louis Pasteur, Strasbourg.
- ◆ COMIFER (Comité Français d'Etude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée), Quelles fertilisations demain. *Premier forum européen de la fertilisation raisonnée*, Strasbourg, 26-27 septembre 1991.
- ◆ COSSERAT M., Thèse, Université Louis Pasteur, Contribution à l'adaptation des techniques culturales pour réduire la pollution nitrique sous monoculture de maïs en basse ariège. Soutenue le 22 mai 1991
- ◆ DEBUYSER C., Chargée d'étrudes, *Chambre d'agriculture du Bas-Rhin*, Evaluation intermédiaire de l'opération FERTI-MIEUX sur le piémont bas-rhinois des vosges. Juil. 1997.
- ◆ DEBUYSER C., Chargée de mission, *Chambre d'agriculture du Bas-Rhin*, Evaluation de l'opération FERTI-MIEUX sur la plaine de l'ill. Avril 1997.
- ◆ DEBUYSER C., chargée de mission, Extension de l'opération fert'ill, complément de diagnostic agronomique. *Chre d'agriculture du bas-rhin -- Service d'Utilité Agricole de Développement*. Juillet 1998.
- ◆ ENGASSER R., ENITA Dijon-Quetigny, L'irrigation par aspersion est-elle un facteur de pollution?
- ◆ ESCHENBRENNER G., ITCF, Systèmes de cultures, évolution des nitrates et fonctionnement du drainage dans les boubènes du sud-ouest, (ITCF-CEMAGREF/ASAD) *Comité de pilotage national Opération secteurs de référence-drainage*. Compte-rendu 1988. Compte-rendu 1989. Compte-rendu 1990. Compte-rendu 1991.
- ◆ GENDRIN M., Maïs, azote et eau, Accordons-les. Résultats d'observations menées en 94 dans quatre parcelles agricoles, *HARDT eau vive*. Mulhouse, déc 1994.
- ◆ HADDAD S., E.N.S.A.R. Raisonnement de la fertilisation azotée des céréales dans le Sud-Ouest, Bilan de 4 années d'essais, ITCF. Septembre 1986.
- ◆ Inventaire de la qualité des eaux souterraines de la vallée du Rhin supérieur, Données et cartes transfrontalières, *Conférence de presse du 29 juin 1998*.
- ◆ ITCF, Incidences des systèmes de cultures sur les nitrates des eaux de drainage, station de parisot (81). Compte-rendu de la campagne 91-92.
- ◆ KENGNI L., Thèse, Université Joseph Fourier-Grenoble I, Mesure in-situ des pertes d'eau et d'azote sous culture de maïs irrigué. Application à la Plaine de la Bièvre (Isère). Soutenue le 27 mai 1993.
- ◆ LASSERRE et al., ITCF-AGPM, Bien gérer la culture du maïs-grain, Résultats des essais 1994. Décembre 1994.
- ◆ LENORMAND M., Chargé d'étude -- *Institut de l'élevage*, Evaluation intermédiaire après deux années d'action, *Opération hardt eau vive*. Février 1996.
- ◆ MARCHAND Annick, ITCF, AGPM, CFPPA, Systèmes de cultures et teneurs en nitrates des eaux de drainage dans une boubène du sud-ouest, Résultats des 4 premières années du dispositif de Parisot, 1993.
- ◆ PIREN eau ( Programme interdisciplinaire de Recherche sur l'Environnement-Eau en Alsace), CNRS, Transfert de contaminants vers la nappe phréatique du fossé rhénan en Alsace. Rapport de synthèse 1989-1994, pp.72-85. 1995.
- ◆ SCHENCK C. et DELPHIN J-E., INRA Colmar, Observations de longue durée in situ des principaux paramètres intervenant dans le transfert de l'eau et des nitrates dans les sols cultivés en Alsace, Mars 1996 (1er rapport) et juillet 1997 (2ème rapport).

**Secrétariat ITADA :**  
**Bâtiment Europe, 2 allée de Herrlisheim,**  
**F – 68000 COLMAR**  
**Tél : 0(0.33)3.89.22.95.50 Fax : 0(0.33)3.89.22.95.59**  
**E-Mail : itada@wanadoo.fr**