N°d'ordre NNT : 2017LYSET004

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON

Opérée au sein de

Ecole **N**ationale de **T**ravaux **P**ublics de l'**E**tat

Ecole Doctorale N° 206
Ecole Doctorale de Chimie de Lyon
Spécialité / discipline de doctorat :

Environnement

Soutenue publiquement le 12/05/2017, par :

Mohammad BARAKAT

Maîtrise de l'azote en système irrigué, application au contexte méditerranéen

---

Devant le jury composé de :

PERRODIN, Yves	HDR, DR MEED, ENTPE Vaulx-en-Velin	Examinateur+ Président
COUSIN, Isabelle	HDR, DR INRA Orléans	Rapporteure
GASCUEL, Chantal	HDR, DR INRA Rennes	Rapporteure
CARLUER, Nadia	HDR, DR IRSTEA Lyon	Examinatrice
ANGULO-JARAMILLO, Rafael	HDR, Chargé de Recherche CNRS, ENTPE Vaulx-en-Velin	Directeur
CHEVIRON, Bruno	Chargé de Recherche IRSTEA Montpellier	Co-directeur

Remerciement

Cette thèse est le résultat d'un travail de recherche de près de quatre ans. En préambule, je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce travail.

En commençant par remercier tout d'abord Monsieur **Rafael Angulo-Jaramillo**, mon directeur de thèse, pour son aide précieuse et pour le temps qu'il m'a consacré.

J'adresse également mes remerciements à mon Co-directeur de thèse, Monsieur **Bruno Cheviron**, qui a toujours été présent à mes côtés pour m'orienter. Il m'a permis d'approfondir au maximum mes travaux afin de pouvoir être fier aujourd'hui du travail réalisé.

Les travaux présentés dans cette thèse ont été réalisés au sein de l'institut IRSTEA de Montpellier et ont été dirigés par l'équipe **G-Eau**, dont je souhaite remercier tous les membres pour m'avoir accepté dans leur rang, et pour les discussions intéressantes que nous avons pu avoir au sein de cet unité qui ont su m'apporter leurs conseils, leur aide et leur soutient durant ces dernières années.

Les différentes analyses présentées ici ont été effectuées au sein de CIRAD et ont été dirigées par **l'Unité de Service Analyses des Eaux, Sols et Végétaux**. J'exprime ma gratitude au personnel pour leur accueil chaleureux.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude aux membres du jury :

Yves PERRODIN qui me fait l'honneur de présider ce jury.

Isabelle COUSIN, ***Chantal GASCUEL*** et ***Nadia CARLUER*** qui ont la gentillesse d'accepter mon invitation de juger ce travail.

Je souhaite remercier également les différentes personnes que j'ai pu croiser durant ces 4 ans à Montpellier ou à Lyon et qui ont su par leurs questions ou leurs conseils me permettre de toujours pousser un peu plus mon raisonnement.
Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à ma famille : Ma femme, ma fille, mes parents, mes sœurs et tous mes proches et amis, qui m'ont accompagné, aidé, soutenu et encouragé tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Résumé

La maîtrise du transfert de nitrates sous les systèmes irrigués est un objectif primordial dans l'agriculture moderne. Celle-ci exige la recherche, surtout en plein champ, de conduire une stratégie optimale de fertigation. Dans ce but, un protocole expérimental sur une parcelle de 2 ha a été mis en œuvre pour analyser le devenir de l''azote sous différents scénarios d'irrigation et de fertilisation d'une culture de maïs.

Dans l'articulation de ce travail, et pour pouvoir étudier la dynamique de l'azote en systèmes irrigués, nous avons tout d'abord réussi à définir et clarifier la relation ambigüe entre la méthode d'irrigation (irrigation gravitaire, par aspersion ASP, en goutte à goutte de surface GGS ou enterré GGE) et les différentes transformations de l'azote (Fixation, Minéralisation, Immobilisation, Nitrification, Dénitrification et Volatilisation).

Cette relation, peu claire et non traitée dans d'autres études similaires, a été étudiée en mettant l'accent sur l'effet de certains facteurs, comme par exemple, l'humidité de sol et sa température, sur l'activité microbienne et donc sur les différentes transformations de l'azote (comme la minéralisation) et ce en mettant en avant la relation directe ou indirecte avec les méthodes d'irrigation. Une différence significative a été observée pour la minéralisation *in situ* entre les traitements sans aucun apport d'engrais menés sous les deux méthodes d'irrigation GGE et ASP.

Une méthode manuelle d'analyse a été ensuite mise au point et validée pour déterminer la concentration en azote dans les échantillons de sol prélevés dans le cadre de ce travail. Cette méthode peu onéreuse pourrait être profitable aux agriculteurs.

Les données issues de l'ensemble des traitements ont été utilisées pour modéliser les flux hydriques et azotés à l'aide de modèle HYDRUS-2D pour les systèmes par aspersion et en goutte à goutte enterré. L'analyse de sensibilité aux paramètres liés au transfert de nitrates du modèle de transfert a permis d'estimer la dynamique azotée pour d'autres contextes hydro-pédo-climatiques plus complexes.

En conclusion, la présente thèse a permis d'améliorer la connaissance du fonctionnement de la fertigation en irrigation goutte à goutte enterré par comparaison avec l'aspersion, en milieu méditerranéen, en vue d'une diminution des entrants agrochimiques dans un contexte d'économie de la ressource en eau.

Mots-clés : Irrigation par aspersion, irrigation goutte à goutte enterré, maïs, transferts eau-nitrate, modélisation numérique, HYDRUS.

Summary

The main goal in modern agriculture is the control of nitrogen fluxes in agricultural soils under the irrigation techniques. This objective requires a lot of research, especially in the field, to escort an optimal strategy of fertigation. For this purpose, an experimental protocol has been applied to follow the soil nitrogen fate for various irrigation and fertilization scenarios, during two intensive field campaigns in maize plots.

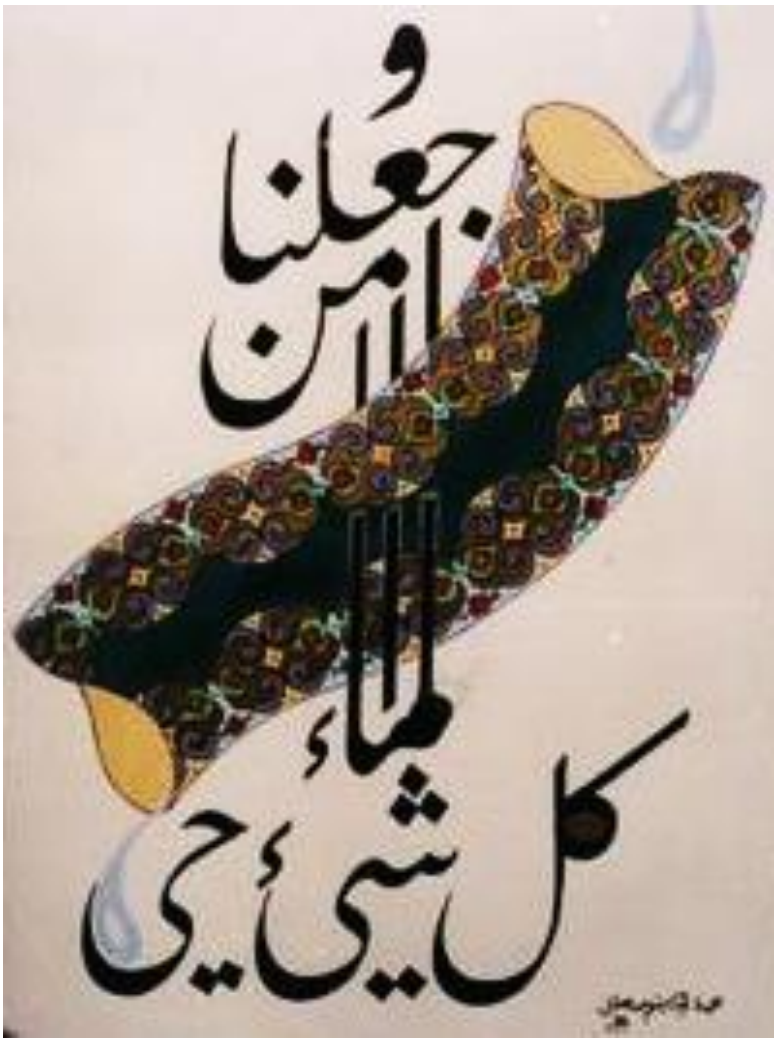
In the articulation of our work, and to be able to examine the nitrogen dynamics in unsaturated agricultural soils under irrigated systems, we succeeded firstly to determine and clarify the ambiguous relation between the irrigation techniques (flood irrigation, sprinkler irrigation, surface and subsurface drip irrigation) and the different nitrogen transformations (Fixation, Mineralization, Immobilization, Nitrification, Denitrification and Volatilization) in agricultural contexts.

This relationship, which is unclear and untreated in other similar studies, has been reviewed by studying the impact of certain factors, such as soil moisture and soil temperature under different irrigation techniques, on microbial soil activity and therefore on the nitrogen transformations (such as mineralization). A significant difference of mineralization was observed in maize plots with no fertilizer application treatment between sprinkler irrigation and subsurface drip irrigation.

The experimental data collected have been used to analyze the water and nitrogen fluxes for various initial conditions and fertilisation strategies under sprinkler and subsurface drip irrigation by using the HYDRUS-2D model. Analyzing the sensitivity of nitrogen fluxes parameters using HYDRUS-2D allowed to estimate the nitrogen dynamics under more complex agro-pedoclimatic contexts.

In conclusion, the present study allowed to improve the fertilization knowledge under both the sprinkler and subsurface drip irrigation in a Mediterranean environment.

Keywords: sprinkler irrigation, subsurface drip irrigation, corn, water and nitrates flux, numerical simulation, Hydrus 2D



We have made from water every living thing.

Nous avons fait de l 'eau toute chose vivante

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE **19**

CHAPITRE I **22**

GENERALITES SUR L'IRRIGATION **22**

1. L'IRRIGATION DANS L'HISTOIRE D'HIER ET D'AUJOURD'HUI **22**

2. DEFINITION GENERALE DE L'IRRIGATION **27**

3. IRRIGATION GRAVITAIRE **27**

3.1. IRRIGATION PAR DEVERSEMENT 28

3.2. IRRIGATION PAR BASSIN 28

3.3. IRRIGATION A LA RAIE 30

3.4. IRRIGATION PAR PLANCHES 31

4. L'IRRIGATION PAR ASPERSION **32**

4.1. LES COUVERTURES TOTALES 32

4.2. LES COUVERTURES INTEGRALES 33

4.3. LES SYSTEMES DE RAMPES PIVOTANTES ET FRONTALES 33

4.4. LES ENROULEURS 34

5. L'IRRIGATION LOCALISEE **36**

5.1. DEFINITION ET CONCEPT 36

5.2. LES METHODES D'IRRIGATION LOCALISEE 37

5.2.1. L'irrigation goutte à goutte de surface 38

5.2.2. L'irrigation goutte à goutte enterré 38

5.3. AVANTAGES DE L'IRRIGATION LOCALISEE 38

5.4. INCONVENIENTS DE L'IRRIGATION LOCALISEE 40

6. METHODES ALTERNATIVES D'IRRIGATION **41**

6.1. CAPSULES OU VASES POREUX 41

6.2. MANCHONS DE PLASTIQUE PERFORES 42

REFERENCES DU CHAPITRE I **43**

CHAPITRE II **45**

SITE EXPERIMENTAL ET MESURES IN SITU **45**

1. SITE EXPERIMENTAL **45**

1.1 EMPLACEMENT DU SITE 45

1.2. CARACTERISTIQUE DU SOL 46

1.3. CLIMAT 46

2. DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX **46**

3. LES SYSTEMES D'IRRIGATION EXPLOITES SUR LE SITE DE LAVALETTE **48**

3.1. COUVERTURE INTEGRALE 48

3.2. CANON ENROULEUR 49
3.3. GOUTTE A GOUTTE ENTERRE 50
4. PROTOCOLE EXPERIMENTAL 51
4.1. RELIQUATS AZOTES 51
4.2. IRRIGATION DE LEVEE 52
4.3. EVOLUTION DE L'ETAT HYDRIQUE DU SOL 52
4.4. EVOLUTION DU STOCK D'AZOTE DANS LE SOL 52
4.5. EVOLUTION DE L'AZOTE TOTAL DANS LA PLANTE 53
4.6. DETERMINATION DE LA PRODUCTION DE MATIERE SECHE 53
CHAPITRE III 57
INFLUENCE OF THE IRRIGATION TECHNIQUE AND STRATEGIES ON THE NITROGEN CYCLE AND BUDGET: A REVIEW 57
ABSTRACT 58
1. INTRODUCTION 59
2. INFLUENCE OF THE IRRIGATION TECHNIQUES ON NITROGEN TRANSFORMATIONS 62
2.1. NITROGEN FIXATION 62
2.1.1. Basics of nitrogen fixation 62
2.1.2. Influence of the irrigation technique on nitrogen fixation 63
2.2. NITROGEN MINERALIZATION 66
2.2.1. Basics of nitrogen mineralization 66
2.2.2. Influence of the irrigation technique on nitrogen mineralization 66
2.3. NITROGEN IMMOBILIZATION 71
2.3.1. Basics of nitrogen immobilization 71
2.3.2. Influence of the irrigation technique on nitrogen immobilization 71
2.4. NITRIFICATION 71
2.4.1. Basics of nitrification 71
2.4.2. Influence of the irrigation techniques on nitrification 72
3. INFLUENCE OF THE IRRIGATION TECHNIQUES ON NITROGEN FLUXES 74
3.1. LOSSES BY DENITRIFICATION 74
3.1.1. Basics of denitrification 74
3.1.2. Influence of the irrigation technique on denitrification 75
3.2. LOSSES BY RUNOFF, VOLATILIZATION AND LIXIVIATION 76
3.2.1. Nitrogen losses by runoff and volatilization 76
3.2.2. Nitrogen losses by lixiviation 77
4. IMPLICATIONS TO AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT 81

5. CONCLUSION 84

REFERENCES DU CHAPITRE III 87

CHAPITRE IV 102

EFFET DE LA TECHNIQUE D'IRRIGATION SUR LA MINERALISATION DE L'AZOTE : ETUDE EXPERIMENTALE 102

RESUME 103

1. INTRODUCTION 103

2. MATERIEL ET METHODES 105

3. RESULTATS ET DISCUSSION 106

3.1. EFFET DE LA TECHNIQUE D'IRRIGATION SUR LA TENEUR EN EAU ET LA TEMPERATURE 106

3.2. EFFET DE LA TECHNIQUE D'IRRIGATION SUR LA CONCENTRATION DE NITRATES 108

3.3. RELATION PLANTE-IRRIGATION-MINERALISATION ..... 110~~109~~

3.4. DETERMINATION DE LA VALEUR POTENTIELLE DE LA MINERALISATION 111

4. CONCLUSION 112

REFERENCES DU CHAPITRE IV 113

CHAPITRE V 116

NUMERICAL SIMULATION OF SOIL NITRATE DYNAMICS WITH HYDRUS-2D FOR EXPERIMENTAL MAIZE PLOTS UNDER SPRINKLER AND SUBSURFACE DRIP IRRIGATION 116

1. INTRODUCTION 119

2. MATERIAL AND METHODS 121

2.1. EXPERIMENTAL SITE 121

2.1.1. Location and soil type 121

2.1.2. Climate 121

2.1.3. System installation and design of field experiments 122

2.1.4. Measurement campaigns and fertigation strategies 122

2.2.1. Water flow 124

2.2.2. Solute flow 126

2.2.3. Spatial discretization and model parameterization 126

2.2.4. Initial and intermediate conditions 127

2.2.5. Boundary conditions 128

3. RESULTS AND DISCUSSION 128

3.1. CALIBRATION AND VALIDATION 128

3.1.1. Calibration from water content for subsurface drip irrigation 128

3.1.2. Validation from water content and nitrate concentrations for subsurface drip irrigation....130
3.1.3. Validation from water content and nitrate concentrations for sprinkler irrigation....133
3.1.4. Numerical comparisons of lixiviation between sprinkler and subsurface drip irrigation....135
3.2. FOCUS ON NUMERICAL SIMULATIONS OF SUBSURFACE DRIP IRRIGATION....136
3.2.1. Influence of the initial conditions and antecedent practices....136
3.2.2. Water and nitrogen uptake by plant roots....138
3.2.3. Effects of the irrigation and fertigation strategies and doses....139
4. CONCLUSION....141
REFERENCES DU CHAPITRE V....143
CONCLUSION, RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES....147
CONCLUSION....147
PERSPECTIVES - RECOMMANDATIONS POUR LE SITE DE LAVALETTE....150
ANNEXE....152
VALIDATION D'UNE METHODE MANUELLE D'ANALYSE DE L'AZOTE NITRIQUE DANS LE SOL : EXTRACTION AU KCL ET DOSAGE PAR LA METHODE COLORIMETRIQUE APRES REDUCTION SUR COLONNE....152
1. METHODES DE DOSAGE....152
1.1. CHROMATOGRAPHIE IONIQUE....152
1.2. ELECTROPHORESE CAPILLAIRE....153
1.3. METHODE POTENTIOMETRIQUE....153
1.4. MÉTHODE TITRIMÉTIQUE....154
1.5. MÉTHODES SPECTROSCOPIQUES....154
1.5.1. Dosage spectrophotométrique des ions nitrates....154
1.5.2. Dosage spectrophotométrique des composés azotés produits par l'oxydation de composés aromatiques par la brucine, en présence d'acide sulfurique....156
1.5.3. Dosage des nitrates suite à la réduction de nitrates en nitrites d'après une réaction en deux étapes....156
2. DETERMINATION DES NITRATES DANS LES SOLS AGRICOLES : LA METHODE MANUELLE COLORIMETRIQUE....157
2.1. PRINCIPE D'ANALYSE....157
2.2. MATERIEL ET METHODES....158
2.2.1. Extraction des nitrates....158
2.2.2. Prélèvement et conservation....158
2.2.3. Préparations des solutions....158

2.2.4. Activation de la colonne 159
2.3. REDUCTION DES NITRATES EN NITRITES 159
2.3. RESULTATS ET DISCUSSION 160
3. CONCLUSION 163
REFERENCES DE L'ANNEXE 165

Table de figures

Figure 1: Canaux d'irrigation égyptiens (a) et le Chadouf (source: Egypteroi.blogspot.fr) (b) 22
Figure 2. Aflaj dans le sultanat d'Oman (source : www.y-oman.com) 23
Figure 3. La Noria à Hama en Syrie, sur le fleuve Oronte (source: archeorient.hypotheses.org) 24
Figure 4. Les roues à eau (source : www.yachtmollymawk.com) 24
Figure 5. Pompe à chapelet (source : decouverte-bocage-gatinais.fr) 25
Figure 6. Pompe à piston aspirante (source : photo M. Barakat 2013) 25
Figure 7. La vis d'Archimède (source : www.fao.org) 26
Figure 8. La jarre poreuse (source : www.fao.org) 26
Figure 9. Irrigation par déversement (source : www.fao.org) 28
Figure 10. Irrigation par bassin (source : www.fao.org) 29
Figure 11. Irrigation des arbres par bassin (source : www.fao.org) 29
Figure 12. Le système californien d'irrigation (source : eau-agro.com) 30
Figure 13. Irrigation à la raie (source: irrigationmuseum.org) 30
Figure 14. Irrigation par planches (source : www.secheresse.info) 31
Figure 15. Les couvertures totales (source : www.fao.org) 32
Figure 16. Les couvertures intégrales (source : www.fao.org) 33
Figure 17. Les rampes tournantes (source : gettyimages.fr) 34
Figure 18. Le canon d'arrosage (source : tice.agroparistech.fr) 35
Figure 19. Les goutteurs à circuit uniforme et non uniforme (source : agronomie.info). 36
Figure 20. Le micro-asperseur (source : blogdesagrumes.blogspot.fr) 37
Figure 21. L'irrigation goutte à goutte de surface (source : photo M. Barakat 2012). 38
Figure 22. Coupe longitudinale d'une gaine enterrée à 35 cm avec les équipements de contrôle du système : (1) manomètre vanne-purge, (2) programmateur de régulation du manomètre, (3) peigne de stabilisation, (4) gaine enterrée, (5) peigne de connexion et (6) une conduite principale (source : P. Rosique 2011). 38
Figure 23. Capsule poreuse (source : www.oyas-environnement.com) 42
Figure 24. Manchon de plastique perforé (source : www.fao.fr) 42
Figure 25. Vue aérienne de la station expérimentale de Lavalette (source : google earth). 46
Figure 26. Schéma du dispositif de Lavalette en 2013 avec 4 placettes irriguées par goutte à goutte enterré (zone A), une placette sans irrigation (pluvial, zone B) et 3 placettes irriguées par aspersion (zone C). 47
Figure 27. Schéma du dispositif de Lavalette en 2015 avec12 placettes irriguées par goutte à goutte enterré (zone A), 2 placettes irriguées par aspersion (zone B) et une placette sans irrigation (zone C). 48
Figure 28. Couverture intégrale par aspersion, sur les placettes B1-2 de la Fig. 27 (photo M. Barakat, 2015) 49
Figure 29. Irrigation au canon enrouleur sur le site de Lavalette (photo M. Barakat 2015) 50

Figure 30. Irrigation goutte à goutte enterré sous le maïs, placette A5 (photo M. Barakat, 2015) 50
Figure 31. Station de tête du goutte à goutte enterré avec (1) une vanne manuelle, (2) un système de filtration qui inclut un régulateur de débit et des filtres à sable, (3) une pompe doseuse, (4) une cuve cylindrique et (5) un filtre à tamis (photo P. Rosique, 2014). 51
Figure 32 - Schematic overview of the nitrogen cycle and budget, showing the main nitrogen fluxes and transformations in agricultural contexts. 61
Figure 33. Summary of the expected influence of the irrigation techniques on the nitrogen cycle, as mainly depending on soil water content, represented here by the evolution of the saturation index (y axis) with time (x axis), averaged over different soil depths (0-30 and 30-40 cm). Here, ∅I indicates no irrigation, FI flood irrigation, SI sprinkler irrigation, DI drip irrigation, SDI subsurface drip irrigation. FC is field capacity, EAWR the limit of easily available water reserve and PWP the permanent wilting point. Depending on other contextual elements (see Tables 3 to 7), [N], [D], [R], [V], [M] and [F] indicate favorable conditions for nitrification, denitrification, runoff, volatilization, mineralization and fixation, while [L] indicates lixiviation risks. The plotted data have been collected on several cultivated plots (maize) on the experimental site of Lavalette (IRSTEA Montpellier) in spring and summer 2014, chosen to account for "typical situations" and not for detailed comparisons: sketches (a) to (h) are briefly discussed in the text. 83
Figure 34. Schematic overview of the nitrogen cycle and budget, showing the expected favorable influence of the irrigation techniques (∅I: no irrigation, FI: flood irrigation, SI: sprinkler irrigation, DI: drip irrigation, SDI: subsurface drip irrigation) on the main nitrogen fluxes and transformations, in "typical situations" for agricultural contexts, as shown in Fig.33. [N] accounts for favorable conditions for nitrification, [D] for denitrification, [V] for volatilization, [M] for mineralization and [F] for (symbiotic) fixation. 84
Figure 35. Schéma du site expérimental durant les années 2014 et 2015. Deux systèmes d'irrigation coexistent : l'irrigation par goutte-à-goutte enterré (GGE) dans les 12 sous-parcelles de la zone A et l'irrigation par aspersion (ASP) dans la zone B. Aucune irrigation n'est appliquée dans la zone C. Les mêmes parcelles A1-A2 et B2 ont été utilisées pour les mesures de température et de teneur eau en 2014, puis pour les prélèvements de sol avant analyses d'azote en 2015. 106
Figure 36. Chronique des indices de saturation (ratio de la teneur en eau à la porosité) et des températures du sol, en valeurs moyennes sur les profondeurs 0-30 et 30-40 cm, pour les parcelles irriguées en goutte-à-goutte enterré (GGE, parcelles A1-A2, Fig.35) et en aspersion (ASP, parcelles B1-B2) pour le début de l'été 2014 (24 juin au 25 juillet). La notation [1] indique un épisode de pluie, [2] et [3] indiquent des épisodes d'irrigation identifiables par les pics sur les courbes de teneur en eau. 108
Figure 37. Quantités de nitrates mesurées à différentes profondeurs du sol, lors de la saison 2015, dans les parcelles A1-A2 (Fig.35) irriguées en goutte-à-goutte enterré (GGE) et B1-B2 irriguées en aspersion (ASP) 109

Figure 38. Concentration en nitrates sous l'irrigation par ASP (a) et en GGE (b) pour trois périodes végétatives du maïs. (Période 1 : 13 - 24 avril ; Période 2 : 21 mai - 1 juillet et Période 3 : 13 juillet - 30 août).....111
Figure 39. Cumulative potential evapotranspiration (ETP) and rainfall (mm) recorded during 2014 and 2015. 121
Figure 40. Layout of the experimental plot during 2014 (pale grey) and 2015 (dark grey). Two irrigation systems coexist: subsurface drip irrigation in the 12 subplots of zone A and sprinkler irrigation in the 2 subplots of zone B. No irrigation was applied in zone C. Two irrigation and fertigation strategies were applied in 2014, S1: 50 nitrate units on A11-12 and S2: 50 nitrate units on A7-8. Five strategies were applied in 2015, S3: 50 nitrate units on A6, S4: 50 nitrate units on A5, S5: 25 nitrate units on A3-4, S6: 50 nitrate units on A5 and S7: 25 nitrate units on A3-4. Additional tests consisted of no nitrate applications on B1 but a local manual fertilisation of 25 kg of nitrates on 700 m2 in subplot B2. Figure 41 details all strategies. 122
Figure 41. Scheduling of the tested irrigation (I) and fertigation (F) strategies S1 to S7, for subsurface drip irrigation in 2014 and 2015, indicating the total nitrate units delivered (e.g. 25U=25 kg ha-1), the scheduling and specific duration of fertigation, the presence of maize (or not), the application date and the location in Fig.40.....124
Figure 42. Geometry of the installation (a) and boundary conditions (b) used to describe the water and nitrogen fluxes in the vicinity of the subsurface drip irrigation system, as represented in HYDRUS-2D. The plane in the foreground of (a) is the one detailed in (b) and used for the simulations. The intersecting planes parallel to the drip tape and located at horizontal distances of 10, 30 and 50 cm from the emitter are of special interest for the numerical simulations and have been identified in (a). 127
Figure 43. Subsurface drip irrigation. Simulated (lines) and measured (points) soil water content (-) in a vertical plane parallel to the drip tape, at three horizontal distances from the emitter: x=10 cm (a, d), x=30 cm (b, e) and x=50 cm (c, f). The points in sketches (a), (b) and (c) belong to the calibration dataset (1 day after irrigation S3, see Fig.41) while these of sketches (d), (e) and (f) belong to the validation dataset (2 days after irrigation S3). The bare soil subplot A6 (Fig.40) was used for this preliminary stage. Arrows [1] and [2] in (a) indicate minor jumps in the predicted numerical values, commented in the text. 129
Figure 44. Subsurface drip irrigation. Simulated (lines) and measured (points) nitrate concentrations in a vertical plane parallel to the drip tape, at three horizontal distances from the emitter: x=10 cm (a, d, g, j), x=30 cm (b, e, h, k) and x=50 cm (c, f, i, l). The points in sketches (a), (b) and (c) are validation data (1 day after fertigation S3, see Fig.41). The points in sketches (d), (e) and (f) are validation data (2 days after fertigation S3). The points in sketches (g), (h) and (i) are validation data (4 days after fertigation S3). The points in sketches (j), (k) and (l) are validation data (7 days after fertigation S3). Subplot A6 (Fig.40) was used for these tests. 131
Figure 45. Subsurface drip irrigation. Simulated (lines) and measured (points) nitrate concentrations in a vertical plane parallel to the drip tape, at three horizontal distances from the emitter: x=10 cm (a, d, g, j), x=30 cm (b, e, h, k) and x=50 cm (c, f, i, l). The points

in sketches (a), (b) and (c) are validation data (1 day after fertigation S4, see Fig.41). The points in sketches (d), (e) and (f) are validation data (2 days after fertigation S4). The points in sketches (g), (h) and (i) are validation data (4 days after fertigation S4). The points in sketches (j), (k) and (l) are validation data (7 days after fertigation S4). Subplot A5 (Fig.40) was used for these tests. 132
Figure 46. Sprinkler irrigation. Simulated (lines) and measured (points) water contents (a, c, e, g) and nitrate concentrations (b, d, f, h) in a vertical plane. All sketches are validation data obtained 1 day after fertilisation (a, b), 2 days after fertilisation (c, d), 4 days after fertilisation (e, f) and 7 days after fertilisation (g, h). Subplot B2 (Fig.40) was used for these tests. 134
Figure 47. Numerical simulation of cumulative nitrates lixiviation below 150 cm, under sprinkler (bold dotted line) and subsurface drip irrigation (thin dotted line), in a vertical plane parallel to the drip tape, at the horizontal distance of 10 cm from the emitter. ...135
Figure 48. Subsurface drip irrigation. Simulated (lines) and measured (points) nitrate concentrations in vertical planes parallel to the drip tape, at three horizontal distances from the drip line: 10 cm (a, d), 30 cm (b, e) and 50 cm (c, f). Sketches (a), (b) and (c) depict nitrates concentration on the first day of fertigation on the A11 subplot in 2014. Sketches (d), (e) and (f) depict situations on the first day of fertigation on the A5 subplot in 2015. 137
Figure 49. Continuous variations of soil water content and nitrates concentration with the horizontal distance to the emitter, at the same depth (35 cm), for the A5 subplot in Fig.40 after a series of pre-season subsurface drip irrigations....138
Figure 50. Nitrate concentrations simulated at the depth of the emitter (35 cm), in vertical planes parallel to the drip tape located at horizontal distances of 10 cm and 50 cm from the emitter, for 1, 2, 4 and 7 days after the irrigation and fertigation strategies S3 and S4 (Fig.41) applied in 2015 on the A6 and A5 subplots, respectively (Fig.40). 139
Figure 51. Subsurface drip irrigation. Simulated (lines) and measured (points) nitrate concentrations in vertical planes parallel to the drip tape, at two horizontal distances from the drip line: 10 cm (a, c) and 30 cm (b, d). Sketches (a) and (b) show the profiles obtained 1 day after irrigation and fertilization on the A5 subplot (Fig.40) with the S4 strategy (Fig.41) in 2015. Sketches (c) and (d) show the profiles obtained 1 day after subsurface drip irrigation and fertigation on the A5 subplot (Fig.40) with the S6 strategy in 2015. 140
Figure 52. Subsurface drip irrigation. Simulated cumulative nitrogen uptake by the roots through for strategies S4 to S7 (Fig.41) and for the fictitious S8 strategy (37 nitrate units). 141
Figure 53. Courbe d'étalonnage entre la concentration et l'absorbance à 543 nm mesuré par la méthode B. 161
Figure 54. Les concentrations des nitrates mesurées dans les 42 échantillons par les deux méthodes : (A) méthode manuelle et (B) méthode automatisée. 163

Liste des tableaux[1]

Tableau 1 - Vue d'ensemble des campagnes expérimentales de 2013 et 2014 54
Tableau 2 - Vue d'ensemble de la campagne expérimentale de 2015 56
Table 3. Soil variables that control symbiotic nitrogen fixation, with the expected influence of the irrigation technique (FI: flood irrigation, SI: sprinkler irrigation, DI: drip irrigation, SDI: subsurface drip irrigation). Besides additional comments, this in influence is noted (+) for "favorable" and (-) for "unfavorable". 63
Table 4. Soil variables that control nitrogen mineralization or immobilization, with the expected influence of the irrigation technique (FI: flood irrigation, SI: sprinkler irrigation, DI: drip irrigation, SDI: subsurface drip irrigation). Besides additional comments, this influence is noted (+) for "favorable", (-) for "unfavorable" while (0) indicates "no expected significant effect on the process"..... 66
Table 5. Soil variables that control nitrification, with the expected influence of the irrigation technique (FI: flood irrigation, SI: sprinkler irrigation, DI: drip irrigation, SDI: subsurface drip irrigation). Besides additional comments, this influence is noted (+) for "favorable", (-) for "unfavorable" while 0 indicates "no expected significant effect on the process". 72
Table 6. Soil variables that control denitrification, with the expected influence of the irrigation technique (FI: flood irrigation, SI: sprinkler irrigation, DI: drip irrigation, SDI: subsurface drip irrigation). Besides additional comments, this influence is noted (+) for "favorable", (-) for "unfavorable" while (0) indicates "no expected significant effect on the process"..... 75
Table 7. Soil variables and nitrogen management options that control lixiviation, with the expected influence of the irrigation technique (FI: flood irrigation, SI: sprinkler irrigation, DI: drip irrigation, SDI: subsurface drip irrigation). Besides additional comments, this influence is noted (+) for "favorable", (-) for "unfavorable" while (0) indicates "no expected significant effect on the process"..... 78
Tableau 8. Quantités de nitrates mesurées à différentes profondeurs du sol, lors de la saison 2015, dans les parcelles A1-A2 (Fig.1) irriguées en goutte-à-goutte enterré (GGE) et B1-B2 irriguées en aspersion (ASP) 108
Tableau 9. Estimation de la valeur potentielle de la minéralisation (kgN ha-1 j-1) sous les deux systèmes d'irrigation (GGE et ASP). 112
Tableau 10. Hydrodynamic parameters of the van Genuchten (1980) model, where θ r (-) and θ s (-) denote the residual and saturated volumetric soil water contents respectively, α (cm-1) and n (-) are empirical shape parameters, Ks (cm hr-1) is the soil hydraulic conductivity at saturation and l (-) is a pore connectivity parameter. 127
Tableau 12. Layer-averaged values of the nitrogen residues concentrations before the fertigation events at the date of sowing in 2014 and one month after the sowing in 2015. 136
Tableau 13. Nitrate concentrations (g cm-3) simulated at the depth of the emitter (35 cm), in vertical planes parallel to the drip tape located at horizontal distances of 10 cm and 50 cm from the emitter, for 1, 2, 4 and 7 days after the irrigation and fertigation strategy S3 and S4 (Fig.41) occurring on 2015, on the A5-6 subplots (Fig.40). 138
Tableau 14. Les concentrations des nitrates mesurées via les deux méthodes A et B et leurs absorbances optiques estimées via la colorimétrie à 543 nm. 160
Tableau 15. La concentration et l'absorbance mesurées par les deux méthodes A (automatisée) et B (manuelle) pour une série de 42 échantillons. 162

[1] Table/Tableau: ***Table*** dans les papiers en anglais et ***tableau*** dans les chapitres en français.

Introduction générale

La plante est un être vivant au même titre que nous. Elle respire et sa respiration nous indique ses besoins hydriques et nutritifs. Sa productivité dépend en grande partie de notre compréhension de ses besoins nutritifs. Parmi tous les éléments nécessaires à la nutrition des plantes, l'azote est celui qui détermine le plus la production agricole ; en effet, il favorise à la fois la croissance des racines et le développement des plantes, donc influe très directement sur le rendement final (Niste et al., 2013).

Les interventions agricoles telles que la fertigation ou la nutrigation sont des tâches primordiales pour apporter les éléments nutritifs, leur organisation dans le sol, leur possibilité de volatilisation ou les pertes vers l'écosystème. Les processus conduisant à ces pertes sont influencés par les conditions agro-climatiques et le stade végétatif de la culture au moment de l'apport. Par exemple, l'azote, y compris celui présent dans la zone racinaire, peut être mobilisé par d'autres processus que l'absorption (lixiviation) lorsque l'engrais est apporté à une période de faible besoin.

Cependant, les pratiques "traditionnelles" des agriculteurs se focalisent souvent sur l'augmentation de la productivité des cultures, typiquement par l'application excessive d'engrais azotés et parfois sans sélectionner la période d'apport en fonction des besoins des plantes. Par exemple, le risque de lixiviation associé à l'application de fortes doses est encore augmenté lors d'apports trop tardifs, l'absorption par les racines étant moindre hors de la période de forte croissance des cultures (Zahran, 1999).

La maîtrise de l'azote dans le sol sous les cultures irriguées exige une gestion raisonnée et durable de la fertigation azotée, en tenant compte, d'une part, l'influence des stocks d'azote présents dans le sol et, d'autre part, les stades phénologiques pendant lesquels les besoins de la plante sont les plus importants. La stratégie d'apport doit ensuite être décidée en fonction d'une série d'objectifs et de contraintes, éventuellement antagonistes : assurer un rendement minimum en limitant l'irrigation et la fertilisation pour réduire à la fois les coûts et l'empreinte environnementale. Les stratégies optimales sont alors celles qui augmentent la productivité de l'eau et de l'azote, ce qui impliquerait :

(i), une compréhension détaillée de la relation entre le cycle de l'azote et l'ensemble des paramètres bio-agro-physico-chimiques (Haynes, 1985; Soussi et al., 1998; Mmolawa and Or, 2000; Valé et al., 2007; Barakat et al., 2016), (ii) la connaissance de l'influence de la technique d'irrigation sur le cycle et le bilan d'azote (Barakat et al., 2016) et (iii), la possibilité de générer et d'analyser des scénarios d'irrigation et de fertilisation pour s'approcher de la solution optimale (problème multi-variables et multi-contraintes, Cheviron et al., 2016).

Dans une vue d'ensemble, l'azote se présente sous plusieurs formes (organique, minérale et gazeuse) dans les systèmes agricoles, et ces différentes formes subissent des transformations (fixation, minéralisation, immobilisation, nitrification) et des flux (dénitrification, volatilisation, ruissellement, lixiviation) contrôlés par plusieurs caractéristiques locales du sol. La teneur en eau est toujours le facteur le plus influent, soit directement soit en interaction avec d'autres facteurs qui seraient d'importance secondaire dans la plupart des cas. Pour les transformations de l'azote, ces facteurs sont la température, la texture du sol, le rapport C/N, le pH, la salinité et le type de molécules d'azote utilisées pour la fertilisation. Pour les flux d'azote, essentiellement les pertes par lixiviation, les facteurs sont l'emplacement des fertilisants, la chronologie de leur application au cours d'un épisode d'irrigation et les choix des épisodes d'irrigation pendant lesquels ils doivent être appliqués, la texture du sol et le type de molécules d'azote.

Pour traiter du devenir de l'azote dans les systèmes irrigués, ce manuscrit a été pensé en cinq chapitres. L'articulation de ces chapitres se veut une progression logique depuis l'état de l'art jusqu'à la résolution, à la fois expérimentale et numérique, de la question de recherche. Le plan du manuscrit est le suivant :

I. Les techniques d'irrigation avec leur historique, leurs spécificités et les possibilités de fertilisation qu'ils offrent.

II. La présentation de la parcelle expérimentale et des différentes stratégies de fertigation et de mesure élaborées pour étudier le devenir de l'azote pour le maïs irrigué (GGE[2] et ASP[3]).

[2] **GGE : Goutte à Goutte Enterré**
[3] **ASP : Aspersion**

III. **L'influence des techniques d'irrigation sur le cycle et le bilan d'azote** (papier de review publié dans *Agricultural Water Management*, Barakat et al., 2016).

IV. L'évaluation de la minéralisation de plein champ, comme principale transformation de l'azote sur notre site expérimental, pour des parcelles irriguées en aspersion et en goutte à goutte enterré, en continuité du chapitre précédent (papier en préparation pour Cahiers Agricultures).

V. Simulation numérique de la dynamique de l'azote dans le sol avec HYDRUS-2D, pour des parcelles de maïs irriguées par aspersion et en goutte à goutte enterré (papier soumis à *Agricultural Water Management*).

Annexe 1. Une méthode manuelle d'analyse de l'azote du sol, qui est la pierre angulaire des campagnes expérimentales menées en 2013, 2014 et 2015, et constitue une adaptation au manque de moyens financiers pour les très nombreuses analyses chimiques de cette thèse (note technique en préparation pour New Journal of Chemistry NJC).

Comme cela apparaît clairement à l'énoncé des différents chapitres, ce travail multidisciplinaire fait appel à la physique du sol, la chimie, l'agronomie, la simulation numérique de l'irrigation et de la fertilisation, pour parvenir à la résolution de la principale question de recherche. Le papier de review (Chapitre II.) rassemble un nombre de travaux conséquents mais disparates au bénéfice de la communauté des irrigants. L'exposé d'une méthode manuelle d'analyse de l'azote (Annexe 1.) pourra profiter aux chercheurs pauvrement dotés et le travail sur la simulation numérique de la dynamique de l'azote (Chapitre V.) pourra probablement être transposé à d'autres contextes (différents types de sols, différentes méthodes d'irrigation et différentes stratégies de "fert-irrigation"), donc s'avérer utile au plus grand nombre.

Chapitre I

Généralités sur l'irrigation

1. L'irrigation dans l'Histoire d'hier et d'aujourd'hui

Toute l'histoire de l'agriculture nous montre combien l'irrigation est un facteur puissant de richesse, un moyen d'améliorer la productivité agricole et par voie de conséquence, la sécurité alimentaire.

Les premières traces d'irrigation remontent à plus de 6000 ans av. J. C. Il semble qu'elle ait été mise en œuvre dans les piémonts du sud Zagros (Iran). Les plaines de la Mésopotamie, sous les règnes de Ninus et de Sémiramis, connaissent un développement exceptionnel par un important réseau de canaux qui convoyaient déjà les eaux du Tigre et de l'Euphrate avant 4000 ans av. J. C.

En Egypte, la présence du Nil était la base du développement au temps des Pharaons. Les égyptiens utilisaient le Chadouf[4] pour soulever l'eau des canaux alimentés par le Nil et irriguer leurs champs (Fig.1).

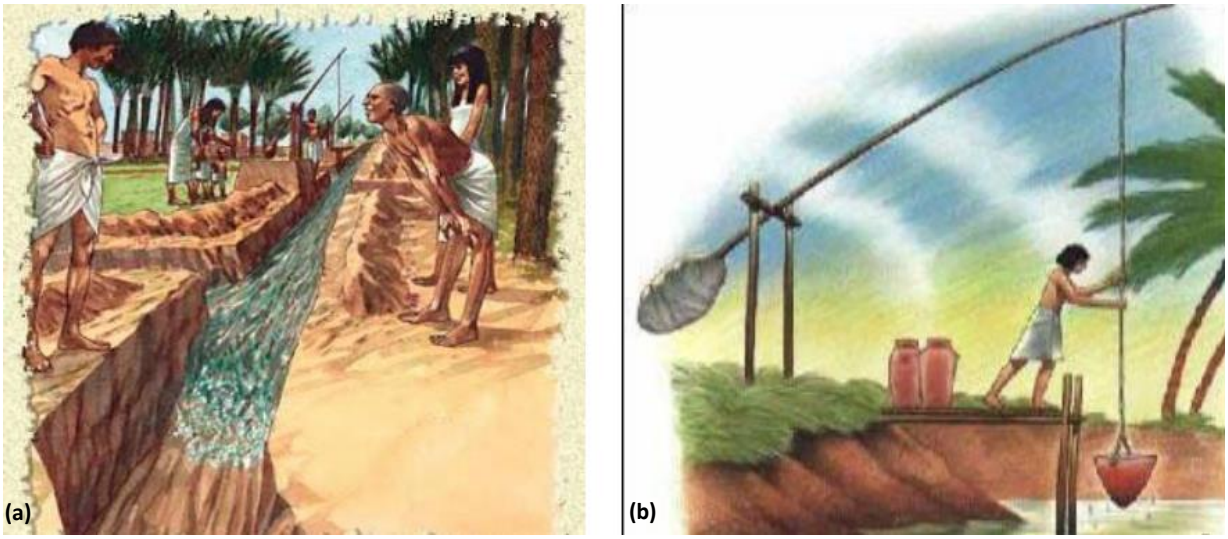


Figure 1: Canaux d'irrigation égyptiens (a) et le Chadouf (source: Egypteroi.blogspot.fr) (b)

[4] **Le Chadouf (ou Shadouf) est un outil qui permet de soulever l'eau d'un puits ou des canaux d'irrigation pour irriguer les cultures**

Dans le sultanat d'Oman, au sud de la péninsule d'Arabie, l'irrigation était pratiquée dès 2500 avant J.-C. : le système d'irrigation des Aflaj[5] conduisait les eaux des sources souterraines, par gravité, pour alimenter les champs et les zones de peuplement permanents (Fig. 2).



Figure 2. Aflaj dans le sultanat d'Oman (source : www.y-oman.com)

En Chine, il y a 2000 ans, un vaste réseau de canaux s'étendait à travers les plaines pour assurer la nourriture de 40 millions d'habitants dans le bassin des fleuves Bleu et Jaune.

La région de l'actuel Cambodge a eu un système complexe de canaux, étangs et réservoirs utilisés pour l'irrigation et le stockage de l'eau, en service entre le 9ème et le 14ème siècle.

En Europe, les Romains ont constitué des systèmes complexes d'irrigation et des centaines de canaux ont été mis en œuvre pour transporter l'eau depuis les montagnes jusque dans les réservoirs, avant de la répartir vers les territoires agricoles puis les parcelles.

En France, le Roussillon possède des canaux d'irrigation depuis le Moyen-âge et la Provence depuis la fin du XVème siècle.

A ces époques anciennes, les techniques de l'hydraulique étaient basées sur l'énergie gravitaire de l'eau. A partir d'une source d'eau, il fallait constituer une réserve, ou

[5] Les Aflaj (le pluriel de falaj) sont des canaux construits pour ramener l'eau d'une source jusqu'aux champs cultivés.

construire un barrage, parfois très éloignés du périmètre d'irrigation. Une fois la réserve constituée, on amenait l'eau par gravité jusqu'à la parcelle à irriguer.

Les systèmes mécaniques d'irrigation ont commencé avec une poulie et un treuil. Petit à petit des évolutions techniques ont complexifié ces instruments. Par exemple, la Noria des années 1300 est une roue sur laquelle sont fixés de très nombreux seaux permettant une élévation continue de l'eau (Fig. 3).

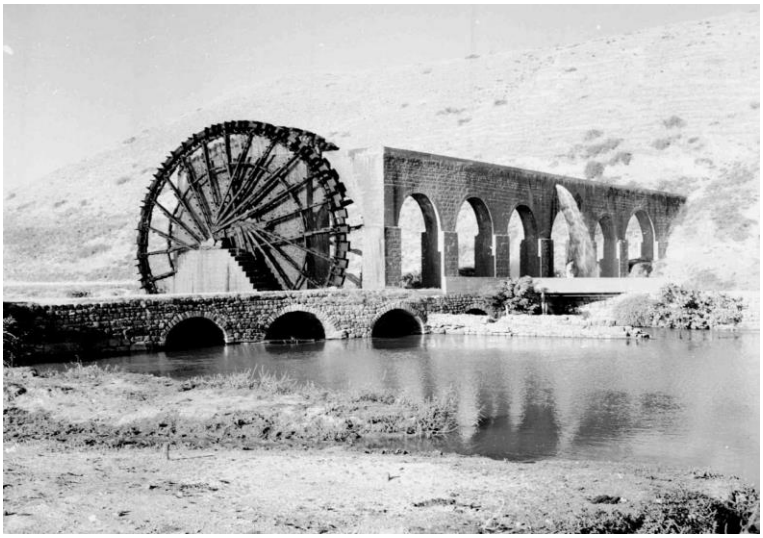


Figure 3. La Noria à Hama en Syrie, sur le fleuve Oronte (source: archeorient.hypotheses.org)

Vinrent ensuite les roues à eau, actionnées à la force des bras ou par des animaux, comme la roue persane (Fig. 4).



Figure 4. Les roues à eau (source : www.yachtmollymawk.com)

Puis viennent les pompes à chapelet et à spirale, la vis d'Archimède et enfin les pompes volumétriques ou centrifuges (Fig. 5, 6 et 7).

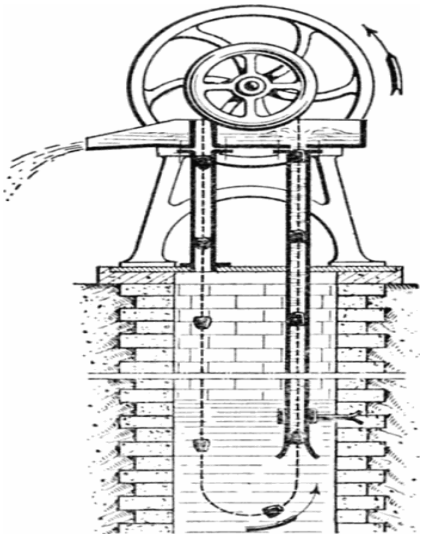


Figure 5. Pompe à chapelet (source : decouverte-bocage-gatinais.fr)



Figure 6. Pompe à piston aspirante (source : photo M. Barakat 2013)

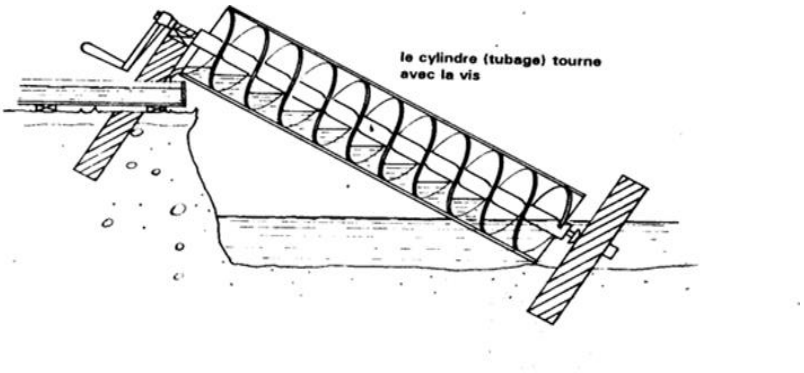


Figure 7. La vis d'Archimède (source : www.fao.org)

Les systèmes mécaniques pour l'irrigation par aspersion n'apparaîtront qu'après l'invention du moteur. A partir de cette époque l'eau a été mise sous pression dans des canalisations, avant de la projeter à travers des orifices, sous forme d'une pluie fine artificielle, à répartition à peu près régulière sur le sol, et pendant un temps déterminé.

Après les deux guerres mondiales, l'irrigation par aspersion s'est fortement développée en Europe, aux Etats Unis et au Proche Orient grâce à la mécanisation de l'agriculture, permettant des apports d'eau conséquents.

A contrario, dès l'Antiquité, on a observé que l'apport d'eau aux plantes à très faible dose et de manière répétée donnait des résultats spectaculaires : des documents attestent l'utilisation de jarres poreuses en terre cuite par les Anciens (période phénicienne) (Fig. 8).

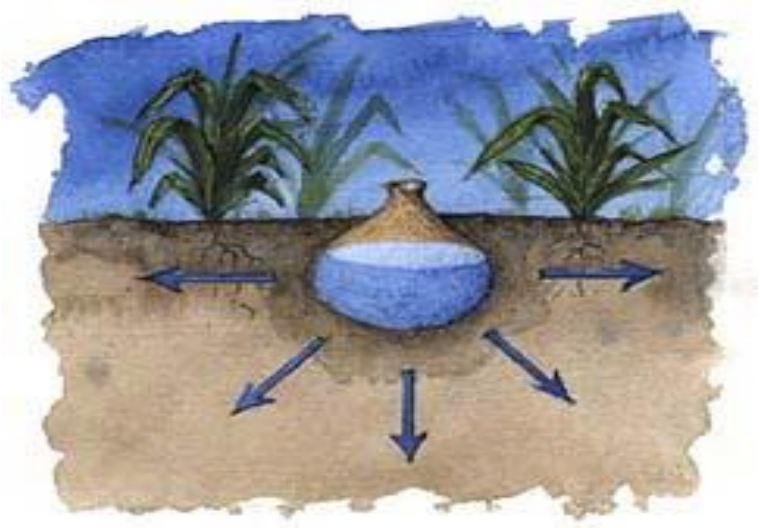


Figure 8. La jarre poreuse (source : www.fao.org)

Les cultivateurs remplissaient les jarres d'eau et celles-ci libéraient pendant plusieurs jours, par suintement, une très faible quantité d'eau (Nicoulaud et al., 1988). Cette technique a d'abord été perfectionnée avec la réalisation de tubes poreux en terre cuite puis de nos jours on utilise des gaines en plastique percées de micropores (Mathieu, 2005).

Quant au système goutte à goutte, c'est l'observation d'un végétal se développant en contexte aride, près d'un réservoir percé dont les gouttes alimentaient une partie des racines, qui en aurait donné l'idée vers 1930[6]. Ce n'est que vers 1970 que les australiens puis les israéliens ont développé la technique d'une manière industrielle.

2. Définition générale de l'irrigation

L'irrigation est la technique qui consiste à délivrer l'eau aux parcelles en complément de celle trouvée dans leur environnement, puis à la répartir de sorte qu'elle soit mise à la disposition des racines des différentes plantes.

La méthode d'irrigation la plus élémentaire consiste à apporter l'eau à chaque plante à partir de la source d'alimentation (puits, canal, rivière) avec un seau ou un arrosoir.

Cette méthode nécessite une main-d'œuvre importante, un travail et un effort très importants : elle ne convient que pour l'irrigation des petits jardins (légumes ou maraîchage), à proximité immédiate du point d'eau.

L'irrigation des grandes superficies exige des méthodes plus perfectionnées. Les trois méthodes les plus couramment utilisées sont l'irrigation gravitaire, l'irrigation par aspersion et l'irrigation localisée.

3. Irrigation gravitaire

L'irrigation gravitaire (ou « irrigation de surface ») consiste à laisser l'eau s'écouler, séjourner sur le sol et puis s'y infiltrer. L'eau peut être amenée par de petits canaux du point le plus haut du terrain jusqu'au pied de la plante, dans un écoulement dû à la gravité. Elle peut aussi être distribuée à l'ensemble du champ, soit par déversement, soit par submersion complète de la zone de culture (irrigation par bassins), soit dans des sillons

[6] **http://dripworks.blogspot.fr/2015/05/drip-tubing-and-history-of-drip.html**

en terre (irrigation par sillons dite "à la raie"), soit par ruissellement à la surface d'une planche d'arrosage (irrigation par planches).

3.1. Irrigation par déversement

L'irrigation par déversement est la méthode traditionnelle d'irrigation des pâturages en pays de montagne, sur des terrains ayant des pentes jusqu'à 50%.



Figure 9. Irrigation par déversement (source : www.fao.org)

Ce mode d'irrigation consiste simplement à faire déborder l'eau de petites rigoles, suivant le plus souvent les lignes de niveaux. À part la nécessité de tracer les rigoles, il n'y a aucun aménagement important du terrain (Fig. 9).

3.2. Irrigation par bassin

Les bassins sont constitués de cuvettes en terre, à fond à peu près plat, entourées de diguettes de faible hauteur. Ces diguettes sont conçues pour empêcher le passage de l'eau dans les champs adjacents (Fig. 10).



Figure 10. Irrigation par bassin (source : www.fao.org)

Cette technique est utilisée, d'une façon générale, pour l'irrigation des rizières sur terrain plat, l'irrigation des terrasses à flanc de coteau ou l'irrigation des arbres fruitiers. Dans ce dernier cas un bourrelet (une petite cuvette) est aménagé autour de l'arbre pour le protéger de l'eau et éviter des maladies (Fig. 11).



Figure 11. Irrigation des arbres par bassin (source : www.fao.org)

Etant donné que la perte d'eau par infiltration est importante, spécialement dans les sols sableux, cette méthode a été largement améliorée par le système californien qui consiste à placer plusieurs conduites enterrées (à 60-80 cm de profondeur), sur lesquels des prises sont fixées pour alimenter chaque bassin (Fig. 12).

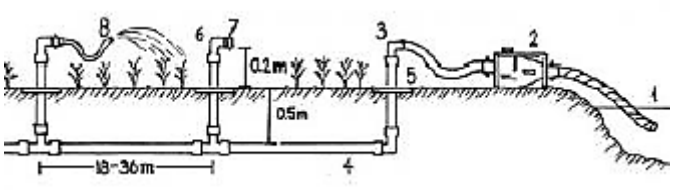


Figure 12. Le système californien d'irrigation (source : eau-agro.com)

3.3. Irrigation à la raie

L'irrigation à la raie consiste à aménager des sillons ou petites rigoles de terre, dans le sens de la pente du terrain, pour transporter l'eau entre les rangées de culture. Les raies doivent être d'autant plus courtes que la perméabilité et la pente sont fortes (Fig. 13).

Cette technique est valable pour l'irrigation de toutes les cultures en lignes et pour toutes les cultures qui ne tolèrent pas la submersion de leur feuillage ou de leur collet sur une longue durée.

C'est la méthode la plus simple mais certainement pas la plus économe concernant l'utilisation de l'eau. Elle est largement améliorée par l'utilisation de siphons[7] (débit connu, dose maîtrisée).



Figure 13. Irrigation à la raie (source: irrigationmuseum.org)

Sur des parcelles suffisamment grandes (au moins 6 ha) avec des raies assez longues (au moins 200 m), l'automatisation de l'irrigation à la raie est possible par la "transirrigation"

[7] **Gaines souples équipées de manchons ou encore de rampes à vannettes.**

de surface ou enterrée. Celle-ci consiste en un tuyau rigide posé en amont de la parcelle selon une pente régulière et percé d'orifices calibrés en face de chaque raie d'irrigation. Le déplacement d'un piston à l'intérieur du tube entraîne automatiquement le déplacement de la main d'eau sur l'ensemble de la parcelle.

3.4. Irrigation par planches

L'irrigation par planches est surtout réservée aux cultures céréalières ou fourragères. Les planches sont de longues bandes de terrain, aménagées en pente douce et séparées par des diguettes (Fig. 14).

L'alimentation en eau des planches est réalisée soit à l'aide de prises d'eau aménagées sur un canal équipé d'une vannette, soit par des siphons. La lame d'eau introduite ruisselle en descendant la pente de la planche, guidée par les diguettes des deux côtés de celle-ci.



Figure 14. Irrigation par planches (source : www.secheresse.info)

En général, l'irrigation gravitaire est la technique la moins économe en eau. Elle peut provoquer une dégradation très prononcée de la structure du sol et exercer une forte pression sur la ressource en eau, avec le risque d'une baisse de rendement des cultures en comparaison avec l'irrigation localisée (Mathieu et Ruellan, 1987).

Malgré ces inconvénients majeurs, ce mode d'irrigation continue à être très répandu avec 90% de surfaces irriguées, en particulier dans les pays en voie de développement (Tiercelin et Vidal, 2006). Son faible coût d'investissement, son fonctionnement simple au niveau de la parcelle et ainsi que son rôle important sur la réalimentation des nappes font

de cette méthode d'irrigation une technique qui est difficilement concurrencée dans l'irrigation des grandes cultures (maïs, canne à sucre, sorgho, tournesol, soja).

4. L'irrigation par aspersion

L'eau est refoulée sous pression dans un réseau de conduites, ensuite elle est diffusée par des asperseurs sous la forme d'une pluie artificielle. Cette technique est déconseillée dans les zones très régulièrement ventées (vents supérieurs à 20-30 km h^{-1}). Elle s'applique surtout avec des eaux non salées, dans les sols de faible profondeur et pas trop perméables. Elle permet aussi de protéger les vergers et vignobles contre le gel, ou de rafraîchir les cultures maraîchères en plein été.

Les premiers réseaux étaient équipés de petits asperseurs fonctionnant sous une pression de 3 à 4 bars. Les asperseurs étaient disposés le long d'une rampe mobile en alliage léger, que l'on déplaçait à la main de poste en poste pour irriguer l'ensemble de la parcelle. Relativement peu coûteux en investissement, ce système était très exigeant en main d'œuvre. Cette méthode d'irrigation est à l'origine de différents types de matériel et de stratégies d'aspersion, décrites ci-après.

4.1. Les couvertures totales

Elles consistent à disposer sur la parcelle, en début de campagne, un quadrillage de rampes de petits diamètres, fixes pendant la saison d'arrosage et déplaçables entre deux saisons. En cours de saison, on déplace manuellement les cannes munies de leurs asperseurs d'un poste à l'autre le long de la rampe (Fig. 15).

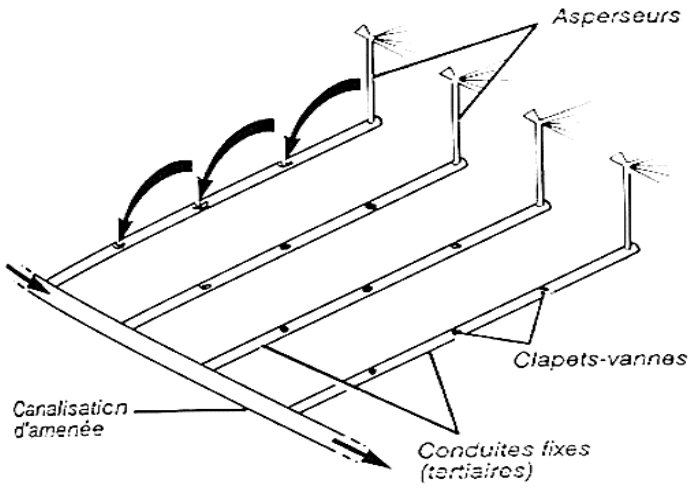


Figure 15. Les couvertures totales (source : www.fao.org)

4.2. Les couvertures intégrales

Le champ est couvert en permanence, durant la saison d'irrigation, non seulement par les canalisations, mais par les cannes et les asperseurs. La seule manipulation à effectuer en cours de saison consiste alors à ouvrir et fermer des vannes, qui alimentent successivement les rampes ou ensembles de rampes constituant chaque poste d'arrosage (Fig. 16).

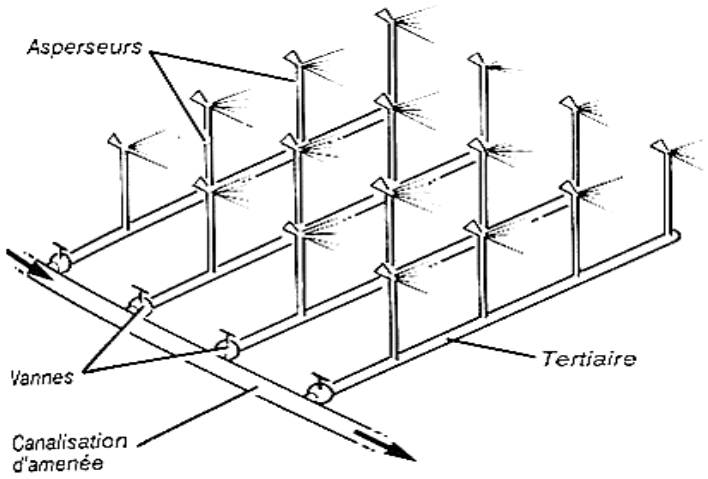


Figure 16. Les couvertures intégrales (source : www.fao.org)

4.3. Les systèmes de rampes pivotantes et frontales

Le système de rampe pivotante consiste en une tour centrale à pivot. Celle-ci est reliée à une série de tours secondaires par une conduite munie d'arroseurs (Fig. 17). Les tours secondaires sont équipées de moteurs électriques ou hydrauliques et disposées en cercle autour de la tour centrale. Le rayon du dispositif peut mesurer de 100 à 500 m, ce qui permet d'irriguer jusqu'à 75 ha. L'ensemble nécessite un capital d'investissement élevé. Les débits sont de l'ordre de 250 à 850 $m^3 h^{-1}$ pour une pression de 6 bars.

Le système de rampe frontale diffère de la rampe pivotante par le fait que toutes les tours sont mobiles et le déplacement se fait latéralement.

L'alimentation en eau se fait soit par le pompage d'une fosse creusée au milieu ou au bord du champ, soit par un tuyau flexible.



Figure 17. Les rampes tournantes (source : gettyimages.fr)

4.4. Les enrouleurs

Les enrouleurs font partie des systèmes d'irrigation mécanisés. Ils sont apparus en France sur le marché de matériel d'arrosage aux environs de 1970.

L'enrouleur est un appareil extrêmement mobile et souple d'utilisation qui a été rapidement adopté par les agriculteurs. Il est facilement et rapidement déplaçable d'une parcelle à une autre, d'une culture à une autre. Il permet un arrosage en bandes parallèles et juxtaposées : « l'enrouleur est immédiatement opérationnel, c'est l'outil idéal d'intervention rapide en irrigation. Dans les régions où le printemps est sec, les irrigants l'utilisent pour arroser et sauver des semis.

L'appareil est composé de quatre parties principales, décrites ci-dessous (Fig. 18).

- *Le canon.* C'est un gros asperseur dont le jet atteint une grande distance (25 à 65 m environ) avec une pression très élevée à sa buse (5 à 8 bars). Il est porté par un chariot à roues, ou sur un traîneau glissant sur sol. Son réglage en hauteur permet de s'adapter même avec les cultures de haute taille (maïs) afin de ne pas endommager les cultures à arroser.
- *Le châssis tracté.* Il est muni de roues et de son système d'accrochage au tracteur, il porte la bobine ainsi que le moteur hydraulique et les organes de contrôle du fonctionnement de l'appareil.
- *La bobine (ou tambour).* C'est sur elle qu'est enroulé le tuyau semi-rigide d'irrigation en polyéthylène extrudé, opaque à la lumière et résistant aux pressions élevées, de 8 bars ou plus. Le diamètre extérieur du tuyau est la référence et c'est

lui qui distingue les différentes catégories d'enrouleurs. Par contre, ses caractéristiques hydrauliques sont intimement liées à son diamètre intérieur. Le tuyau est totalement déroulé sur la parcelle à arroser, son ré-enroulement est réalisé par action hydraulique sur la bobine, en utilisant la pression de l'eau dans le réseau.

- *Le traîneau (ou chariot)*. Il porte le canon d'arrosage ou une rampe d'arrosage comportant plusieurs asperseurs. On trouve parfois aussi des buses 360°, utilisées pour diminuer l'intensité de la pluie artificielle et la grosseur des gouttes, évitant ainsi la formation d'une croûte de battance à la surface du sol. Comme tous les asperseurs, ces canons sont équipés d'une buse avec un angle d'arrosage généralement compris entre 210 et 220°. Si la pression est insuffisante, le canon produit de grosses gouttes projetées au loin et l'arrosage est insuffisant au voisinage du canon. En revanche, une pression trop élevée provoque une pulvérisation fine au détriment de la portée et un accroissement de la sensibilité au vent.

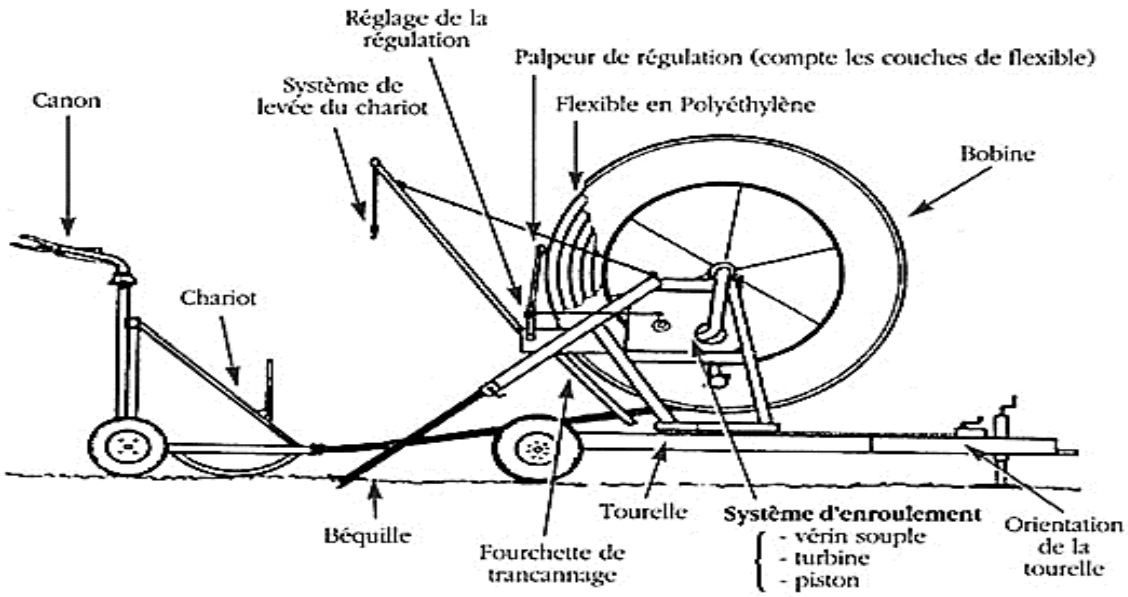


Figure 18. Le canon d'arrosage (source : tice.agroparistech.fr)

L'arrosage commence en plaçant l'enrouleur en tête des parcelles, le canon d'arrosage est ensuite tiré à l'extrémité de la bande en déroulant le tuyau d'alimentation de la bobine. La rotation du tambour se fait souvent par un moteur hydraulique qui est constitué soit d'un vérin, soit d'une turbine.

5. L'irrigation localisée

L'enjeu affiché pour l'irrigation localisée est d'augmenter la productivité de l'eau et de limiter les impacts sur l'environnement.

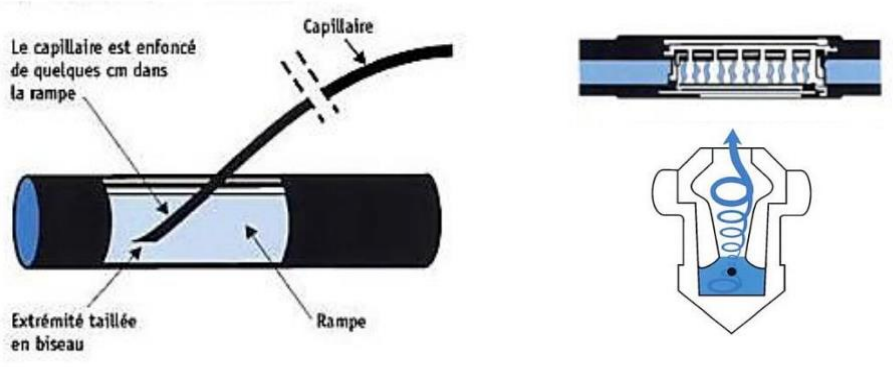
5.1. Définition et concept

L'irrigation localisée est une technique d'arrosage innovante qui consiste à apporter l'eau dont a besoin la plante, en faible dose, à une fréquence élevée et au plus près des racines. Cette méthode d'irrigation, contrairement à l'irrigation par aspersion ou à l'irrigation gravitaire, repose sur l'humidification partielle du volume de sol colonisé par le système racinaire. Le fait de distribuer l'eau au voisinage de la plante limite les pertes d'eau par évaporation (par réduction de la surface évaporante), par percolation ou/et par lessivage. Dans l'irrigation localisée, le transport de l'eau est assuré par des gaines poreuses ou par des canalisations en polyéthylène, appelées rampes. La distribution est assurée par des distributeurs, insérés dans les rampes à des intervalles généralement constants et qui peuvent être de plusieurs types : goutteurs, diffuseurs ou micro-asperseurs, ajutages calibrés, décrits ci-dessous.

- **Les goutteurs**

Les goutteurs ont un faible débit compris entre 1 et 8 L h^{-1} sous une pression de 1 bar (i.e., une charge de 10 m de colonne d'eau).

Il existe des goutteurs à circuit uniforme (les plus anciens) et des goutteurs à circuit non uniforme. On peut également trouver des goutteurs turbulents à circuit court où l'eau sort du goutteur sous forme d'un jet fin qui doit être brisé. Actuellement, les goutteurs de ce dernier type sont peu nombreux car ils sont très sensibles au colmatage (Fig. 19).



Les goutteurs à circuit uniforme (capillaire) Les goutteurs à circuit non uniforme

Figure 19. Les goutteurs à circuit uniforme et non uniforme (source : agronomie.info)

- **Les diffuseurs et les micro-asperseurs**

Ils arrosent de petites surfaces de sol, sous forme de taches ; c'est une technique intermédiaire entre le goutte à goutte et l'aspersion. Elle permet de s'affranchir des inconvénients liés aux caractéristiques hydrodynamiques du sol (par exemple, forte conductivité et faible capillarité) ou à la présence de micropores dus à la fissuration ou à la faune du sol (Fig. 20).



Figure 20. Le micro-asperseur (source : blogdesagrumes.blogspot.fr)

- **Les ajutages**

Ils alimentent en eau la surface du sol avec des débits relativement élevés, sous forme de petites flaques ou de petits bassins à partir desquels l'eau s'infiltre progressivement.

En irrigation localisée, l'eau pénètre la surface du sol et se diffuse ensuite en écoulements non saturés, verticalement et latéralement, par l'action combinée des forces gravitationnelles et capillaires. Il en résulte un bulbe d'humidification de forme elliptique dont la forme dépend de la dose apportée, de la fréquence des irrigations et aussi du type de sol (Oron et al., 1999).

5.2. Les méthodes d'irrigation localisée

La pénurie d'eau sous climat méditerranéen et dans les régions arides ou semi-arides a conduit au développement de plusieurs méthodes d'irrigation localisées.

5.2.1. L'irrigation goutte à goutte de surface

Dans l'irrigation en goutte à goutte de surface, l'eau est délivrée en un point sur la surface du sol à l'aide d'une conduite perforée ou portant plusieurs goutteurs insérés dans les rampes, à des intervalles généralement constants (Fig. 21).



Figure 21. L'irrigation goutte à goutte de surface (source : photo M. Barakat 2012).

5.2.2. L'irrigation goutte à goutte enterré

Dans l'irrigation en goutte à goutte enterré, les gaines sont enterrées à de faibles profondeurs (30-40 cm pour le maïs) (Fig. 22). La zone d'enracinement est alimentée par les remontées capillaires de l'eau sortant d'une gaine poreuse ou d'une gaine perforée.

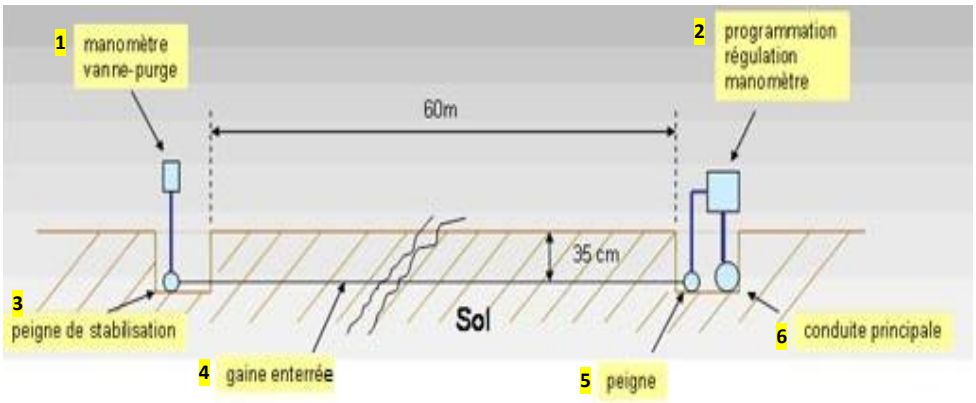


Figure 22. Coupe longitudinale d'une gaine enterrée à 35 cm avec les équipements de contrôle du système : (1) manomètre vanne-purge, (2) programmateur de régulation du manomètre, (3) peigne de stabilisation, (4) gaine enterrée, (5) peigne de connexion et (6) une conduite principale (source : P. Rosique 2011).

5.3. Avantages de l'irrigation localisée

Ce mode d'irrigation présente beaucoup d'avantages, listés ci-dessous.

- Economie d'apport d'eau : l'application localisée utilise moins d'eau pour satisfaire les besoins hydriques de la plante. Généralement, les pertes par percolation, évaporation et ruissellement sont moindres par rapport à d'autres systèmes d'irrigation, ce qui permet d'augmenter la productivité de l'eau et de l'azote (Ayars et al., 1999).
- Ni la surface du sol ni le feuillage ne sont mouillés, ce qui limite le risque de développement des adventices et des maladies ou des parasites. De plus, les parties aériennes des cultures restent épargnées en cas d'irrigation avec de l'eau saline, ce qui permet d'éviter les brûlures par le sel (Thompson et al., 2009).
- Faible consommation d'énergie en comparaison au canon enrouleur, en raison de la faible consommation d'eau et des faibles pressions de service (Lamm, 2002).
- Possibilité de pratiquer simultanément l'irrigation et les opérations d'entretien du sol, notamment quand les gaines sont enterrées.
- Un avantage propre à l'irrigation localisée enterrée est la possibilité d'utiliser une source d'eau saline. Cela est dû au fait que le sol est maintenu à une humidité élevée autour des gaines et que les sels sont concentrés vers les contours du bulbe d'humidification, en partie hors de la portée des racines (Phene et al., 1991), limitant donc la concentration des sels dans la zone d'enracinement principale (Oron et al., 1999). Toutefois, l'irrigation localisée doit être équipée d'un système de filtration en adéquation avec la qualité de l'eau, et d'une pompe doseuse pour la fertigation et les différents traitements obligatoires de lutte contre le colmatage et l'intrusion des racines (chlore et acide nitrique).
- Peu de main d'œuvre nécessaire si une automatisation des arrosages est envisagée. En revanche, il ne faut pas négliger l'entretien et le contrôle régulier des équipements. D'autre part, le suivi hydrique du sol par des capteurs est conseillé pour éviter la sur-irrigation qui entraînerait le drainage et lessivage des intrants injectés (l'inconvénient de la méthode étant l'impossibilité d'un contrôle visuel direct).
- Possibilité d'apporter à la fois l'eau et les intrants sans contraintes climatologiques (vent violent) ou liées à la présence d''adventices trop développées au plus proche des plants et de leurs racines (Sakellariou-Makrantonaki et al., 2002).

5.4. Inconvénients de l'irrigation localisée

L'irrigation localisée n'est pas la solution miracle. Elle ne peut pas remplacer les autres systèmes d'irrigation et présente un certain nombre d'inconvénients.

- Le colmatage des goutteurs par des débris physiques, des éléments chimiques et du matériel biologique. Ce phénomène entraîne un manque d'uniformité de distribution de l'eau et des dommages sérieux aux cultures. A ce titre, il est recommandé de se doter de moyens de contrôle des pressions dans les conduites (Oron et al., 1991).
- Le fait qu'une partie de la zone potentielle d'enracinement de la culture soit humidifiée. Cela a pour conséquence de limiter le développement du système racinaire à la zone humidifiée, ce qui pourrait réduire la résistance de certaines cultures au vent (Lamm, 2002).
- La limitation du volume de sol mouillé (goutte à goutte de surface) ou l'absence d'eau en surface (goutte à goutte enterré) peut entraîner un stress hydrique grave et rendre la levée de la semence difficile, voire impossible. Cet effet est augmenté par l'absence de pluies ou lorsque la réserve d'eau du sol est épuisée dans la zone concernée par l'irrigation. Ces risques suggèrent de prévoir un complément comme l'irrigation par aspersion au semis. Une autre solution consiste en l'installation des gaines à une profondeur peu importante, de l'ordre de 10-15 cm (Ayars et al., 1999).
- La concentration des sels vers les contours des bulbes d'humidification ou à la surface du sol tend à épargner les racines, mais ces sels accumulés peuvent être mis en contact avec les racines lors d'une averse importante et causer des sérieux dommages aux cultures.
- Le développement végétatif peut être hétérogène en cas d'écartement trop important entre les gaines (ex: 160 cm pour le maïs), ce qui cause un "effet de vague" bien visible à l'œil nu.
- La non-biodégradabilité des matériaux utilisés impose une récupération coûteuse des gaines à la fin de la durée de vie (assez méconnue) des gaines.
- Un contrôle minutieux et le repérage des gaines sont deux conditions pour éviter l'hétérogénéité du développement de la culture : un mauvais positionnement des

gaines par rapport à la culture donne également lieu à une hétérogénéité "en vagues" bien visibles sur les photographies du champ.

- Les coûts d'investissement et de mise en place sont assez élevés, rapportés à une durée de vie souvent limitée à quelques années.
- Des cavités se forment parfois à la surface du sol à cause d'un débit trop important, responsable d'un phénomène (érosif) d'affouillement.
- Si la quantité d'eau déversée est supérieure aux besoins de la plante, la zone mouillée se trouvant en dessous de chaque goutteur s'allonge vers le bas et peut finir par former une « colonne d'eau » qui draine l'eau excédentaire hors d'atteinte des racines.

6. Méthodes alternatives d'irrigation

D'autres méthodes d'irrigation à petite échelle peuvent aussi être appropriées pour la maîtrise de l'eau dans les petites exploitations agricoles. Il s'agit de déverser l'eau directement dans la rhizosphère par l'intermédiaire de réceptacles poreux ou perforés. Ceux-ci diffusent l'eau lentement à travers leurs parois, dans le sol environnant.

6.1. Capsules ou vases poreux

Cette méthode poursuit le même objectif que les jarres poreuses enfouies dans des fosses peu profondes creusées autour de la plante (Fig. 8, 23). Elle consiste à placer des pots en argile poreux ou en céramique microporeuse dans le sol près de la plante, dont les cols dépassent de quelques centimètres (2-5 cm) la surface du sol. Cette méthode ne permet néanmoins d'irriguer qu'un petit nombre de plantes autour de chaque pot en argile.



Figure 23. Capsule poreuse (source : www.oyas-environnement.com)

6.2. Manchons de plastique perforés

Il s'agit de fines gaines perforées, enfouies verticalement dans le sol à proximité de la plante, de sorte que l'ouverture affleure à la surface du sol. Cette méthode permet de diminuer l'évapotranspiration et de limiter ainsi le développement des mauvaises herbes car la couche supérieure du sol n'est pas irriguée (Fig. 24). Le principal avantage de cette méthode d'irrigation est son faible coût, ce qui la rend efficace pour l'agriculture "familiale" dans les zones arides.

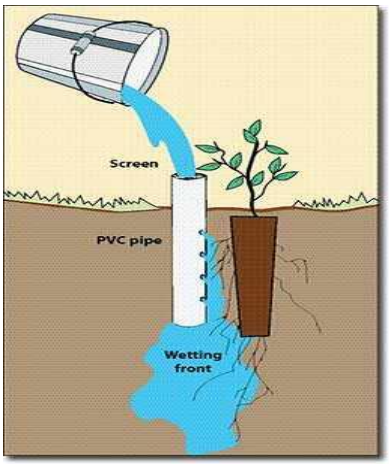


Figure 24. Manchon de plastique perforé (source : www.fao.fr)

Références du chapitre I

Ayars, J.E., Phene, C.J., Hutmacher, R.B., Davis, K.R., Schoneman, R.A., Vail, S.S., Mead, R.M., (1999). Subsurface drip irrigation of row crops: a review of 15 years of research at the Water Management Research Laboratory. Agricultural Water Management 42, 1–27.

Haynes, R.J., (1985). Principles of fertilizer use for trickle irrigated crops. Fertilizer Research 6, 235–255.

Lamm, F.R., (2002). Advantages and disadvantages of subsurface drip irrigation. Presented at the International Meeting on Advances in Drip/Micro Irrigation, Puerto de La Cruz, Tenerife, Canary Islands, p. 13.

Mathieu, B., (2005). Une démarche agronomique pour accompagner le changement technique. Cas de l'emploi du traitement herbicide dans les systèmes de culture à sorgho repiqué au Nord-Cameroun, thèse de doctorat de l'Ina-PG, Paris, p. 232.

Mathieu C., Ruellan A., (1987) - Evolution morphologique des sols irrigués en région méditerranéenne semi-aride : l'exemple de la Basse Moulouya (Maroc). Cahiers ORSTOM Pédologie, 13, 3-25

Mmolawa, K., Or, D., (2000). Root zone solute dynamics under drip irrigation: A review. Plant and Soil 222, 163–190.

Nicoulaud, M., DeLataille, R., (1988). La maîtrise de l'irrigation sous-pression. Paris : Agri-Nathan international, p. 91.

Niste, M., Vidican, R., Pop, R., Rotar, I., (2013). Stress Factors Affecting Symbiosis Activity and Nitrogen Fixation by Rhizobium Cultured in vitro. ProEnvironment/ProMediu 6.

Oron, G., DeMalach, Y., Gillerman, L., David, I., Rao, V.., (1999). Improved saline-water use under subsurface drip irrigation. Agricultural Water Management 39, 19–33.

Phene, C.J., Davis, K.R., Hutmacher, R.B., Bar-Yosef, B., Meek, D.W., Misaki, J., (1991). Effect of high frequency surface and subsurface drip irrigation on root distribution of sweet corn. Irrigation Science 12, 135–140.

Sakellariou-Makrantonaki, M., Kalfountzos, D., Vyrlas, P., (2002). Water saving and yield increase of sugar beet with subsurface drip irrigation. Global Nest: The International Journal 4, 85–91.

Soussi, M., Ocaña, A., Lluch, C., (1998). Effects of salt stress on growth, photosynthesis and nitrogen fixation in chick-pea (Cicer arietinum L.). J. Exp. Bot. 49, 1329–1337.

Tiercelin, J.R., Vidal, A., (2006). Traité d'irrigation. Tec & Doc, p. 1266.

Thompson, T., PANG, H., LI, Y., (2009). The Potential Contribution of Subsurface Drip Irrigation to Water-Saving Agriculture in the Western USA. Agricultural Sciences in China 8, 850–854.

Valé, M., Mary, B., Justes, E., (2007). Irrigation practices may affect denitrification more than nitrogen mineralization in warm climatic conditions. Biol Fertil Soils 43, 641–651.

Zahran, H.H., (1999). Rhizobium-Legume Symbiosis and Nitrogen Fixation under Severe Conditions and in an Arid Climate. Microbiol. Mol. Biol. Rev. 63, 968–989.

Chapitre II

Site expérimental et mesures in situ

Dans cette partie du travail, nous présentons les trois campagnes expérimentales menées pendant trois ans (2013, 2014 et 2015) sur le site de Lavalette (Fig. 25). La première année d'expérimentation avait pour objectif de quantifier le devenir de l'azote en l'absence de culture sous l'irrigation goutte à goutte enterré. Les résultats obtenus en 2013 étaient difficiles à analyser en raison du nombre réduit de mesures, mais ils ont servi à définir le protocole expérimental pour les deux années suivantes (2014 et 2015). Ce protocole a été dessiné pour quantifier et analyser les flux hydriques et azotés sous les deux méthodes d'irrigation exploitées, ainsi que pour tester les effets de différentes pratiques de fertilisation. Les données collectées lors de ces deux campagnes expérimentales ont été utilisées afin de modéliser le devenir de l'azote à l'aide du modèle HYDRUS (Chapitre V).

1. Site expérimental

1.1 Emplacement du site

Les campagnes de terrain ont été effectuées sur le site expérimental de Lavalette, situé au nord de Montpellier (France), vers la confluence du Lez et de la Lironde, à une latitude de 43.38° N et une longitude de 3.50° E. Les parcelles d'expérimentation couvrent une superficie de 2.4 ha, dont 1.6 ha sous labour (Fig. 25, parcelle Ouest) et 0.8 ha en Semis sous Couvert Végétal (SCV) (Fig. 25, parcelle Est). La parcelle Ouest a été réservée pour les stratégies agronomiques proposées dans le cadre de ce travail.



Figure 25. Vue aérienne de la station expérimentale de Lavalette (source : google earth).

1.2. Caractéristique du sol

Situé en rive droite du Lez, le site de Lavalette est constitué par des sols d'origine colluvio-alluviale profonds avec une dominante alluviale pour la parcelle d'étude (Ruelle, 1995). Ce sont des sols de type brun peu évolué. La texture de sol est limoneuse à limono-argileuse en se rapprochant du Lez avec un pH proche de la neutralité sur l'ensemble du profil. Ce type de sol présente de bonnes qualités agronomiques avec en particulier une réserve utile élevée, proche de 170 mm. Une nappe phréatique est située à environ 5 m sous la surface du sol donc ne participe pas à l'alimentation en eau de la culture.

1.3. Climat

Le site de Lavalette est équipé d'une station météorologique Cimel. Celle-ci permet de suivre automatiquement au pas de temps journalier les données de température de l'air, de vent (direction et intensité), de pluie (intensité et cumul), de rayonnement et d'humidité relative de l'air. Située au nord de Montpellier à environ 15 km de la mer Méditerranée, la station expérimentale est soumise à un climat méditerranéen avec des températures moyennes de 6°C en Janvier et de 22°C en juillet. Le total moyen des précipitations est d'environ 750 mm pour une période de trois ans consécutifs (2013-2015) avec un maximum observé au mois de septembre, sous forme d'épisodes intenses.

2. Dispositifs expérimentaux

La Fig. 26 indique le plan de la parcelle expérimentale lors de la saison 2013, avec un découpage en trois zones A, B et C. La zone A comportait essentiellement les expérimentations en goutte à goutte enterré avec différents écartements (80, 120 et

160 cm) entre les gaines et différents niveaux d'apport (ETM et 50% ETM, i.e. de manière à satisfaire complètement ou à demi les besoins du maïs, ETM signifiant évapotranspiration maximale). La zone B n'était pas irriguée, ce qu'on appelle aussi un "traitement pluvial". La zone C était dédiée à l'aspersion avec ou sans apport d'azote (0N indiquant l'absence de fertilisation) et pour différents niveaux d'irrigation (de nouveau ETM et 50% ETM).

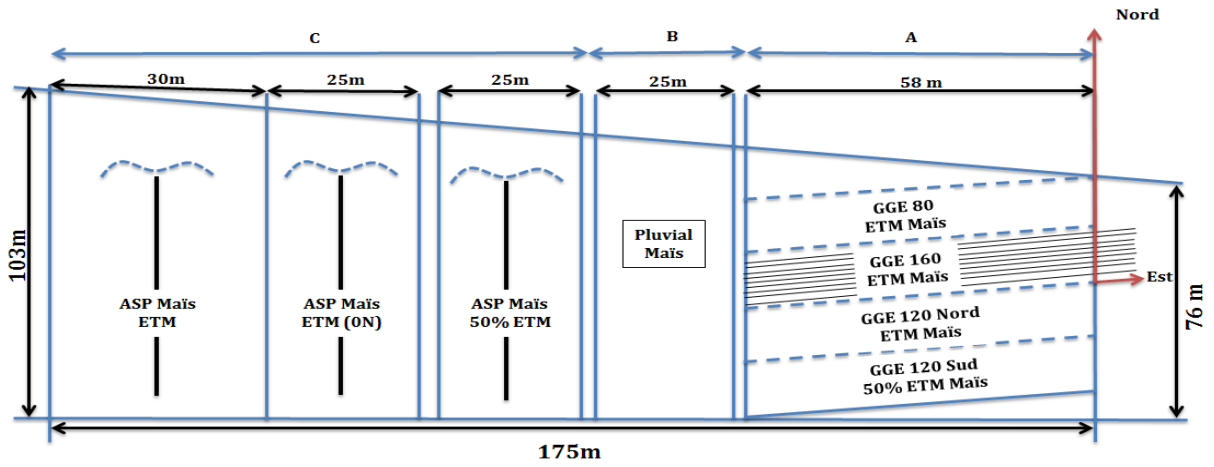


Figure 26. Schéma du dispositif de Lavalette en 2013 avec 4 placettes irriguées par goutte à goutte enterré (zone A), une placette sans irrigation (pluvial, zone B) et 3 placettes irriguées par aspersion (zone C).

En 2014/2015 (Fig. 27) un nouveau plan d'utilisation de la parcelle a été décidé, avec la définition de nouvelles zones A, B et C. Un nouveau réseau d'irrigation goutte à goutte enterré a été installé dans la zone A, sur une surface totale d'environ 1 ha (= 9609,6 m²). Le réseau de goutte à goutte enterré permet de tester deux écartements entre les gaines (160 et 80 cm). L'aspersion par couverture intégrale a été mise en place sur la zone B en 2014, où elle a été remplacée par le canon en 2015. La zone C a été gardée sans irrigation pendant toute la durée de cette étude.

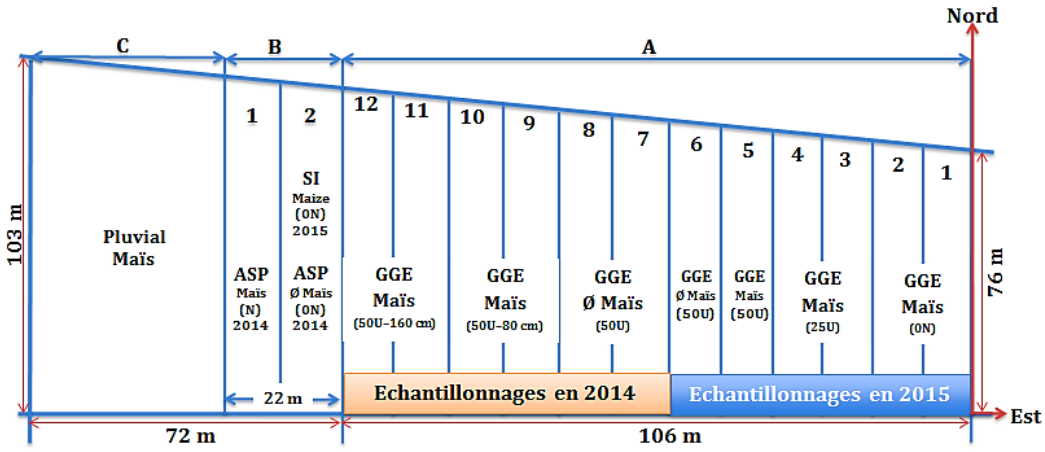


Figure 27. Schéma du dispositif de Lavalette en 2015 avec12 placettes irriguées par goutte à goutte enterré (zone A), 2 placettes irriguées par aspersion (zone B) et une placette sans irrigation (zone C).

3. Les systèmes d'irrigation exploités sur le site de Lavalette

Le suivi du transfert des nitrates sous maïs a été effectué pour trois techniques d'irrigation détaillées ci-dessous, dont deux appartiennent à la catégorie aspersion (ASP) et la troisième est le goutte à goutte enterré (GGE).

3.1. Couverture intégrale

Ceci concerne les placettes B1 et B2 en 2014 (Fig. 26). Par couverture intégrale on désigne des rampes sur lesquelles les asperseurs sont montés. Toutes les rampes sont fixes durant la campagne d'irrigation. Une fois ce système mis en route, l'irrigation ne demande que l'ouverture et la fermeture des vannes qui alimentent le réseau. L'eau est délivrée sur la totalité de la parcelle avec une pression de fonctionnement de 4 bars (Fig. 28).



Figure 28. Couverture intégrale par aspersion, sur les placettes B1-2 de la Fig. 27 (photo M. Barakat, 2015)

3.2. Canon enrouleur

Ceci concerne les placettes B1 et B2 en 2015 (Fig. 26). Le canon enrouleur est la technique d'irrigation la plus répandue pour l'arrosage des cultures en France avec près de 70% des périmètres irrigués. Elle consiste à apporter l'eau aux cultures sous forme de pluie artificielle grâce à un canon asperseur installé sur un chariot et relié à un enrouleur via un tuyau en polyéthylène souple. Lors de la mise en route de l'irrigation, un système mécanique permet de rembobiner le tuyau en fonction de la pression délivrée (6 à 8 bars) sans aucune intervention. Pour chaque bande à arroser, la bobine est placée au début de la bande et le tube en polyéthylène avec le chariot se déplacent jusqu'à l'autre extrémité (Fig. 29).



Figure 29. Irrigation au canon enrouleur sur le site de Lavalette (photo M. Barakat 2015)

3.3. Goutte à goutte enterré

Ceci concerne les placettes A7, A8, A11 et A12 en 2014, puis A3, A4, A5 et A6 en 2015 (Fig. 26). Dans l'irrigation GGE, il s'agit d'apporter l'eau fréquemment en petites quantités, avec de faibles pressions, au plus près des racines, grâce à un réseau de gaines enterrées à 35 cm de profondeur. Ces gaines sont équipées de goutteurs espacés de 50 cm pouvant délivrer un débit de 0.8 L h^{-1} pour une pression comprise entre 0.5 et 1 bar (Fig. 30). Dans le cadre de ce travail, deux écartements entre les gaines sont étudiés : 80 cm et 160 cm.



Figure 30. Irrigation goutte à goutte enterré sous le maïs, placette A5 (photo M. Barakat, 2015)

A l'échelle de la parcelle, l'irrigation GGE requiert une station de tête équipée (1) d'une vanne manuelle, (2) d'un système de filtration qui inclut un régulateur de débit et des

filtres à sable, (3) d'une pompe doseuse, (4) d'une cuve cylindrique ou un récipient de 500 L de volume pour préparer et stocker la solution mère, (5) d'un filtre à tamis et d'un manomètre pour mesurer la pression d'eau à l'entrée de chaque placette (Fig. 31).

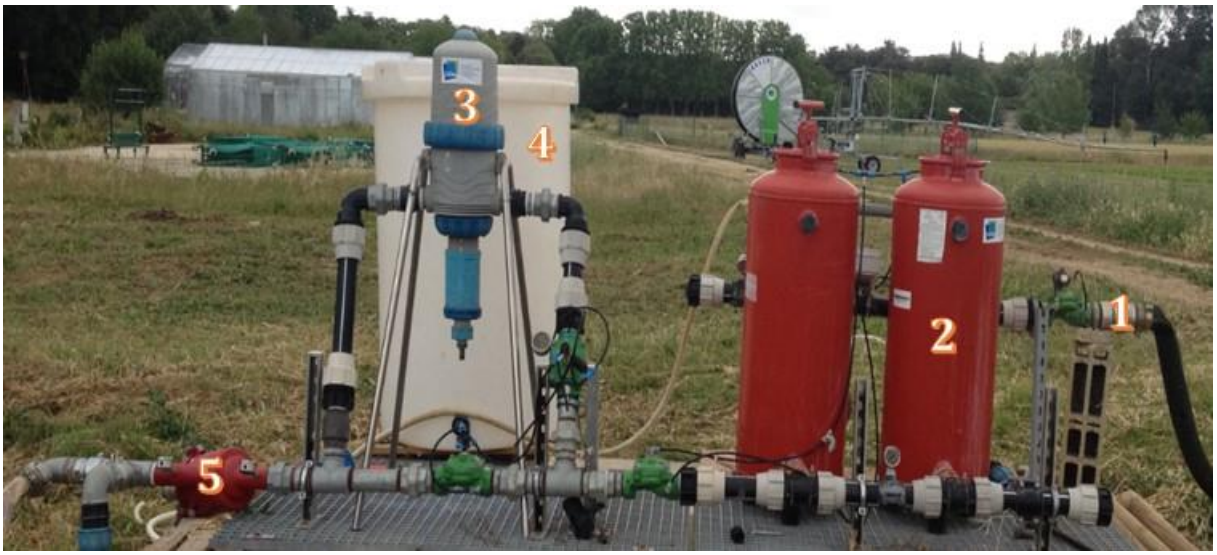


Figure 31. Station de tête du goutte à goutte enterré avec (1) une vanne manuelle, (2) un système de filtration qui inclut un régulateur de débit et des filtres à sable, (3) une pompe doseuse, (4) une cuve cylindrique et (5) un filtre à tamis (photo P. Rosique, 2014).

4. Protocole expérimental

Cette partie présente la stratégie l'échantillonnage liée au suivi expérimental pendant les saisons culturelles 2014 et 2015. Les différentes étapes de ce protocole sont détaillées ci-dessous (Tableau 1). Toutes les observations et mesures expérimentales sont présentés dans le chapitre V avec les résultats de modélisation des flux hydriques et azotés par HYDRUS.

4.1. Reliquats azotés

Avant le semis, nous avons effectué plusieurs prélèvements de sol afin de déterminer les reliquats azotés en sortie d'hiver. Ces prélèvements ont eu lieu dans la zone A (placettes A1-A2 d'une part, placettes A3 jusqu'à A11 d'autre part, voir Tableaux 1 et 2) pour le GGE, dans la zone B pour ASP et dans la zone C en pluvial. Lors de chaque prélèvement de sol, un échantillon composite a été préparé pour 4 "tranches de profondeurs" (0-30, 30-60, 60-90 et 90-120 cm).

4.2. Irrigation de levée

Après le semis, une irrigation de levée au canon a été effectuée pour humidifier la surface du sol, sur toutes les placettes y compris celles équipées en GGE, car la remontée capillaire depuis les gaines enterrées à 35 cm de profondeur n'est pas suffisante pour atteindre les jeunes semences.

4.3. Evolution de l'état hydrique du sol

Tout d'abord, nous avons déterminé l'humidité initiale du sol avant le semis par la méthode gravimétrique. Ensuite, le suivi de l'évolution de l'humidité du sol a été réalisé au moyen d'un humidimètre neutronique pour les placettes A3 à A11 dans la zone A (2013, 2014 et 2015) et pour la placette B2 pour deux années consécutives (2014 et 2015).

Dans chacune des placettes irriguées en GGE trois tubes d'accès neutronique ont été installés verticalement dans le sol, à trois distances (10, 30 et 50 cm) de la gaine enterrée. Sur les placettes irriguées en ASP, deux tubes d'accès neutronique ont été situés à deux positions (rang et inter-rang).

Les mesures de l'humidité ont été effectuées au pas de 10 cm à partir de la surface du sol jusqu'à 150-180 cm de profondeur, à quatre dates (1, 2, 4 et 7 jours) après chaque cycle de fertigation, mais à des pas de temps variables pour le reste de la saison (afin de piloter l'irrigation). De plus, des mesures d'humidité pondérale ont été faites lors de l'installation des tubes d'accès des sondes à neutron. Ces mesures sont utilisées pour valider les mesures neutroniques et étalonner donc les différents équipements (sonde à neutron et sonde TDR). Il faut noter que nous avons abandonné la mesure des variations de charge hydrique à cause d'un mauvais fonctionnement de quelques tensiomètres au mercure.

Les placettes A1, A2 et B1 (traitements 0N sans azote, Fig. 26), ont été équipées par deux stations Campbell, positionnées directement au-dessus de la gaine dans les placettes irriguées par GGE et sur l'inter-rang dans celle irriguée par ASP. Les mesures effectuées par ces stations sont présentées en détail et utilisées dans le chapitre III.

4.4. Evolution du stock d'azote dans le sol

Le suivi de la distribution des nitrates sous les deux méthodes d'irrigation a été fait à partir de prélèvements de sol sur l'ensemble de la parcelle. Ces prélèvements étaient très

variables en nombre (environ 1500 échantillons en 2014 et près de 1800 échantillons en 2015) suivant la stratégie d'étude proposée pour chaque année.

Comme indiqué précédemment pour les mesures hydriques, les teneurs en azote ont été mesurées pour l'irrigation GGE à partir des prélèvements de sol réalisés au pas de 10 cm, à trois distances (10, 30 et 50 cm) de la gaine et à quatre intervalles de temps (1, 2, 4 et 7 jours) après la fertigation. Pour les sites irrigués par ASP les prélèvements ont été faits de la même façon mais sur deux positions seulement (rang et inter-rang).
Sur les prélèvements effectués en 2014, nous avons envoyé 300 échantillons au Cirad US49 pour valider les différentes stratégies de fertilisation utilisées (voir chapitre V). Plus de 1200 échantillons ont dû être jetés, faute de financement. En 2015, le manque récurrent de financement nous a conduit à mettre au point une méthode manuelle d'analyse des échantillons, détaillée dans le chapitre IV. Cette méthode est simple à mettre en œuvre et efficace pour déterminer la concentration en nitrates de la solution du sol. Cependant, elle exige beaucoup de temps pour chaque échantillon (le temps de passage dans la colonne de réduction), ce qui implique une réduction du nombre d'échantillons qu'il est possible d'analyser, en comparaison avec la méthode automatisée utilisée au Cirad de Montpellier. Nous avons réussi à analyser tous les échantillons de 2015, ce qui a nécessité de préparer les échantillons soi-même avant de les passer au spectromètre. La préparation des échantillons nous permet de réduire le coût unitaire d'analyse de 24 € à 4 € environ.

4.5. Evolution de l'azote total dans la plante

Les mesures concernant la teneur en azote dans les plantes ont été effectuées à deux dates afin de comparer les effets de stratégies d'apport impliquant différentes doses, lors de la saison 2015 (les résultats de modélisation associés se trouvent dans le chapitre V).

4.6. Détermination de la production de matière sèche

A la récolte, trois échantillons de maïs ont été prélevées sur une surface de 1 m^2 sur chacune des placettes concernées par les expérimentations. Ces échantillons sont réservés pour déterminer le poids sec de la biomasse aérienne (épis et tige-feuille-rafle).

Tableau 1 - Vue d'ensemble des campagnes expérimentales de 2013 et 2014

Année	Traitement	Irrigation	Fertilisation	Placette	Date et/ou action		Fig.
2013	Sans maïs	GGE 160	Fertigation	Zone A[8]	29/07	Installation tubes à neutron	26
					05/08	2ème cycle de fertigation[9]	
					06/08	Prélèvements 1 j après fertigation	
					07/08	Prélèvements 2 j après fertigation	
					09/08	Prélèvements 4 j après fertigation	
					12/08	Prélèvements 7 j après fertigation	
2014	Préparation du site pour la campagne expérimentale	ASP	–	Zones A et B	12/04	Mesure d'humidité pondérale	27
				Zones A, B et C	14/04	Mesure de reliquats azotés	
					15/04	Semis	
					25/04	Irrigation de levée	
				A1, A2, B1	28/04	Installation station Campbell	
				A7, A8, A9, A10, A11, A12	29/04	Installation tubes à neutron	
				B1 et B2	mai	Désherbage chimique	
	Transfert d'azote Maïs	ASP	Fertilisation	B1 et B2	16/07	Epandage	
				B1	17/07	Prélèvements 1 j après irrigation	
				B1	18/07	Prélèvements 2 j après irrigation	
				B1	20/07	Prélèvements 4 j après irrigation	
				B1	23/07	Prélèvements 7 j après irrigation	
	Transfert d'azote Maïs ET Sans Maïs	GGE 160	Fertigation	A7, A8, A11, A12	17/07	Fertigation	
					19/07	Prélèvements 1 j après irrigation	
					20/07	Prélèvements 2 j après irrigation	
					22/07	Prélèvements 4 j après irrigation	
					25/07	Prélèvements 7 j après irrigation	
	Minéralisation Sans Maïs	ASP	–	B2	Prélèvements tous les 15 jours		
	Minéralisation Sans Maïs	GGE		A1 et A2			

[8] **Placette sans maïs dans la zone GGE 160 ETM Maïs**
[9] **Le premier cycle de fertigation n'a pas été documenté**

Tableau 2 - Vue d'ensemble de la campagne expérimentale de 2015

2015	0N Minéralisation avec Maïs	GGE 160	–	A1, A2	Prélèvements tous les 15 jours		27
	0N Minéralisation avec Maïs	ASP	–	B2			
	Transfert d'azote Maïs ET Sans Maïs	GGE 160	Fertigation	Zones A, B et C A1, A2, B1, B2 A7, A8, A9, A10, A11, A12	14/04	Les reliquats azotés	
					15/04	Le semis	
					25/04	Irrigation de levée	
					28/04	Installation de station Campbell	
					29/04	Installation tubes à neutron	
	Transfert d'azote Maïs	GGE 160	Fertigation	Zone B	mai	Désherbage chimique	
					1er cycle		
					13/07	Prélèvements 1 j après fertigation	
					14/07	Prélèvements 2 j après fertigation	
					16/07	Prélèvements 4 j après fertigation	
					19/07	Prélèvements 7 j après fertigation	
					2ème cycle		
					30/07	Prélèvements 1 j après fertigation	
					31/07	Prélèvements 2 j après fertigation	
					02/08	Prélèvements 4 j après fertigation	
					05/08	Prélèvements 7 j après fertigation	
	Transfert d'azote Maïs	ASP	Epandage	B2	12/07	1er cycle de fertigation	
					13/07	Prélèvements 1 j après fertigation	
					14.07	Prélèvements 2 j après fertigation	
					16.04	Prélèvements 4 j après fertigation	
					19.07	Prélèvements 7 j après fertigation	

Chapitre III

Influence of the irrigation technique and strategies on the nitrogen cycle and budget: A review

Bien que le cycle de l'azote soit un sujet de recherche populaire en contexte agricole, aucun article ne permettait d'établir les relations supposées entre les systèmes d'irrigation et les différentes transformations de l'azote dans le sol.

- Les nitrates peuvent être perdus dans le sol par la lixiviation si la quantité d'eau apportée par l'irrigation dépasse la capacité au champ (Kroeze et al., 2003).
- Même une augmentation limitée de l'humidité du sol peut conduire à une dénitrification importante (Davidson, 1992).
- L'utilisation de nouvelles techniques d'apport des nitrates (la fertigation) est plus efficiente que leur application conventionnelle (Valé et al., 2007).
- L'eau apportée par irrigation est souvent le principal contrôle du mouvement des nitrates et de leur disponibilité pour les différentes transformations liées au cycle de l'azote (Sánchez-Martín et al., 2008).
- La minéralisation nette est plus importante en sols irriguées que celle en conditions non-irriguées (Valé et al., 2007).

L'objectif de ce premier article est de souligner la relation entre les différentes méthodes d'irrigation d'une part et les flux et transformations de l'azote d'autre part.

Influence of the irrigation technique and strategies on the nitrogen cycle and budget: a review

Mohammad Barakat[a,b,c], Bruno Cheviron[a,†], Rafael Angulo-Jaramillo[b]

[a] IRSTEA, UMR G-EAU "Gestion de l'Eau, Acteurs et Usages", 361 rue Jean-François Breton, BP 5095, 34196 Montpellier Cedex 5, France

[b] Université de Lyon, UMR 5023 Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés, CNRS, ENTPE, Université Lyon 1, 3 rue Maurice Audin, 69518 Vaulx-en-Velin, France.

[c] Department of Rural Engineering, Faculty of Tishreen, Lattakia, Syria.

† Corresponding author: bruno.cheviron@irstea.fr

Abstract

The objective of this review is to remedy the lack of knowledge about the expected relationship between the irrigation techniques (flood irrigation, sprinkler irrigation, surface and subsurface drip irrigation) and the nitrogen transformations (fixation, mineralization, immobilization and nitrification) or fluxes (denitrification, runoff, volatilization and lixiviation) in agricultural contexts. This study investigates thus the various controls on the nitrogen cycle and budget, either site-specific (soil C/N ratio, pH, salinity, texture and temperature) or corresponding to deliberate strategies in water and nitrogen management.

The comprehensive view gained from the gathered literature elements identifies the local variations (in space and time) of soil water content profile as both the strongest control and the control most directly related to the irrigation technique and to the practitioner's decisions. In the overall picture, flood irrigation and sprinkler irrigation are the techniques in which most transformations or fluxes may be enhanced or reduced, also with the risks associated with non-optimal practices.

By contrast, subsurface drip irrigation seems the technique with the lesser unwanted impacts. Besides the academic aspects (bringing together scattered literature elements) a possible outcome of this review is thus to facilitate decision-making regarding the choice and/or use of irrigation-fertilization techniques and strategies (doses and scheduling) for

given agro-pedoclimatic contexts, also for combined agricultural production, economic and site preservation objective.

1. Introduction

Increased anthropic pressure and growing food demands exerted on cultivated areas have lead to the intensification of agriculture (Lambin et al. 1991, Vitousek et al. 1997, Keys & McConnell 2005, Konstantinou et al. 2006, Galloway et al. 2008) at the fear of pending runaway Earth contaminations, with the necessity to identify and promote sustainable practices (Tilman et al. 2011, Alexandratos & Bruinsma 2012). Excessive nutrient and pesticides applications represent one of the most common causes of degradation in surface water and groundwater quality, which makes risk assessment a crucial part of any agricultural management at the plot, catchment and basin scale (Flury 1993, Reichenberger et al. 2007, Rivett et al. 2008, Long & Sun 2012). In particular, a comprehensive view of the merits and drawbacks of irrigation and fertilisation strategies requires modelling techniques as well as knowledge of the technological and legal angles (van Grinsven et al. 2012, Sutton et al. 2011). The site-specific optimisation of practices is a wide concern for stakeholders, farmers, agronomists, soil physicists and biogeochemists, in which the first degrees of freedom are the choice of the irrigation technology and technique (FI: flood irrigation, SI: sprinkler irrigation, DI: drip irrigation, SDI: subsurface drip irrigation).

To start from well-established knowledge, soil nitrogen availability has been long known to influence crop and root growth thus to have a direct impact on crop yield, attributing increased death rates for young individuals and leaf yellowing to insufficient nitrogen uptake (Lloyd 1993, Niste et al. 2013). Conversely, an over-supply of nitrogen into the root zone may also decrease crop yield by stimulating stem growth to the detriment of root growth, grain filling or sugar content, leaving the non-absorbed nitrogen available for lixiviation (Zahran 1999, Thorburn et al. 2003a). Excessive nitrogen applications are also prone to inhibit the action of the nitrogenase enzyme responsible for the biological fixation of nitrogen (Muthukumarasamy et al. 1999). In complement, any purposive fertigation strategy should also limit, if not suppress, the nitrogen losses towards the atmosphere through denitrification (i.e. the multi-stage conversion of nitrates to nitrogen gas) and ammonia volatilization (Kroeze et al. 2003). The decisions

on how, when and where to apply nitrogen should thus arise from a fine understanding of the nitrogen cycle, including the estimation of mineralization rates (Cabrera 1993, Fierer & Schimel 2002, Jackson et al. 2008) and that of plant needs at best (Soussi et al. 1998, Mmolawa & Or 2000, Valé et al. 2007). In all genericity, both crop productivity and the nitrogen budget also depend on the timing of fertigation (or fertilization) within irrigation events (Ebrahimian et al. 2013), the type of molecules used (Hanson et al. 2006), soil properties (Zotarelli et al. 2007), the location of the fertilizer (Siyal et al. 2012), the splitting of nitrogen doses (Yoseftabar et al. 2012) and the frequency of nitrogen inputs (Gheysari et al. 2009).

In a schematic overview, Fig.1 shows the quantities of interest for the current study, especially the nine forms under which nitrogen appears in the nitrogen cycle (Robertson & Groffman 2007), sorted here by decreasing oxidation states: nitrate (NO_3^-, +5), nitrogen dioxide (NO_2, +4), nitrite (NO_2^-, +3), nitric oxide (NO, +2), nitrous oxide (N_2O, +1), dinitrogen gas (N_2, 0), ammonia (NH_3, -3), ammonium (NH_4^+, -3) and organic nitrogen ($R\text{-}NH_2$, -3). The dinitrogen gas represents about 90% of the total nitrogen but the molecule must be split by lightning (into ammonium) or by symbiotic fixation to become available for plants, and the activity of the nitrogen fixing bacteria depend on the local soil conditions: organic matter, water content and temperature (Zahran 1999). The organic nitrogen also necessitates the action of soil microorganisms (mineralization into ammonium) prior to its absorption by plant roots (Jackson et al. 2008). In addition to ammonium or direct symbiotic fixation, nitrates are the last source of nitrogen for the plant, through root uptake. Finally, fertilization consists in the input of ammonium or nitrates, while lixiviation designates the loss of nitrates by drainage.

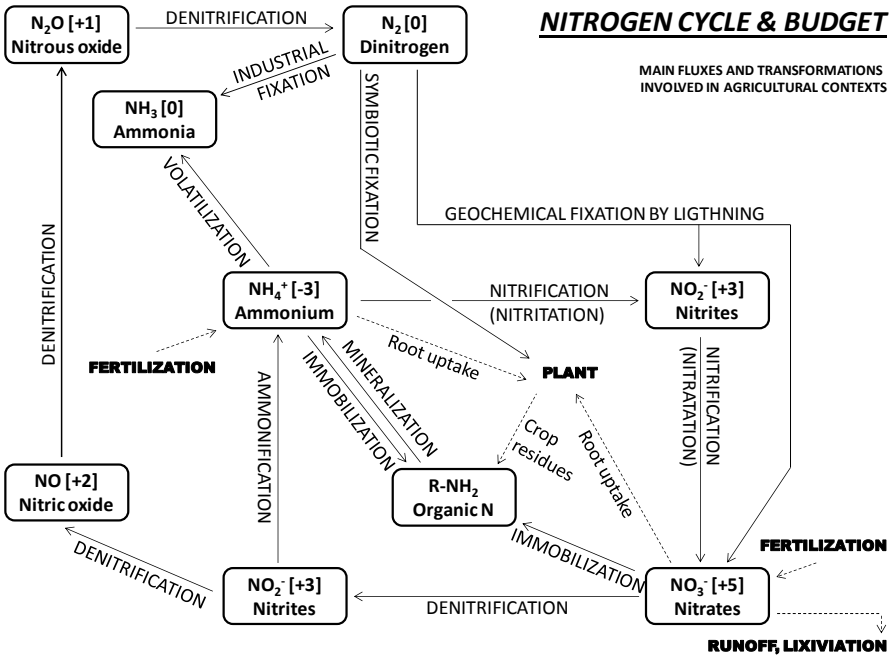


Figure 32 - Schematic overview of the nitrogen cycle and budget, showing the main nitrogen fluxes and transformations in agricultural contexts.

Quite surprisingly, there is still a need for the literature to investigate how several elements of the nitrogen cycle may be influenced by the chosen irrigation and fertilization technique but also strategy (e.g. dates of application, doses applied, formulation of the fertiliser) with an expected impact on the nitrogen budget, thus on the environmental footprint, as well as on several key performance indicators: crop yield, water and nitrogen use efficiency and operating profitability. To our knowledge, these issues have not been explicitly addressed so far, even when discussing the global agricultural or environmental perspectives associated with the nitrogen cycle, as affected by human activities (Bassirirad 2000, Galloway et al. 2004, Gruber & Galloway 2008, Ward 2012, van Groeningen et al. 2015). The purpose of the current study is to remedy this lack by collecting results, controversies, recommendations and open questions, from existing but dispersed information. This review aims at eventually outlining the influence of the irrigation techniques and associated fertilization strategies on the nitrogen transformations (cycle) and fluxes (budget) through the direct or indirect effects of irrigation techniques on the controlling factors for nitrogen availability for plant roots (soil C/N ratio, pH, salinity, temperature, texture, water content) and nitrogen fate (fertilizer location and scheduling of applications, soil texture, types of molecules used, water content).

This review leans on 177 literature sources to suggest or establish the existence of a correlation between the irrigation techniques and soil nitrogen transformations or fluxes, focusing on these described in Fig. 32. Prior to more detailed investigations in the manuscript, several popular clues of this correlation may be sought in that (i) nitrogen losses by lixiviation occur when irrigation reaches its peak in intensity (Kroeze et al. 2003), (ii) even a slight increase in soil water content may drastically enhance denitrification (Davidson 1992), (iii) the use of new fertigation techniques makes nitrogen application far more efficient (Valé et al. 2007), (iv) irrigation water is the driving force for nitrogen movements, availability and transformation (Sanchez-Martin et al. 2008) and (v) nitrogen mineralization is stronger in regularly irrigated soils than in non-irrigated or irregularly irrigated soils (Valé et al. 2007). These points and other effects of the irrigation techniques and strategies are discussed in this review, first from the angle of nitrogen transformations in Section 2 (fixation, immobilization, mineralization and nitrification) then from that of nitrogen fluxes in Section 3 (denitrification, lixiviation, runoff and volatilization). Section 4 provides elements of discussion around a typical agricultural situation assembled from literature elements then Section 5 offers a brief conclusion on the expected first-order effects of the irrigation technique (and associated fertilization) on the nitrogen cycle and budget.

2. Influence of the irrigation techniques on nitrogen transformations

2.1. Nitrogen fixation

2.1.1. Basics of nitrogen fixation

Nitrogen fixation is the process by which the stable dinitrogen atmospheric gas (N_2 in Fig. 32) is converted into "bioaccessible" forms of nitrogen available for biosynthesis. The process can be represented by the following reaction:

$$2N_2(g) + 8H^+ + 8e^- \rightarrow 2NH_3 + H_2 \quad (1)$$

Fixation occurs either in non-biological (fixation by lightning or industrial fixation) or biological (symbiotic fixation) or processes (Galloway et al. 1995, Zahran 1999).

- Geochemical fixation by lightning leads to NO_x ions, from the break of the triply bonded N_2 molecules and their recombination with atmospheric oxygen (Fowler et al., 2013).

- Industrial fixation of gaseous N_2 through the Haber-Bosch process for the production of ammonia under high temperature and pressure conditions writes in simplified form:

$$N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3 \quad (2)$$

- Symbiotic fixation necessitates the action of the nitrogenase enzymes. Several species of rhizobium bacteria, living in the nodules of plant roots (ex. Leguminosae family) near the soil-atmosphere interface, perform nitrogen fixation in the course of their metabolism.

2.1.2. Influence of the irrigation technique on nitrogen fixation

Table 3 lists the soil variables (soil pH, salinity, temperature and water content, by alphabetical order) that control symbiotic nitrogen fixation, with the suggested influence of the irrigation techniques, mainly through their effects on soil water content.

Table 3. Soil variables that control symbiotic nitrogen fixation, with the expected influence of the irrigation technique (FI: flood irrigation, SI: sprinkler irrigation, DI: drip irrigation, SDI: subsurface drip irrigation). Besides additional comments, this in influence is noted (+) for "favorable" and (-) for "unfavorable".

Data			Influence on fixation			
Variable	Effects	References	FI	SI	DI	SDI
pH	Acidic (pH<4) or alkaline (pH>8) soils decrease nodulation thus nitrogen fixation. Significant water movements tend to flush the anions.	Bordeleau & Prévost 1994, Kumar & Shivay 2008	Local pH decrease due to large water flows (-)		$pH_{DI} < pH_{SDI}$ (-) (+)	
Salinity	Adverse: limits bacterial activity, population and efficiency on the existing nodules, prevents the development of new nodules. Noticeable differences between irrigation techniques.	Berstein & Ogata 1966, Sanchez-Diaz et al. 1982, Lindström et al. 1985, Hafeez et al. 1988, Soussi et al. 1998, Silva & Uchida 2000, Rao et al. 2002, Lamm et al. 2007, Garg & Chandel 2011, Bruning & Rozema 2013.	More salinity in the root zone (-)	Less salinity in the root zone (+)		More salinity on the edge of the root zone (-)
Temperature (T)	T<13 or T>35°C inhibits nitrogenase activity thus reduces nodulation	Bordeleau & Prévost 1994, Rice et al. 1995, Bell et al. 1998, Zahran	$T_{FI}<T_{SI}<T_{DI}<T_{SDI}$ (-) (-) (+) (+)			

	and fixation. Optimum T close to 30°C. T is affected by the irrigation technique.	1999, Colaizzi et al. 2004, Lü et al. 2015.			
Water content	Dry conditions decrease the rhizobia population thus reduce nitrogen fixation. Pronounced drying-wetting cycles are also unfavorable to fixation.	Kozlowski 1976, Albrecht et al. 1984, Sinclair et al. 1987, Sellstedt et al. 1993.	(-)	(+)	(-)

Differences between irrigation techniques (in this paper, FI: flood irrigation, SI: sprinkler irrigation, DI: drip irrigation, SDI: subsurface drip irrigation) in water amounts and delivery are likely to have temporary thermal effects thus to influence nitrogen fixation. Fixation occurs only in appropriate, medium aeration and water stress conditions (Albrecht et al. 1984), which makes high water contents and the occlusion of soil micropores adverse conditions for nitrogen fixation. By contrast, the pronounced drying/wetting cycles and especially the rather dry conditions typical of SI are said favorable to nitrification, thus to the production of enough nitrates to inhibit nodulation (Kozlowski 1976). This confirms a more general trend that high nitrates contents (possibly emanating from an independent source, as mineral fertilization) decreases the efficiency of symbiotic fixation (Muthukumarasamy et al. 1999, Thorburn et al. 2003a). The nearly-saturated conditions taking place immediately after the peak water content under SI have also been reported to induce a flash of microbial activity which enhances denitrification (Laher & Avnimelech 1980) thus also creates unfavorable conditions for fixation. Under SDI, the existence of water stress at low water contents in the upper soil layer may affect the symbiosis between legumes and rhizobia: the fixation of atmospheric nitrogen becomes less efficient, the population of nodules is reduced and so is the nitrogenase activity (Sinclair et al. 1987, Sellstedt et al. 1993). By contrast, the frequent water application in DI maintains soil humidity at a level favorable for nitrogen fixation.

From literature, a significant interplay seems to exist between (i) the irrigation technique, (ii) nitrification and mineralization with effects on soil pH and (iii) fixation as influenced by soil pH (thus indirectly by the cited nitrogen transformations). Soil

acidification is caused by the nitrification of excess fertilizers, which lowers soil pH (Malhi et al. 1998, Han et al. 2015). Nitrification and mineralization rates are controlled by microbial activity which in turn is typically related to soil temperature and water content (Kozlowski 1976, Colaizzi et al. 2004). The various irrigation techniques have specific effects on soil moisture content and temperature fields, thus expectedly on nitrification and mineralization rates, then in turn on soil pH and on nitrogen fixation. For example, the saturated or nearly-saturated conditions found below FI and SI inhibit nitrification thus decrease soil pH and nitrogen fixation (Haynes & Swift 1987, Parchomchuk et al. 1993). Under DI, the nitrification rate decreases in the vicinity of the emitter but nitrification still occurs outside the saturated domain. By contrast, water application through SDI enables higher pH values near the soil surface than under DI (Bora & Ray 2015). Other literature sources (e.g. Kumar & Shivay 2008) suggest that soils tend to be more acidic under FI or SI due to higher leaching of the bases though this likely depends on soil's parent material and organic content. The reported case is that of basic elements held by soil colloids and organic matter, which leave the exchange sites on the clay particles through crop uptake or leaching, to be replaced by the hydrogen ions. As less water is generally used for DI and SDI, the expected trend is that less basic elements will be replaced, resulting in more fixation.

A consensus exists on the adverse effects of salinity on nitrogen fixation, either from the phenomenological point of view (e.g. Lindström et al. 1985 on Rhizobium behavior) or in studies dedicated to specific crop varieties (e.g. Berstein & Ogata 1966 for soybean and alfalfa, Hafeez et al. 1988 for Vigna Radiata, Soussi et al. 1998 and Rao et al. 2002 for chickpea or Garg & Chandel 2011 for Cajanis Cajan). The cases of agricultural (Sanchez-Diaz et al. 1982) and tropical soils (Silva & Uchida 2000) have been handled. Microirrigation for crop production (Lamm et al. 2007) and some modern challenges of "saline agriculture" (Bruning & Rozema 2013) have also been recently addressed.

As for salinity, the role of temperature on nitrogen fixation (and on most of nitrogen transformations) is well know from thermodynamics (energy of activation) and has been widely documented, for various species (e.g. Bell et al.1998 for Lettuce, Colaizzi et al. 2004 for cotton and Lü et al. 2015 for winter wheat) and experimental conditions (e.g. Bordeleau & Prévost 1994 and Zahran 1999 for semi-arid contexts or Rice et al. 1995 for low root temperature).

2.2. Nitrogen mineralization

2.2.1. Basics of nitrogen mineralization

The gross N-mineralization is the decomposition of large organic nitrogen molecules (proteins, amino sugars and amino acids present in organic matter, plant residuals or organic manure, noted R-NH_2 in Fig.1) into inorganic nitrogen by heterotrophic bacteria using carbon as their source of energy. Mineralization produces ammonium (NH_4^+, Ammonification in Eq.3) which is then converted to nitrate (NO_3^-) by Nitrification (Eq.4).

$$NH_3 + H_2O \leftrightarrow NH_4^+ + OH^- \quad (3)$$

$$NH_4^+ \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO_3^- \quad (4)$$

These two forms allow nitrogen uptake by plants roots. Immobilization (also organization or reorganization) is the adverse process, consisting for example in the oxidation of carbonic substrates. The difference between the nitrogen amount that issues from gross N-mineralization and that organized by soil microorganisms is the net mineralization depending on the activity or inactivation of the heterotrophic bacteria.

2.2.2. Influence of the irrigation technique on nitrogen mineralization

Table 4 lists the soil variables (soil C/N ratio, pH, salinity, temperature, texture and water content, by alphabetical order) that control symbiotic nitrogen mineralization or immobilization, with the suggested influence of the irrigation techniques (nitrogen immobilization is the subject of the next subsection), mainly through their effects on soil water content.

Table 4. Soil variables that control nitrogen mineralization or immobilization, with the expected influence of the irrigation technique (FI: flood irrigation, SI: sprinkler irrigation, DI: drip irrigation, SDI: subsurface drip irrigation). Besides additional comments, this influence is noted (+) for "favorable", (-) for "unfavorable" while (0) indicates "no expected significant effect on the process".

Data			Influence on mineralization			
Variable	Effects	References	FI	SI	DI	SDI
C/N	C/N<25 favors mineralization but C/N>25 favors immobilization. High lignin contents allow	Haynes 1986, Fox et al. 1990, Aoyama 1991, Janssen 1996, Qian & Schoenau 2002, Bengtsson et al. 2003, Osemwota et al.	Expected higher (-)		(0)	Expected lower (+)

	mineralization for high C/N ratios.	2004, Robertson & Groffman 2007, Sparling et al. 2015.				
pH	Acid soils unfavorable for microorganisms and mineralization. Significant water movements tend to flush the anions.	Fu et al. 1987, Kumar & Shivay 2008, Cheng et al. 2013.	Local pH decrease due to large water flows (-)		$pH_{DI} < pH_{SDI}$ (-) (+)	
Salinity	Excessive surface fertilization causes salinity issues that reduce mineralization.	Rietz & Haynes 2003, Han et al. 2015	(0)	(+)	(0)	(-)
Temperature (T)	Mineralization is inactive for T<5°C, optimal for 25<T<35°C. T is affected by the irrigation technique.	Stevenson 1986, Bell et al. 1998, Wang et al. 2000, Dalias et al. 2002, Colaizzi et al. 2004, Trasar-Cepeda et al. 2007, Lü et al. 2015.	$T_{FI}<T_{SI}<T_{DI}<T_{SDI}$ (-) (-) (+) (+)			
Texture	Air circulation in sandy or silty soils is convenient for microorganisms thus for mineralization (unlike clayey soils).	Verberne et al. 1990, Hassink et al. 1993.	(0)			
Types of N molecules	Immobilization is higher with ammonia	Vitousek & Andariese 1986, Recous et al. 1990, Azam et al. 1993, Burger & Jackson 2003.	(0)			
Water content	High θ values favor mineralization while saturation or too low θ values are unfavorable. However, flashes of mineralization occur during soil desaturation, for	Birch 1958, Myers et al. 1982, Kieft et al. 1987, Skopp et al. 1990, Cabrera 1993, Sierra 1997, Franzluebbers 1999, Pulleman & Tietema 1999, Wang et al. 2001, Fierer & Schimel 2002, Neve & Hofman 2002, Bengtsson	(-)	(+)		(-)

	near-saturation levels.	et al. 2003, Fierer et al. 2003, Thorburn et al. 2003, Osemwota et al. 2004, Agehara & Warncke 2005, Mikha et al. 2005, Miller et al. 2005, Valé et al. 2007, Khalil 2008, Xiang et al. 2008, Borken & Matzner 2009, Ouyang & Li 2013.			

Mineralization was found optimum in presence of enough water in soil pores (Cabrera 1993, Fierer & Schimel 2002, Valé et al. 2007) either close to field capacity (Myers et al. 1982, Osemwota et al. 2004) or for water contents between 65 and 75% of it (Agehara & Warncke 2005) when the near-saturation and saturation states were thought to decrease mineralization as they deprive soil microorganisms of the oxygen they need (Skopp et al. 1990, Neve & Hofman 2002, Borken & Matzner 2009). By contrast, soil microorganisms show a minimal level of activity for severe water depletion though mineralization has not been reported to completely cease, even near the permanent wilting point (Sierra 1997, Neve & Hofman 2002). An expected corollary is that the combined water content and aeration conditions convenient for mineralization are more easily met in rather coarse soils than in clayey soils (e.g. Verberne et al. 1990, Hassink et al. 1993) which outlines the possible effect of soil texture (plausibly a second-order effect though, or only to be considered in conjunction with the influence of the irrigation techniques on water content).

Precisely, the frequent application of relatively small amounts of water is characteristic of DI and aims at maintaining soil water contents compatible with easy root water uptake. This, in turn, ensures humidity conditions favorable for microbial activity and mineralization (Thorburn et al. 2003b, Khalil 2008). On the contrary, the less frequent applications of far higher water amounts result in high-magnitude perturbations of soil moisture conditions, in the form of severe drying-wetting cycles, whose extreme water content values are both reported adverse to mineralization (Thorburn et al. 2003a, b). However, “flashes of mineralization” have been observed during the drying-wetting cycles of sprinker irrigation (Birch 1958, Franzluebbers 1999, Fierer & Schimel 2002,

Fierer et al. 2003, Mikha et al. 2005) and related to sharp increases in the number and activity of microorganisms, during short time intervals following the peak in water content. Several hypotheses have been put forward to explain these flashes.

- Very low water contents induce very strong matric potentials for which microbial activity is drastically reduced: soil microorganisms accumulate organic and non-organic solutes in their cells to balance the local potential conditions. The next moisture increase (irrigation or precipitation) causes the quick release of most of these trapped solutes into the soil solution, leading to this "flash of mineralization" or "mineralization pulse" (Fierer et al. 2003, Xiang et al. 2008).

- A complementary explanation invokes the perturbation of soil aggregates by the drying-wetting cycles. The mechanical effects of quick and intense moisture increases likely leads to the release of the organic matter trapped in the macro and micro soil aggregates. This increase would also be responsible for the desorption of the organic matter from clayey soil horizons (Kieft et al. 1987, Franzluebbers 1999, Bengtsson et al. 2003, Miller et al. 2005, Ouyang & Li 2013).

The C/N ratio, i.e. carbon mass divided by nitrogen mass, directly acts upon the mineralization, immobilization and nitrification of soil nitrogen. Low C/N ratios (C/N<25) favor mineralization through their high mineral nitrogen content while high C/N ratios (C/N>25) enhance nitrogen immobilization by microorganisms. This negative correlation between C/N ratios and mineralization has been widely observed (Janssen 1996, Qian & Schoenau 2002, Bengtsson et al. 2003) though plants with high lignin content may exhibit non-negligible mineralization rates even at high C/N ratios (e.g. Aoyama 1991). However, the degradation of lignin into polyphenols reduces mineralization as these assemble into complex forms with plant proteins and amino-acids. In such cases, lignin content is often used as a proxy for mineralization besides or instead of the C/N ratio (Fox et al. 1990, Osemwota et al. 2004). In complement, a positive correlation has been outlined between the nitrogen concentration in plants prior to their burying in soils and the mineralization rates subsequently obtained (Haynes 1986) in absence of any strong concentration in lignin or polyphenols (Stevenson 1986, Fox et al. 1990, Osemwota et al. 2004). The cited literature suggests that the expected C/N ratio tends to be lower under SDI than under DI, SI and FI because SDI induces lower water contents in the superficial soil horizons where most of microbial activity takes place. This is a consequence possibly drawn (though

extrapolated) from differences in C/N ratios observed by Sparling et al. (2015) between irrigated and non-irrigated soils.

Besides the C/N ratio, the nitrogen dose applied is expected to have an effect on soil pH and salinity also (Han et al. 2015), thus on mineralization too. This effect varies with the positioning of the fertilizer: salinity issues appear when using SI and surface fertilizers, possibly reducing the microbial activity. Conversely, the injection of fertilizers in solution with SDI is less prone to reduce the microbial activity (Rietz & Haynes 2003). Variations in the pH of soil solution also control mineralization, the optimal level being neutral or slightly basic, as acidity is clearly unfavorable to microbial activity thus to mineralization (Fu et al. 1987, Cheng et al. 2013).

Soil temperature also exerts a strong control on microbial activity, thus on mineralization, often said maximal between 25 and 35°C. The doubling of microbial activity for any 10°C-increase above 5°C has been reported (Dalias et al. 2002, Trasar-Cepeda et al. 2007) as well as the existence of the 5°C-threshold under which mineralization cannot take place (Stevenson 1986). These elements are coherent with the expected increase of activity of the enzymes involved in the degradation of organic matter for temperatures between 30 and 50°C (e.g. Guntinas et al. 2012). As previously said, the irrigation method very likely affects soil physical properties such as the soil temperature (Lü et al. 2015) and a paper mentions field conditions in which the monitored soil temperature was most often higher for DI than for SI which ensures more favorable conditions for mineralization (Wang et al. 2000). Evett et al. (2005) reported smaller soil temperature fluctuations and warmer near-surface temperatures for SDI than for DI, attributing the observed differences to stronger evapotranspiration rates (and the associated cooling effect) under DI than SDI, owing to higher average water contents. Again, the extrapolation to other irrigation techniques seem possible, resulting in $T_{FI}<T_{SI}<T_{DI}<T_{SDI}$, in coherence with Bell et al. (1998) and Colaizzi et al. 2004).

Soil texture is also known to influence mineralization processes: sandy soils and silts a priori favor mineralization because their aerated structure is prone to ensure sufficient oxygen availability for soil microorganisms. By contrast, clayey soils tend to prevent air circulation thus to inactivate mineralization processes. Moreover, the sorption of organic matter on clay particles or sheets reduces its availability for mineralization (Verberne et al. 1990, Hassink et al. 1993).

2.3. Nitrogen immobilization

2.3.1. Basics of nitrogen immobilization

Immobilization is the uptake of mineral nitrogen by microorganisms to synthesize their tissue and develop their own populations. The C/N ratio is often said to decide which one of the immobilization or mineralization prevails over the other (Bengtsson et al. 2003, Robertson & Groffman 2007) and immobilization will likely be the dominant process in the soils with a high C/N ratio. Besides the irrigation technique, the type and amount of plant residue left on the soil surface or buried in the soil after harvesting is thus expected to decide whether immobilization prevails or not. For example, wheat straw or corn stalks plowed under may stimulate the microbial activity which uses the available nitrogen in soil for decaying plant material. So, immobilization will be the dominant process and will stop once the plant residue has become highly decayed. In contrast, mineralization will directly take place when a legume crop is buried (Dinnes et al. 2002).

2.3.2. Influence of the irrigation technique on nitrogen immobilization

The gross immobilization rate was found between 18 and 119 mg N per soil kilogram and per day in drying-rewetting soils reproducing the conditions of SI (Pulleman & Tietema 1999, Bengtsson et al. 2003). Other results showed that the immobilization was greater in aerobic conditions (DI or SDI) than under flooded soils (furrow irrigation, Wang et al. 2001). Finally, immobilization was often found greater when ammonium (NH_4^+) fertilizers are applied (Vitousek & Andariese 1986, Recous et al. 1990, Burger & Jackson 2003, in Table 2) probably because ammonium is preferred to nitrates (NO_3^-) for assimilation by the microorganisms when the two forms are present (Azam et al. 1993).

2.4. Nitrification

2.4.1. Basics of nitrification

Nitrification is the biological oxidation of ammonium (NH_4^+) in nitrates (NO_3^-) under the successive actions of Nitrosomonas bacteria (nitritation stage, $NH4^+$ to NO_2^-) and bacteria of the Nitrobacter genus (nitratation stage, $NO2^-$ to NO_3^-, see Fig. 32), in the following sequences:

$$NH_4^+ + O_2 \xrightarrow{\text{Nitrosomonas}} NO_2^- + H_2O + H^+ + e^- \quad (5)$$

$$NO_2^- + O_2 \xrightarrow{\text{Nitrobacter}} NO_3^- + e^- \quad (6)$$

This makes nitrogen available for plants and microbes, but also prone to lixiviation or denitrification losses (Sahrawat 1982, Arp et al. 2002, Klotz 2011). Nitrification is either autotrophic or heterotrophic, depending on the bacteria and fungi at play.

- Autotrophic nitrification is performed by bacteria that draw their energy from one of the two stages of the oxidation of ammonium into nitrates (Verstraete & Focht 1997). Bacteria taking part in the first, nitritation stage are categorized as ammonia-oxidizing bacteria, e.g. Nitrosomonas, Nitrosococcus, Nitrosolobus and Nitrosovibrio. Bacteria involved in the second, nitratation stage belong to the nitrite-oxidizing category, e.g. Nitrobacter and Nitrospira (De Boer & Kowalchuk 2001, Treusch et al. 2005).

- Heterotrophic nitrification is due to a wide range of fungi and heterotrophic bacteria unable to develop on inorganic grounds, needing organic compounds to synthesize their tissue. Heterotrophic nitrification is generally less than autotrophic nitrification though non-negligible in acid soils (Addiscott et al. 2005).

2.4.2. Influence of the irrigation techniques on nitrification

Table 5 lists the soil variables (soil C/N ratio, pH, temperature and water content, by alphabetical order) that control nitrification, with the suggested influence of the irrigation techniques, mainly through their effects on soil water content.

Table 5. Soil variables that control nitrification, with the expected influence of the irrigation technique (FI: flood irrigation, SI: sprinkler irrigation, DI: drip irrigation, SDI: subsurface drip irrigation). Besides additional comments, this influence is noted (+) for "favorable", (-) for "unfavorable" while 0 indicates "no expected significant effect on the process".

Data			Influence on nitrification			
Variable	Effects	References	FI	SI	DI	SDI
C/N	High C/N ratios decrease nitrification rates.	Gundersen et al. 1998, Persson et al. 2000, Bengtsson et al. 2003, Ross et al. 2004, Sparling et al. 2015.	Expected higher (-)		(0)	Expected lower (+)
pH	Neutral or slightly alkaline soils favor	Verstraete & Focht 1977, Dommergues et al. 1978,	Local pH decrease		$pH_{DI} < pH_{SDI}$ (-) (+)	

	nitrification that may also occur in acid soils. Significant water movements tend to flush the anions.	Sahrawat 1982, Persson & Wiren 1995, De Boer & Kowalchuk 2001, Simek & Cooper 2002, Bengtsson et al. 2003, Kumar & Shivay 2008.	due to large water flows (-)			
Temperature (T)	Optimal nitrification for 25<T<35°C. T is affected by the irrigation technique.	Malhi & McGill 1982, Haynes 1986, Bell et al. 1998, Colaizzi et al. 2004, Lü et al. 2015.	$T_{FI}<T_{SI}<T_{DI}<T_{SDI}$ (-) (-) (+) (+)			
Water content	Nitrification occurs at low water contents. Drying-wetting cycles are [1]favorable or [2]unfavorable.	Laher & Avnimelech 1980, Malhi and McGill 1982, Zaman et al. 1999, [1]Brockwell & Whalley 1970, [1]Fierer & Schimel 2002, [2]Franzluebbers 1999.	(-)	(+)	(-)	(+)

The marked wetting and drying cycles in areas of infrequent precipitation or in SI could lead to enhanced nitrification (Brockwell & Whalley 1970) as nitrification requires aerobic conditions. Conversely, the lack of oxygen for saturated or near-saturated soils after rainfall or irrigation events potentially takes nitrification down to zero (Laher & Avnimelech 1980) while significant nitrification rates have been found for very high absolute matric potentials of the order of -33 kPa (Malhi & McGill 1982). This may seem surprising given that nitrifiers are generally considered to be highly sensitive to water stress. A controversy therefore exists regarding the effect of the repeated drying-wetting cycles on nitrification. Such cycles have been reported as unfavorable (Franzluebbers et al. 1994) or favorable (Fierer & Schimel 2002) in a study with two frequently stressed loam and clay-loam soils, due to a significant increase in the autotrophic nitrifier populations.

A negative correlation has often been stated between the values of the C/N ratio and nitrification rates (Gundersen et al. 1998, Persson et al. 2000, Bengtsson et al. 2003, Ross et al. 2004). For example, this negative relationship resulted in an increase in the nitrification rate from 11.62 to 14.18 mg N per soil kilogram and per day when the C/N ratio decreased from 20 to 10 at temperatures between 18 and 22°C in batch reactors in

a study by Feng et al. (2011). The availability of ammonium for nitrification depends first on the intensity of root water and nitrogen uptake, seen as a sink term (Verhagen et al. 1995, Bengtsson et al. 2003, Robertson & Groffman 2007). In coherence, the burying of crop residuals with high C/N ratios stimulates the microbial activity thus increases the consumption of ammonia, which in turn reduces nitrification (Robertson & Groffman 2007).

The pH values between 6.5 and 8 have been reported optimal (Sahrawat 1982, Sainte-Marie & Paré 1999, Persson et al. 2000) and no autotrophic nitrification is supposed to occur at pH<4.5 because of the exponential decrease of available ammonia (De Boer & Kowalchuk 2001). However, another study showed the ability of the autotrophic nitrifying bacteria to nitrify at a high rate, with 5.6 g of nitrogen oxidized per liter of soil solution and per day, at a low 3.2 pH, even with a negligible free ammonia concentration of around 10 mg L^{-1} (Tarre & Green 2004). Other authors have suggested that the nitrification for similar low pH values depend on the existence of microsites of high pH in acid soils (Rose & Tempest 1989) or on the presence of biofilms or aggregates, where organisms may be protected against acidity (Boer et al. 1991). As previously mentioned, heterotrophic nitrification may also take place at low pH values (Dommergues et al. 1978, Brierley et al. 2001).

In complement, an increase in soil temperature acts in the expected positive way on nitrification rates (Haynes 1986) as on the other nitrogen transformations (Bell et al. 1998, Colaizzi et al. 2004, Lü et al. 2015). For example, an incubation experiment involving three soils at -33 kPa and an increase in temperature from 4 to 20°C resulted in an increase of nitrification rates from 0.82 µg N g^{-1} day^{-1} to 3.31 µg N g^{-1} day^{-1} (Malhi & McGill 1982).

3. Influence of the irrigation techniques on nitrogen fluxes

3.1. Losses by denitrification

3.1.1. Basics of denitrification

Denitrification designates the reduction of nitrates (NO_3^-) that leads to gaseous compounds mainly from the action of anaerobic bacteria, in the following sequence (Knowles 1982, Ferguson 1994, Robertson & Groffman 2007):

$$NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow N_2O \rightarrow N_2 \quad (7)$$

Most denitrifying bacteria are heterotrophic, e.g. Paracoccus denitrificans, while only a few are autotrophic, e.g. Thiobacillus denitrificans (Rivett et al. 2008). Table 6 lists the soil variables that control denitrification, with the suggested influence of the irrigation techniques.

3.1.2. Influence of the irrigation technique on denitrification

Table 6 lists the soil variables (soil pH, temperature, texture and water content, by alphabetical order) that control denitrification, with the suggested influence of the irrigation techniques, mainly through their effects on soil water content.

Table 6. Soil variables that control denitrification, with the expected influence of the irrigation technique (FI: flood irrigation, SI: sprinkler irrigation, DI: drip irrigation, SDI: subsurface drip irrigation). Besides additional comments, this influence is noted (+) for "favorable", (-) for "unfavorable" while (0) indicates "no expected significant effect on the process".

Data			Influence on denitrification			
Variable	Effects	References	FI	SI	DI	SDI
pH	Optimal range: 7<pH<8. Significant water movements tend to flush the anions.	Wijler & Delwiche 1954, Bremner & Shaw 1958, Parkin et al. 1985, Sahrawat & Keeney 1986, Kumar & Shivay 2008.	Local pH decrease due to large water flows (-)		(0)	
Temperature (T)	Positive relationship and optimal denitrification for 25<T<35°C. T is affected by the irrigation technique.	Bremner & Shaw 1958, Stanford et al. 1975, De Klein & Van Logtestijn 1996, Bell et al. 1998, Colaizzi et al. 2004, Lü et al. 2015.	$T_{FI}<T_{SI}<T_{DI}<T_{SDI}$ (-) (-) (+) (+)			
Texture	Fine-textured soils favor anaerobic conditions thus denitrification.	Gilliam et al. 1978, Aulakh et al. 1991.	(0)			
Water content	Global or local high θ and anaerobic conditions favor denitrification. Drying-wetting cycles favor denitrification.	Burford & Bremner 1975, Laher & Avnimelech 1980, Davidson 1992, Ferguson 1994, Germon & Couton 1999, Robertson & Groffman 2007, Valé et al. 2007.	(+)		(-)	

Denitrification preferentially occurs in the local anaerobic or global weakly-aerobic conditions associated with average saturations indices of at least 60% (Burford & Bremner 1975, Ferguson 1994, Germon & Couton 1999, Robertson & Groffman 2007). The already mentioned flash of microbial activity for mineralization, that follows the peak in water content during the drying-wetting cycle under SI, was also found prone to increase denitrification (Laher & Avnimelech 1980, Davidson 1992, Valé 2006, Valé et al. 2007). By contrast, the frequent application of limited water doses within DI dictates aerobic conditions, relatively far from soil saturation, that tend to limit denitrification, also when compared to border irrigation (e.g. Sanchez-Martin et al. 2008). One step further, direct observations (Suddick et al. 2011) have recently shown that N_2O emissions associated with fertigation were weaker for SDI than for DI. The most conventional irrigation techniques (SI, border irrigation) create soil regions (micro-sites) with local anaerobic conditions, thus enhancing nitrogen losses by denitrification (Burger et al. 2005, Sanchez-Martin et al. 2008, Kennedy et al. 2013).

Many early works (Wijler & Delwiche 1954, Bremmer & Shaw 1958, Parkin et al. 1985, Sahrawat & Keeney 1986) showed that neutral alkaline conditions (6<pH<8) enhanced denitrification rates, demonstrating very low rates roughly for pH<5 and maximal rates for pH values between 7 and 8. The effects of soil texture on denitrification rates have been explored, to the conclusion that fine soils, that impede water flow, are likely associated with higher denitrification rates than coarse soils (Gilliam et al. 1978, Aulakh et al. 1991). In other words, for a given soil texture, especially for fine soils, the irrigation techniques associated with saturated conditions are more likely to induce denitrification. In complement, the positive relationship between denitrification and temperature is also well known: the process halts at low positive temperatures and needs temperatures above 20 to 25°C to become really active (Stanford et al. 1975, Bailey 1976, De Klein & Van Logtestijn 1996).

3.2. Losses by runoff, volatilization and lixiviation

3.2.1. Nitrogen losses by runoff and volatilization

Nitrogen losses are well-documented terms of the nitrogen cycle and budget, being in direct line with the major environmental issue of surface and groundwater

contamination. The reduction of nitrogen losses is a recognized agricultural and economic challenge: to ensure the maximum efficiency of nitrogen applications within sustainable site-preserving practices, techniques and strategies (e.g. Schepers et al 1995, Wang et al. 2001, Darwish et al. 2003, Li et al. 2004). However, at the level of details suitable for this review, nitrogen losses by runoff and volatilization have less complex and numerous determinants than nitrogen losses by lixiviation. The reader is referred to Carpenter et al. (1998) and references therein for an overview on nonpoint source pollution of surface waters by runoff. Nitrogen volatilization may originate in any ammonium-based fertilizer but urea fertilizers are more prone to volatilization because the hydrolysis of urea increases soil pH, which in turn favors ammonia volatilization as following reactions:

$$\text{Urea} + \text{Water} \xrightarrow{\text{Urease}} \text{NH}_4^+ \quad (8)$$

$$\text{NH}_4^+ + \text{OH}^- \xrightarrow{\text{pH}\gg 7} \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \quad (9)$$

Soil pH progressively increases a few days after urea application on the soil surface, resulting from the conversion of ammonium to dissolved ammonia, the later available for volatilization. Losses are higher when fertilizers (urea) are placed on the soil surface with no subsequent (or too weak) irrigation or rainfall. The choice of SI immediately after nitrogen application minimizes the losses by volatilization (Viero et al. 2015) and does not induce runoff risks (unlike FI). Urea should be applied for soil temperatures at or below 10°C to ensure low activity of soil microorganisms. However it is possible to obtain identical "final" volatilization amounts but different volatilization rates under different temperature conditions (Cameron et al. 2013) and soil water content, not temperature, is the most critical factor said to affects ammonia volatilization (Al-Kanani et al. 1991). Finally there is an interplay between volatilization, runoff and lixiviation: volatilization is minimum when the soil is at or near saturation (i.e. above field capacity) which enhances the conversion of urea to ammonium but also expectedly triggers runoff and drainage, thus lixiviation (Murrell & Snyder 2006).

3.2.2. Nitrogen losses by lixiviation

Table 7 lists the variables (fertilizer location, scheduling of nitrogen applications, soil texture, types of nitrogen molecules and soil water content, by alphabetical order) that control lixiviation, with the suggested influence of the irrigation techniques.

Table 7. Soil variables and nitrogen management options that control lixiviation, with the expected influence of the irrigation technique (FI: flood irrigation, SI: sprinkler irrigation, DI: drip irrigation, SDI: subsurface drip irrigation). Besides additional comments, this influence is noted (+) for "favorable", (-) for "unfavorable" while (0) indicates "no expected significant effect on the process".

Data			Influence on lixiviation			
Variable	Effects	References	FI	SI	DI	SDI
Fertilizer location	Applications in the root growth domain reduce lixiviation.	Haynes 1985, Wiesler & Itorst 1994, Gardenäs et al. 2005, Siyal et al. 2012.	(+)			(-)
Scheduling of N applications within irrigation events	Fertigation late in the irrigation events reduces lixiviation.	Gärdenäs et al. 2005, Hanson et al. 2006.	(+)	Control on the timing (-)		
Scheduling of N applications within cropping seasons	Dose splitting and/or applications during strong crop growth drastically reduce lixiviation.	Russelle et al. 1983, Jokela & Randall 1989, Prunty & Greenland 1997, Mmolawa & Or 2000, Riley et al. 2001, Cote et al. 2003, Dinnes et al. 2002, Gallais & Hirel 2004, Vetsch & Randall 2004, Gärdenäs et al. 2005, Hanson et al. 2006, Li et al. 2005, Randall & Sawyer 2008, Shedeed et al. 2009, Hassan et al. 2010, Yoseftabar et al. 2014.	Control on the scheduling (-)			
Texture	Coarse soils favor lixiviation.	Vlek et al. 1980, Asadi et al. 2002, Zotarelli et al. 2007.	(0)			
Types of N molecules	Nitrates more prone to lixiviation than ammonia or urea, especially for high water contents.	Haynes 1985, Santos et al. 1997, Asadi et al. 2002, Hanson et al. 2006, Badr & El-Yazied 2007.	.(+)		(-)	
Water content	Near-saturation and 1D geometries favor lixiviation, 3D	Darwish et al. 2003, Murrell & Snyder 2006, Burguete et al. 2009, Mubarak et al. 2009.	(+)		(-)	

	infiltration patterns reduce it.			

Two factors must be taken in consideration to decide the location of the fertilizer. The first factor is the root distribution during the crop growth period (Zeng et al. 2001). Where irrigation is needed, root growth and distribution pattern are generally restricted to the wetted soil volume under the irrigation system (Gardenäs et al. 2005). Thus, the nutrients applied outside this area might not be used by crop roots, being more susceptible to leach below the rooting zone (Haynes 1986, Wiesler & Horst 1994, Siyal et al. 2012). The second, complementary factor is to account for the geometrical characteristics of water delivery in the irrigation system, with a trend to increased lixiviation risks for 1D saturated geometries (sprinkler, flood irrigation) in comparison with fertigation in the 2D or 3D flow patterns associated with DI or SDI (Mailhol et al. 2001, Darwish et al. 2003, Burguete et al. 2009, Mubarak et al. 2009).

Recommendations on the timing and duration of fertigation within irrigation events seem to vary between authors, irrigation techniques and site specificities. For example, Gärdenäs et al. (2005), for long-duration micro-irrigations, demonstrated that the largest leaching losses occurred when starting the 2-h fertigation 1 h after the beginning of the irrigation cycle. On the contrary, the smallest leaching losses were obtained when starting the 2-h fertigation 3 h before the irrigation cutoff. As most studies, Hanson et al. (2006) tend to agree with that recommendation while Cote et al. (2003) rather recommend fertigation early in the irrigation cycle.

For most irrigated crops, nitrogen demand and uptake are low at the beginning of the growth stage but drastically increase around the middle of the vegetative growth stage, until at least the first reproductive stage (Russelle et al. 1983, Jokela & Randall 1989, Gallais & Hirel 2004). Nitrogen applications should therefore take place during the period of strong crop demand, to ensure maximal efficiency and also to prevent losses by lixiviation (Riley et al. 2001, Randall & Sawyer 2008, Hassan et al. 2010). A proper timing of fertilization must account for the time lag between nitrogen application and the onset of plant demand: pre-emergence fertilization is associated with increased contamination risks (Dinnes et al. 2002, Vetsch & Randall 2004, Prunty & Greenland 1997). However, nitrogen applications just before or at planting may be favorable to avoid nitrogen stresses during early plant growth, when compared to applications a few days later, near

the emergence date (Sangoi et al. 2007). Dose splitting (the application of nitrogen at multiple, appropriate times during the cropping season) has been widely advocated to reduce the lixiviation and denitrification losses as well, saving 25-50 % of the nitrogen supply costs (Mmolawa & Or 2000, Cote et al. 2003, Gärdenäs et al. 2005, Hanson et al. 2006, Shedeed et al. 2009). Dose splitting aims at better meeting plant needs and root demands at the different stages of crop growth (Li et al. 2005, Mailhol et al. 2001, Yoseftabar et al. 2014). For spring crops, nitrogen applications in autumn, before the agricultural season, is prone to avoid nitrification but increases the risk of nitrogen losses by leaching or denitrification. On the contrary, delaying the application to spring is prone to decrease lixiviation and to increase nitrogen use efficiency by 10-15% (Dinnes et al. 2002, Randall & Sawyer 2008). Moreover, if one decides to supply nitrogen in autumn for spring crops, the NH_3 form (anhydrous ammonia) should be used and buried at 15 cm or more to facilitate the conversion to ammonium (NH_4^+) and limit the losses by volatilization.

Soil properties are generally known before the choice of a type of molecule is made, so that soil properties may dictate the type of molecules used in a number of cases. Lixiviation typically occurs in the coarsest soils because of their high water conductivity and low ability to retain the NO_3^- anions (Asadi et al. 2002, Zotarelli et al. 2007). Conversely, clayey soils have a low permeability with lesser leaching risks (Vlek et al. 1980). Although plant roots may absorb nitrates NO_3^-, ammonium NH_4^+ and urea $CO(NH_2)_2$, the behavior of these nitrogen forms is not equal in the wetted soil, and differences in nitrogen losses may arise from the types of molecules used for fertilization. Nitrates losses have been related to their high mobility and solubility in water (Badr & El-Yazied 2007) and to the low ability of most soils to retain it, due to the negative charge of soil particles (Asadi et al. 2002). Nitrates are transported mainly by convection, thus expected to leach below the rooting zone if rainfall or irrigation (FI and SI) exceeds the field capacity and potential evapotranspiration of the soil plant system (Santos et al. 1997). Unlike nitrates, ammonium is retained by the negatively charged soil particles, especially when it is injected below the soil surface (SDI), which makes it virtually immobile thus minimizes the lixiviation risk (Hanson et al. 2006). Earlier studies (e.g. Haynes 1985) found that ammonium applied by DI concentrated in the 10 cm below the dripper, with little lateral movement. By contrast, urea and nitrates had both moved

vertically to soil depths of about 70 cm below the emitter and laterally up to 30 cm from the point of application (Badr & El-Yazied 2007).

Nitrate, ammonium and urea are the main forms of nitrogen fertilizers taken up by plant roots. These molecules have a different behavior in soil and a different effect on the cations vs. anions balance, thus on soil pH. For example, for nitrate-based fertilizers, plants will absorb the nitrates (anions) thus leave the cations in the rhizopsphere, before exuding OH- ions to reestablish the local balance between H+ and OH- ions, which increases soil pH. Conversely, plant roots exude H+ ions if ammonium-based fertilizers or urea are used and absorbed: soil acidification is then induced, which decreases soil pH and creates unfavorable conditions for mineralization: more fertilizer is thus expectedly available for lixiviation (Hinsinger et al. 2003).

4. Implications to agricultural water management

An illustration of typical agricultural cases is proposed in Fig. 33, assembled from various experiments at the IRSTEA "Domain of Lavalette" (43°40'N, 3°50'E, altitude 30m) in Montpellier, France) showing data collected in spring and summer 2014 on several plots equipped with specific, independent irrigation systems. Two Campbell CR10X dataloggers were used to record soil temperatures from Pt100 probes (limited to the 5, 15 and 25 cm depths on all plots, not shown) and water contents (from TDR probes) at a 20-minute time step at several depths. The signals were collected for the 0-10, 10-20, 20-30 and 30-40 cm depths on the non-irrigated plot as well as on the adjacent plot, irrigated by sprinklers. The signals were collected at 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 and 50-60 cm depths for the other plots. The period of data collection was June 2 to August 11 and Fig. 33 shows results obtained between June 13 and June 22. The soil is predominantly loamy and deep, containing in average 18% of clay, 47% silt and 35% sand over the maximal rooting depth of maize. The local hydrodynamic properties are known from experimental campaigns performed on a regular basis: the last campaign took place after the installation of a new subsurface drip irrigation network (buried at 35 cm depth) in the winter 2013/14.

Figure 2a to d shows saturation indices averaged over the first 30 cm of soil, in absence of irrigation (∅I, Fig. 33a), under sprinkler irrigation (SI, Fig. 33b), drip irrigation (DI, Fig. 33c) and subsurface drip irrigation (SDI, Fig. 33d). Flood irrigation

(FI, Fig. 33b) was not performed but is presented here for classification purpose, showing more similarities with SI than with any other technique when considering the water content dynamics (even if complete soil submersion results in increased duration of soil saturation or near-saturation in the topsoil layers). Figure 33e to h describes the effects of the same irrigation techniques (or these of the absence of irrigation) on the saturation indices averages over soil depths between 30 and 40 cm. Although the measurement technique used for data collection (TDR probes) does not offer high-resolution absolute values, their precision is enough to identify the differences between typical soil saturation profiles, associated with the various irrigation techniques.

Leaning on the cited literature elements, Fig. 33 indicates where nitrogen fluxes and transformations are most likely to occur, that is when considering soil water content as their first-order determinant and assuming all other things to be equal (i.e. no noticeable differences in the second-order determinants between the monitored plots). In Fig. 33 and in the following, the notations [N], [D], [R], [V], [M], [F] and [L] indicate "favorable" (or maybe risky) conditions for nitrification, denitrification, runoff, volatilization, mineralization, symbiotic fixation and lixiviation, respectively. The purpose and added value of Fig. 33 is therefore to provide a comprehensive picture of the expected influence of the irrigation technique on the elements of the nitrogen cycle, thus, in turn, on the nitrogen budget (at least in qualitative terms and with respect to the first-order effects directly linked to the soil water content profiles).

The implications for agricultural water and nitrogen management are several, though depending on the degrees of freedom at the practitioner's disposal in choosing the irrigation technique and/or the crop and/or the irrigation and fertilization strategy. In the typical case of a known soil type (characterized by its C/N ratio, pH, salinity, temperature, texture, i.e. all secondary-order controls for nitrogen transformations listed in Tables 3 to 6) with no choice on the irrigation technique (e.g. sprinkler irrigation: SI), Fig.33b and f indicates which nitrogen transformation and fluxes may likely occur, together with the instant in which they take place. In this example, [D], [R], [V] and [M] depend on the irrigation amount (especially the peak in water content) while [N] rather depends on the time interval between successive irrigations and [L] depends on the irrigation amount first, but also on the series of factors listed in Table 7 (fertilizer location,

scheduling of applications, soil texture, type of molecules). More generally, Fig.33 may be used as a reading grid, for guidance or to decipher the effects of irrigation and fertilization strategies, in terms of expected trends, possibly seeking confirmation in local soil water content measurements. However, these main trends may also be altered by particular values of the above mentioned second-order factors, hence recommending the use of Fig.33 as an entry point and that of Tables 3 to 7 for context-dependent verifications.

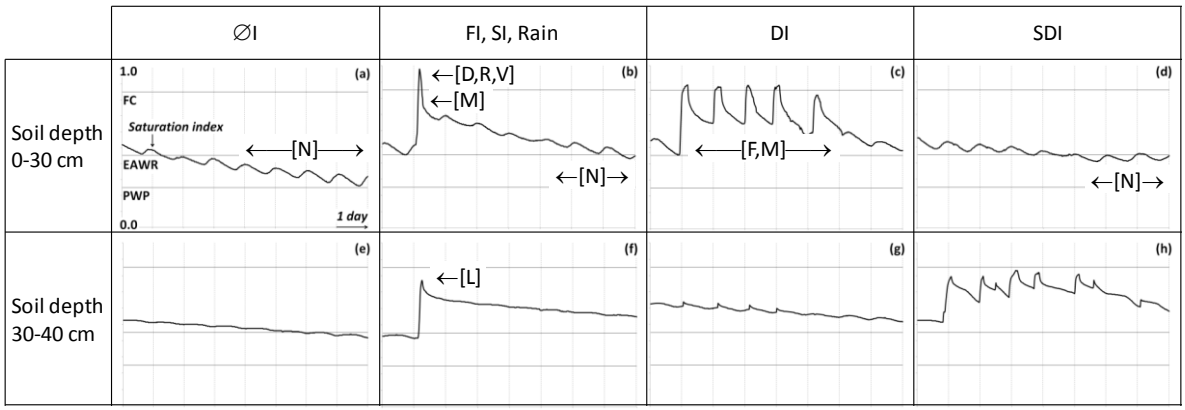


Figure 33. Summary of the expected influence of the irrigation techniques on the nitrogen cycle, as mainly depending on soil water content, represented here by the evolution of the saturation index (y axis) with time (x axis), averaged over different soil depths (0-30 and 30-40 cm). Here, ∅I indicates no irrigation, FI flood irrigation, SI sprinkler irrigation, DI drip irrigation, SDI subsurface drip irrigation. FC is field capacity, EAWR the limit of easily available water reserve and PWP the permanent wilting point. Depending on other contextual elements (see Tables 3 to 7), [N], [D], [R], [V], [M] and [F] indicate favorable conditions for nitrification, denitrification, runoff, volatilization, mineralization and fixation, while [L] indicates lixiviation risks. The plotted data have been collected on several cultivated plots (maize) on the experimental site of Lavalette (IRSTEA Montpellier) in spring and summer 2014, chosen to account for "typical situations" and not for detailed comparisons: sketches (a) to (h) are briefly discussed in the text.

A complementary representation is proposed in Fig. 34, which exposes the same arguments in a different way. Figure 34 adapts Fig. 32 with the main outcomes of the present review, indicating the preferential associations between irrigation techniques (∅I, SI, DI, SDI) and nitrogen fluxes or transformations ([N], [D], [V], [M], [F], [L]), i.e. the "active" connections in the chart, once the irrigation technique is known. This allows identifying the merits and drawbacks of (hypothesized) classical strategies associated

with the irrigation techniques, for example large irrigation amounts with time intervals of several days for sprinkler irrigation.

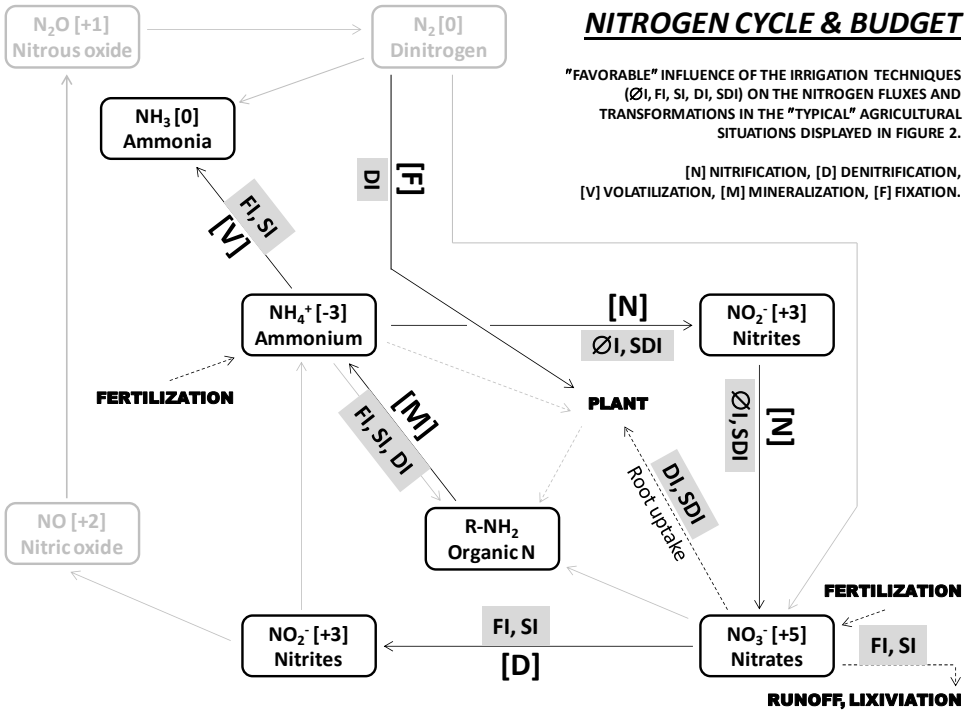


Figure 34. Schematic overview of the nitrogen cycle and budget, showing the expected favorable influence of the irrigation techniques (∅I: no irrigation, FI: flood irrigation, SI: sprinkler irrigation, DI: drip irrigation, SDI: subsurface drip irrigation) on the main nitrogen fluxes and transformations, in "typical situations" for agricultural contexts, as shown in Fig.33. [N] accounts for favorable conditions for nitrification, [D] for denitrification, [V] for volatilization, [M] for mineralization and [F] for (symbiotic) fixation.

5. Conclusion

This review tries to bridge the gap between detailed biochemical studies on nitrogen transformations and fluxes in agricultural soils on the one hand and studies on irrigation techniques and strategies on the other hand. To the authors knowledge, no such overview and comprehensive picture is available yet to assess the influence of the irrigation techniques on the nitrogen cycle and budget, at least at the chosen intermediate level of complexity that addresses first-order and second-order effects while deliberately discarding the finer details. A wide consensus exists in the literature that the temporal evolution of soil water content profile directly dictates most nitrogen transformations (symbiotic fixation, mineralization, immobilization, nitrification) and fluxes (denitrification, runoff, volatilization and lixiviation) while multiple secondary factors

may intervene (soil C/N ratio, pH, salinity, temperature and texture for nitrogen transformations, fertilizer location and scheduling of applications, soil texture and type of molecules for nitrogen fluxes). As irrigation techniques (furrow irrigation, sprinkler irrigation, surface and subsurface drip irrigation) and strategies may both be characterized by specific patterns of soil water content in space and time, this endows practitioners with several efficient degrees of freedom in deciding agricultural water and nitrogen management practices. Assuming the best decisions are taken when comparisons are possible, this review summarizes typical agricultural situations in simplified, graphical overviews that indicate which irrigation techniques tend to favor which nitrogen transformations and fluxes (at the need of indirect confirmations in the form of local soil water content measurements and the examination of all known secondary factors).

This academic, mostly qualitative view on the influence of the irrigation technique on the nitrogen cycle and budget may for example be usefully completed by contextual, quantitative assessments for diagnostic purposes, within a posteriori evaluations of coupled irrigation and fertilization strategies. The overview gained on the expected relevant or risky associations between irrigation and fertilization strategies (especially with the benefit of previous in situ experiences) may also be used to decipher more relevant site-specific combined strategies. These should take into account not only the expected first-order effects of the irrigation techniques on the nitrogen cycle (water content variations with depth and time) but also some expectedly second-order effects that may still prove crucial for nitrogen transformations and fluxes, for example due to unusual local properties (C/N ratio, pH, salinity, soil texture, soil and water temperature) or non-optimal fertilization management. Fertilization management options especially impact volatilization, runoff and lixiviation fluxes, the latter more complex in their processes but far more plausible for occasionally large irrigation amounts, or the coincidental occurrence of strong rain events soon after fertilization. However, a series of mitigation effects is known from literature and consists in the choice of the right type of molecules (nitrates instead of urea is risky in coarse soils), their application of appropriate doses (meeting plant demands) at relevant locations (where roots will find the fertilizer -depending on the irrigation technique) within a clever scheduling (within-event and/or within-season dose splitting). Finally, furrow irrigation and sprinkler irrigation appear to be the irrigation techniques with the strongest, more numerous and

less controlled effects on the nitrogen transformations and fluxes (unless dedicated attention is paid). By contrast, subsurface drip irrigation seems to be the irrigation technique with the potential lesser effect on soil's nitrogen cycle, possibly meeting root demands at best, provided roots have grown to a sufficient depth.

References du chapitre III

Addiscott, T. M. (2005). Nitrate, agriculture and the environment. CAB International, Wallingford, UK, 279 pp.

Agehara, S., Warncke, D.D. (2005). Soil Moisture and Temperature Effects on Nitrogen Release from Organic Nitrogen Sources. Soil Science Society of America Journal 69(6), 1844-1855.

Albrecht, S.L., Bennett, J.M., Boote, K.J. (1984). Relationship of nitrogenase activity to plant water stress in field-grown soybeans. Field Crops Research 8, 61–71.

Alexandratos, N., Bruinsma, J. (2012). World agriculture towards 2030/2050, the 2012 revision. ESA Working Paper No. 12-03, June 2012. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Al-Kanani, T., MacKenzie, A. F., Barthakur, N. N. (1991). Soil water and ammonia volatilization relationships with surface-applied nitrogen fertilizer solutions. Soil Science Society of America Journal, 55(6), 1761-1766.

Aoyama, M. (1991). Properties of Fine and Water-Soluble Fractions of Several Composts: II. Organic Forms of Nitrogen, Neutral Sugars, and Muramic Acid in Fractions. Soil Science and Plant Nutrition 37, 629–637

Arp, D.J., Sayavedra-Soto, L.A., Hommes, N.G. (2002). Molecular biology and biochemistry of ammonia oxidation by Nitrosomonas europaea. Arch Microbiol 178, 250–255.

Aulakh, M.S., Doran, J.W., Walters, D.T., Power, J.F. (1991). Legume residue and soil water effects on denitrification in soils of different textures. Soil Biology and Biochemistry 23, 1161–1167.

Asadi, M. E., Clemente, R. S., Gupta, A. D., Loof, R., Hansen, G. K. (2002). Impacts of fertigation via sprinkler irrigation on nitrate leaching and corn yield in an acid–sulphate soil in Thailand. Agricultural Water Management 52(3), 197-213.

Azam, F., Simmons, F.W., Mulvaney, R.L. (1993). Immobilization of ammonium and nitrate and their interaction with native N in three Illinois Mollisols. Biol Fertil Soils 15, 50–54.

Badr, M. A., El-Yazied, A. A. (2007). Effect of fertigation frequency from subsurface drip irrigation on tomato yield grown on sandy soil. Aust. J. Basic Appl. Sci 1(3), 279-285.

Bailey, L.D. (1976). Effects of temperature and root on denitrification in a soil. Canadian

Journal of Soil Science 56, 79–87.

Bassirirad, H. (2000). Kinetics of nutrient uptake by roots: responses to global change, New Phytologist 147 (1), 155-169.

Bell, A. A., Liu, L., Reidy, B., Davis, R. M., Subbarao, K. V. (1998). Mechanisms of subsurface drip irrigation-mediated suppression of lettuce drop caused by sclerotinia minor. Phytopathology 88(3), 252-259.

Bengtsson, G., Bengtson, P., Månsson, K.F. (2003). Gross nitrogen mineralization-, immobilization-, and nitrification rates as a function of soil C/N ratio and microbial activity. Soil Biology and Biochemistry 35, 143–154.

Berstein, L., Ogata, G. (1966). Effects of Salinity on Nodulation, Nitrogen Fixation, and Growth of Soybeans and Alfalfa1, Agronomy Journal 58, 201-203.

Birch, H.F. (1958). The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. Plant Soil 10, 9–31.

Boer, W.D., Gunnewiek, P.J.A.K., Veenhuis, M., Bock, E., Laanbroek, H.J. (1991). Nitrification at low pH by aggregated chemolithotrophic bacteria. Appl. Environ. Microbiol. 57, 3600–3604.

Bora, P. K., Ray, L. I. P. (2015). Soil acidification due to point application of fertilizers through drip irrigation. Journal of AgriSearch 2(2), 100-104.

Bordeleau, L.M., Prévost, D. (1994). Nodulation and nitrogen fixation in extreme environments, in: Graham, P.H., Sadowsky, M.J., Vance, C.P. (Eds.), Symbiotic nitrogen fixation, Developments in Plant and Soil Sciences. Springer Netherlands, 115–125.

Borken, W., Matzner, E. (2009). Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils. Global Change Biology 15, 808–824.

Bremner, J.M., Shaw, K. (1958). Denitrification in soil. II. Factors affecting denitrification. The Journal of Agricultural Science 51, 40–52.

Brierley, E.D.R., Wood, M., Shaw, P.J.A. (2001). Influence of tree species and ground vegetation on nitrification in an acid forest soil. Plant and Soil 229, 97–104.

Brockwell, J., Whalley, R. (1970). Studies on seed pelleting as an aid to legume seed inoculation. 2. Survival of Rhizobium meliloti applied to medic seed sown into dry soil. Aust. J. Exp. Agric. 10, 455–459.

Bruning, B., Rozema, J. (2013). Symbiotic nitrogen fixation in legumes: Perspectives for saline agriculture. Environmental and Experimental Botany, Sustainable

cultivation and exploitation of halophyte crops in a salinizing world 92, 134–143.

Burford, J.R., Bremner, J.M. (1975). Relationships between the denitrification capacities of soils and total, water-soluble and readily decomposable soil organic matter. Soil Biology and Biochemistry 7, 389–394.

Burger, M., Jackson, L.E. (2003). Microbial immobilization of ammonium and nitrate in relation to ammonification and nitrification rates in organic and conventional cropping systems. Soil Biology and Biochemistry 35, 29–36.

Burger, M., Jackson, L.E., Lundquist, E.J., Louie, D.T., Miller, R.L., Rolston, D.E., Scow, K.M. (2005). Microbial responses and nitrous oxide emissions during wetting and drying of organically and conventionally managed soil under tomatoes. Biol Fertil Soils 42, 109–118.

Burguete, J., Zapata, N., García-Navarro, P., Maïkaka, M., Playán, E., Murillo, J. (2009). Fertigation in furrows and level furrow systems. II: Field experiments, model calibration, and practical applications. Journal of irrigation and drainage engineering 135, 413-420.

Cabrera, M.L. (1993). Modeling the Flush of Nitrogen Mineralization Caused by Drying and Rewetting Soils. Soil Science Society of America Journal 57(1), 63-66.

Cameron, K.C., Di, H.J., Moir, J.L. (2013). Nitrogen losses from the soil/plant system: a review. Annals of Applied Biology 162, 145–173.

Cheng, Y., Wang, J., Mary, B., Zhang, J., Cai, Z., Chang, S.X. (2013). Soil pH has contrasting effects on gross and net nitrogen mineralizations in adjacent forest and grassland soils in central Alberta, Canada. Soil Biology and Biochemistry 57, 848–857.

Colaizzi, P. D., Evett, S. R., Howell, T. A. (2004). Comparison of SDI, LEPA, and spray irrigation performance for cotton in the North Texas High Plains. In CD-ROM. Irrigation Association Annual Meeting 14-16 Nov, Tampa, FL.

Cote, C. M., Bristow, K. L., Charlesworth, P. B., Cook, F. J., Thorburn, P. J. (2003). Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. Irrigation Science 22(3-4), 143-156.

Dalias, P., Anderson, J.M., Bottner, P., Coûteaux, M.-M. (2002). Temperature responses of net nitrogen mineralization and nitrification in conifer forest soils incubated under standard laboratory conditions. Soil Biology and Biochemistry 34, 691–701.

Davidson, E.A. (1992). Sources of Nitric Oxide and Nitrous Oxide following Wetting of Dry Soil. Soil Science Society of America Journal 56(1), 95-102.

Darwish, T., Atallah, T., Hajhasan, S., Chranek, A. (2003). Management of nitrogen by fertigation of potato in Lebanon. Nutrient Cycling in Agroecosystems 67(1), 1-11.

De Boer, W., Kowalchuk, G.A. (2001). Nitrification in acid soils: micro-organisms and mechanisms. Soil Biology and Biochemistry 33, 853–866.

De Klein, C.A.M., Van Logtestijn, R.S.P. (1996). Denitrification in grassland soils in The Netherlands in relation to irrigation, N-application rate, soil water content and soil temperature. Soil Biology and Biochemistry 28, 231–237.

Dinnes, D. L., Karlen, D. L., Jaynes, D. B., Kaspar, T. C., Hatfield, J. L., Colvin, T. S., Cambardella, C. A. (2002). Nitrogen management strategies to reduce nitrate leaching in tile-drained Midwestern soils. Agronomy journal 94(1), 153-171.

Dommergues, Y.R., Belser, L.W., Schmidt, E.L. (1978). Limiting Factors for Microbial Growth and Activity in Soil, in: Alexander, M. (Ed.), Advances in Microbial Ecology. Springer US, 49–104.

Ebrahimian, H., Liaghat, A., Parsinejad, M., Playán, E., Abbasi, F., Navabian, M. (2013). Simulation of 1D surface and 2D subsurface water flow and nitrate transport in alternate and conventional furrow fertigation. Irrigation Science 31, 301–316.

Evett, S. R., Colaizzi, P. D., Howell, T. A. (2005). Drip and evaporation. In Proc. Central Plains Irrigation Conf., Sterling, CO., USA., Feb 2005, pp.16-17.

Feng, Q., Cao, J., Chen, L.-N., Guo, C.-Y., Tan, J., Xu, H. (2011). Simultaneous nitrification and denitrification at variable C/N ratio in aerobic granular sequencing batch reactors. Journal of Food, Agriculture & Environment 9, 1131–1136.

Ferguson, S. J. (1994). Denitrification and its control. Antonie van Leeuwenhoek, 66(1-3), 89-110.

Fierer, N., Schimel, J.P. (2002). Effects of drying–rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations. Soil Biology and Biochemistry 34, 777–787.

Fierer, N., Schimel, J.P., Holden, P.A. (2003). Influence of Drying-Rewetting Frequency on Soil Bacterial Community Structure. Microbial Ecology 45, 63–71.

Flury, M. (1993). Experimental evidence of transport of pesticides through field soils - a review, Journal of Environmental Quality 25, 25–45.Fowler, D., Coyle, M., Skiba, U., Sutton, M. A., Cape, J. N., Reis, S., Sheppard, L. J., Jenkins, A., Grizzetti, B., Galloway, J. N., Vitousek, P., Leach, A., Bouwman, A. F., Butterbach-Bahl, K., Dentener, F., Stevenson, D., Amann, M., Voss, M. (2013). The global nitrogen cycle in the twenty-first century, Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. B, 368, 20130164

Fox, R.H., Myers, R.J.K., Vallis, I. (1990). The nitrogen mineralization rate of legume residues in soil as influenced by their polyphenol, lignin, and nitrogen contents. Plant Soil 129, 251–259.

Franzluebbers, A.J. (1999). Microbial activity in response to water-filled pore space of variably eroded southern Piedmont soils, Applied Soil Ecology 11, 91–101.

Fu, M.H., Xu, X.C., Tabatabai, M.A. (1987). Effect of pH on nitrogen mineralization in crop-residue-treated soils, Biol Fert Soils 5, 115–119.

Gallais, A., Hirel, B. (2004). An approach to the genetics of nitrogen use efficiency in maize. Journal of Experimental Botany, 55(396), 295-306.

Galloway, J. N., Schlesinger, W. H., Levy, H., Michaels, A., Schnoor, J. L. (1995). Nitrogen fixation: Anthropogenic enhancement-environmental response. Global Biogeochemical Cycles, 9(2), 235-252.

Galloway, J. N., Dentener, F. J., Capone, D. G., Boyer, E. W., Howarth, R. W., Seitzinger, S. P., Asner, G. P., Cleveland, C. C., Green, P. A., Holland, E. A., Karl, D. M., Michaels, A. F., Porter, J. H., Townsend, A. R., Vörösmarty, C. J. (2004). Nitrogen Cycles: Past, Present, and Future, Biogeochemistry 70 (2), 153-206.

Galloway, J.N, Townsend, A. R., Erisman, J. W., Bekunda, M., Cai, Z., Freney, J. R., Martinelli, L. A., Seizinger, S. P., Sutton, M. A. (2008). Transformation of the Nitrogen cycle: recent trends, questions and potential solutions, Science 320, 889-892.

Gärdenäs, A. I., Hopmans, J. W., Hanson, B. R., Šimůnek, J. (2005). Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation. Agricultural water management, 74(3), 219-242.

Garg, N., Chandel, S. (2011). The effects of salinity on nitrogen fixation and trehalose metabolism in Mycorrhizal Cajanus cajan (L.) Millsp. Plants, Journal of Plant Growth and Regulation, 30, 490-503.

Germon, J.-C., Couton, Y. (1999). La dénitrification dans les sols: régulation de son fonctionnement et applications à la dépollution. Courr. Environ. INRA 38, 67–74.

Gheysari, M., Mirlatifi, S.M., Homaee, M., Asadi, M.E., Hoogenboom, G. (2009). Nitrate leaching in a silage maize field under different irrigation and nitrogen fertilizer rates. Agricultural Water Management 96, 946–954.

Gilliam, J.W., Dasberg, S., Lund, L.J., Focht, D.D. (1978). Denitrification in four California soils: Effect of soil profile characteristics. Soil Science Society of America Journal 42, 61–66.

Gruber, N., Galloway, J.N. (2008). An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle, Nature, 451, 293-296.

Gundersen, P., Emmett, B.A., Kjønaas, O.J., Koopmans, C.J., Tietema, A. (1998). Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forests: a synthesis of NITREX data. Forest Ecology and Management, The Whole Ecosystem Experiments of the NITREX and EXMAN Projects 101, 37–55.

Guntiñas, M.E., Leirós, M.C., Trasar-Cepeda, C., Gil-Sotres, F. (2012). Effects of moisture and temperature on net soil nitrogen mineralization: A laboratory study. European Journal of Soil Biology 48, 73–80.

Hafeez, F.Y., Aslam, Z., Malik, K.A. (1988). Effect of salinity and inoculation on growth, nitrogen fixation and nutrient uptake of Vigna radiata (L.) Wilczek. Plant Soil 106, 3–8.

Han, J., Shi, J., Zeng, L., Xu, J., Wu, L. (2015). Effects of nitrogen fertilization on the acidity and salinity of greenhouse soils. Environmental Science and Pollution Research, 22(4), 2976-2986.

Hanson, B. R., Šimůnek, J., Hopmans, J. W. (2006). Evaluation of urea–ammonium–nitrate fertigation with drip irrigation using numerical modeling. Agricultural water management, 86(1), 102-113.

Hassan, S. W., Oad, F. C., Tunio, S., Gandahi, A. W., Siddiqui, M. H., Oad, S. M., Jagirani, A. W. (2010). Effect of N application and N splitting strategy on maize N uptake, biomass production and physio-agronomic characteristics. Sarhad Journal of Agriculture, 26(4), 551-558.

Hassink, J., Bouwman, L.A., Zwart, K.B., Bloem, J., Brussaard, L. (1993). Relationships between soil texture, physical protection of organic matter, soil biota, and c and n mineralization in grassland soils, Geoderma 57, 105–128.

Haynes, R. J. (1986). Uptake and assimilation of mineral nitrogen by plants, in Mineral Nitrogen in the Plant-Soil System, Ed. R. J. Haynes, Orlando, FL, Academic Press, 303–378.

Haynes, R. J. (1985). Principles of fertilizer use for trickle irrigated crops. Fertilizer research, 6(3), 235-255.

Haynes, R. J., Swift, R. S. (1987). Effect of trickle fertigation with three forms of nitrogen on soil pH, levels of extractable nutrients below the emitter and plant growth. Plant and soil, 102(2), 211-221.

Hinsinger, P., Plassard, C., Tang, C., Jaillard, B. (2003). Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: a review. Plant and soil, 248(1-2), 43-59.

Jackson, L.E., Burger, M., Cavagnaro, T.R. (2008). Roots, Nitrogen Transformations, and Ecosystem Services. Annual Review of Plant Biology 59, 341–363.

Janssen, B.H. (1996). Nitrogen mineralization in relation to C:N ratio and decomposability of organic materials. Plant and Soil 181, 39–45.

Jokela, W. E., Randall, G. W. (1989). Corn yield and residual soil nitrate as affected by time and rate of nitrogen application. Agronomy Journal, 81(5), 720-726.

Kennedy, T.L., Suddick, E.C., Six, J. (2013). Reduced nitrous oxide emissions and increased yields in California tomato cropping systems under drip irrigation and fertigation. Agriculture, Ecosystems & Environment 170, 16–27.

Keys, E., McConnell, W. J. (2005). Global change and the intensification of agriculture in the tropics. Global Environmental Change, 15(4), 320-337.

Khalil, A. (2008). Simulation of Nitrogen Distribution in Soil with Drip Irrigation System. Journal of Applied Sciences 8, 3157–3165.

Kieft, T., Soroker, E., Firestone, M. (1987). Microbial biomass response to a rapid increase in water potential when dry soil is wetted, Soil Biology and Biochemistry, 19, 119-126.

Klotz, M. G., Stein, L. Y. (2011). Research on Nitrification and Related Processes, Part 2, Vol 496. Elsevier Academic Press, Amsterdam, The Netherlands.

Knowles, R. (1982). Denitrification. Microbiol Rev 46, 43–70.

Kozlowski, T.T. (1976). Water Deficits and Plant Growth, Volume IV: Soil Water Measurement, Plant Responses, and Breeding for Drought Resistance. Academic Press, New York, 383p.

Kroeze, C., Aerts, R., Breemen, N. van, Dam, D. van, Hofschreuder, P., Hoosbeek, M., Klein, J. de, Hoek, K. van der, Kros, H., Oene, H. van, Oenema, O., Tietema, A., Veeren, R. van der, Vries, W. de (2003). Uncertainties in the fate of nitrogen I: An overview of sources of uncertainty illustrated with a Dutch case study. Nutrient Cycling in Agroecosystems 66, 43–69.

Kumar, D., Shivay, Y. S. (2008). Definitional glossary of Agricultural Terms (Vol. 1). IK International, New Delhi, 314p.

Laher, M., Avnimelech, Y. (1980). Nitrification inhibition in drip irrigation systems. Plant

and Soil, 55(1), 35-42.

Lambin, E. F., Turner II, B. L., Geist, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A.,Bruce, J. W., Coomes, O. T., Dirzo, R., Fischer, G. and Folke, C. (2001). The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths, Global Environmental Change, 11 (4), pp.261–269.

Lamm, F. R., Ayers, J. E., Nakayama, F. S. (2007). Microirrigation for Crop Production. Design, Operation, and Management. Elsevier Publications, Amsterdam, 608p.

Li, J., Zhang, J., Rao, M. (2004). Wetting patterns and nitrogen distributions as affected by fertigation strategies from a surface point source. Agricultural Water Management, 67(2), 89-104.

Lindström, K., Sarsa, M.-L., Polkunen, J., Kansanen, P. (1985). Symbiotic nitrogen fixation of Rhizobium (Galega) in acid soils, and its survival in soil under acid and cold stress. Plant Soil 87, 293–302.

Lloyd, D. (1993). Aerobic denitrification in soils and sediments: From fallacies to facts. Trends in Ecology & Evolution 8, 352–356.

Long, G.-Q., Sun, B. (2012). Nitrogen leaching under corn cultivation stabilized after four years application of pig manure to red soil in subtropical China. Agriculture, Ecosystems & Environment 146, 73–80.

Lü, G. H., Song, J. Q., Bai, W. B., Wu, Y. F., Yuan, L., Kang, Y. H. (2015). Effects of different irrigation methods on micro-environments and root distribution in winter wheat fields. Journal of Integrative Agriculture, 14(8), 1658-1672.

Mailhol, J., Ruelle, P., Nemeth, I. (2001). Impact of fertilisation practices on nitrogen leaching under irrigation. Irrigation science, 20(3), 139-147.

Malhi, S. S., Nyborg, M., Harapiak, J. T. (1998). Effects of long-term N fertilizer-induced acidification and liming on micronutrients in soil and in bromegrass hay. Soil and Tillage Research, 48(1), 91-101.

Malhi, S.S., McGill, W.B. (1982). Nitrification in three Alberta soils: Effect of temperature, moisture and substrate concentration. Soil Biology and Biochemistry 14, 393–399.

Mikha, M.M., Rice, C.W., Milliken, G.A. (2005). Carbon and nitrogen mineralization as affected by drying and wetting cycles. Soil Biology and Biochemistry 37, 339–347.

Miller, A.E., Schimel, J.P., Meixner, T., Sickman, J.O., Melack, J.M. (2005). Episodic rewetting enhances carbon and nitrogen release from chaparral soils. Soil Biology and Biochemistry 37, 2195–2204.

Mmolawa, K., Or, D. (2000). Root zone solute dynamics under drip irrigation: A review. Plant and Soil 222, 163–190.

Mubarak, I., Mailhol, J. C., Angulo-Jaramillo, R., Bouarfa, S., Ruelle, P. (2009). Effect of temporal variability in soil hydraulic properties on simulated water transfer under high-frequency drip irrigation. Agricultural Water Management, 96(11), 1547-1559.

Murrell, S., Snyder, C. (2006). Fall applied nitrogen in the corn belt: Questions and answers for corn. Available at www. back-tobasics. net/FallAppliedN. pdf (verified 20 Mar. 2013).

Muthukumarasamy, R., Revathi, G., Lakshminarasimhan, C. (1999). Influence of N fertilisation on the isolation of Acetobacter diazotrophicus and Herbaspirillum spp. from Indian sugarcane varieties, Biol. Fertil. Soils 29, 157–164.

Myers, R.J.K., Weier, K.L., Campbell, C.A. (1982). Quantitative relationship between net nitrogen mineralization and moisture content of soils. Canadian Journal of Soil Science 62, 111–124.

Neve, S.D., Hofman, G. (2002). Quantifying soil water effects on nitrogen mineralization from soil organic matter and from fresh crop residues. Biol Fertil Soils 35, 379–386.

Niste, M., Vidican, R., Pop, R., Rotar, I. (2013). Stress factors affecting symbiosis activity and nitrogen fixation by Rhizobium cultured in vitro. ProEnvironment/ProMediu, 6(13):42-45.

Osemwota, I.O., Edosomwan, N.L., Okwuagwu, M. (2004). Mineralization of soil organic nitrogen – A review. Agricultural Reviews 25, 152–156.

Ouyang, Y., Li, X. (2013). Recent research progress on soil microbial responses to drying–rewetting cycles. Acta Ecologica Sinica 33, 1–6.

Parchomchuk, P., Neilsen, G. H., Hogue, E. J. (1993). Effects of drip fertigation of NH4-N and P on soil pH and cation leaching. Canadian Journal of Soil Science, 73(2), 157-164.

Parkin, T.B., Sexstone, A.J., Tiedje, J.M. (1985). Adaptation of Denitrifying Populations to Low Soil pH. Appl. Environ. Microbiol. 49, 1053–1056.

Persson, T., Rudebeck, A., Jussy, J.H., Colin-Belgrand, M., Priemé, A., Dambrine, E., Karlsson, P.S., Sjöberg, R.M. (2000). Soil Nitrogen Turnover — Mineralisation, Nitrification and Denitrification in European Forest Soils, in: Schulze, P.D.E.-D. (Ed.), Carbon and

Nitrogen Cycling in European Forest Ecosystems, Ecological Studies. Springer Berlin Heidelberg, 297–311.

Persson, T., Wiren, A. (1995). Nitrogen mineralization and potential nitrification at different depths in acid forest soils. Plant and Soil 168, 55–65.

Pulleman, M., Tietema, A. (1999). Microbial C and N transformations during drying and rewetting of coniferous forest floor material. Soil Biology and Biochemistry 31, 275–285.

Prunty, L., Greenland, R. (1997). Nitrate leaching using two potato-corn N-fertilizer plans on sandy soil. Agriculture, ecosystems & environment, 65(1), 1-13.

Qian, P., Schoenau, J.J. (2002). Availability of nitrogen in solid manure amendments with different C:N ratios. Canadian journal of soil science 82, 219–225.

Randall, G.W., Sawyer, J.E. (2008). Nitrogen application timing, forms and additives. In: Final Report: Gulf Hypoxia and Local Water Quality Concerns Workshop, Upper Mississippi River Sub-Basin Hypoxia Nutrient Committee, American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, MI, pp. 73–85.

Rao, D.L.N., Giller, K.E., Yeo, A.R., Flowers, T.J. (2002). The Effects of Salinity and Sodicity upon Nodulation and Nitrogen Fixation in Chickpea (Cicer arietinum). Ann Bot 89, 563–570.

Recous, S., Mary, B., Faurie, G. (1990). Microbial immobilization of ammonium and nitrate in cultivated soils. Soil Biology and Biochemistry 22, 913–922.

Reichenberger, S., Bach, M., Skitschak, A., Frede, H. G. (2007). Mitigation strategies to reduce pesticide inputs into ground- and surface water and their effectiveness; A review, Science of The Total Environment, 384 (1–3), 1-35.

Rice, W.A., Olsen, P.E., Collins, M.M. (1995). Symbiotic effectiveness of Rhizobium meliloti at low root temperature. Plant Soil 170, 351–358.

Rietz, D. N., Haynes, R. J. (2003). Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity. Soil Biology and Biochemistry, 35(6), 845-854.

Riley, W. J., Ortiz-Monasterio, I., Matson, P. A. (2001). Nitrogen leaching and soil nitrate, nitrite, and ammonium levels under irrigated wheat in Northern Mexico. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 61(3), 223-236.

Rivett, M.O., Buss, S.R., Morgan, P., Smith, J.W.N., Bemment, C.D. (2008). Nitrate attenuation in groundwater: A review of biogeochemical controlling processes. Water Research 42, 4215–4232.

Russelle, M. P., Hauck, R. D., Olson, R. A. (1983). Nitrogen accumulation rates of irrigated maize. Agronomy Journal, 75(4), 593-598.

Robertson, G.P., Groffman, P.M. (2007). Nitrogen transformations. Soil microbiology, ecology, and biochemistry, 3rd edn. Academic/Elsevier, New York, 341–364.

Ross, D.S., Lawrence, G.B., Fredriksen, G. (2004). Mineralization and nitrification patterns at eight northeastern USA forested research sites. Forest Ecology and Management 188, 317–335.

Sahrawat, K.L. (1982). Nitrification in some tropical soils. Plant Soil 65, 281–286.

Sahrawat, K.L., Keeney, D.R. (1986). Nitrous Oxide Emission from Soils, in: Stewart, B.A. (Ed.), Advances in Soil Science, Advances in Soil Science. Springer New York, 103–148.

Sanchez-Diaz, M., Aparicio-Tejo, P., Gonzalez-Murua, C., Peña, J. I. (1982). The effect of NaCl salinity and water stress with polyethylene glycol on nitrogen fixation, stomatal response and transpiration of Medicago sativa, Trifolium repen and Trifolium brachycalycinum (subclover), Physiol. Plant., 54, 361-366.

Sánchez-Martín, L., Vallejo, A., Dick, J., M Skiba, U. (2008). The influence of soluble carbon and fertilizer nitrogen on nitric oxide and nitrous oxide emissions from two contrasting agricultural soils. Soil Biology and Biochemistry 40, 142–151.

Sangoi, L., Ernani, P. R., Silva, P. R. F. D. (2007). Maize response to nitrogen fertilization timing in two tillage systems in a soil with high organic matter content. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 31(3), 507-517.

Santos, D. V., Sousa, P. L., Smith, R. E. (1997). Model simulation of water and nitrate movement in a level-basin under fertigation treatments. Agricultural Water Management, 32(3), 293-306.

Sellstedt, A., Ståhl, L., Mattsson, U., Jonsson, K., Högberg, P. (1993). Can the 15N Dilution Technique be used to Study N2 Fixation in Tropical Tree Symbioses as Affected by Water Deficit? J. Exp. Bot. 44, 1749–1755.

Schepers, J. S., Varvel, G. E., Watts, D. G. (1995). Nitrogen and water management strategies to reduce nitrate leaching under irrigated maize. Journal of Contaminant Hydrology, 20(3), 227-239.

Shedeed, S. I., Zaghloul, S. M., Yassen, A. A. (2009). Effect of method and rate of fertilizer application under drip irrigation on yield and nutrient uptake by tomato. Ozean Journal of Applied Sciences, 2(2), 139-147.

Sierra, J. (1997). Temperature and soil moisture dependence of N mineralization in intact soil cores. Soil Biology and Biochemistry 29, 1557–1563.

Silva, J. A., Uchida, R. S. (2000). Plant Nutrient Management in Hawaii's Soils: Approaches for Tropical and Subtropical Agriculture. University of Hawaii at Manoa, 158p.

Sinclair, T.R., Muchow, R.C., Ludlow, M.M., Leach, G.J., Lawn, R.J., Foale, M.A. (1987). Field and model analysis of the effect of water deficits on carbon and nitrogen accumulation by soybean, cowpea and black gram. Field Crops Research 17, 121–140.

Siyal, A. A., Bristow, K. L., Šimůnek, J. (2012). Minimizing nitrogen leaching from furrow irrigation through novel fertilizer placement and soil surface management strategies, Agricultural Water Management, 115, 242-251.

Skopp, J., Jawson, M., Doran, J. (1990). Steady-State Aerobic Microbial Activity as a Function of Soil-Water Content. Soil Sci. Soc. Am. J. 54, 1619–1625.

Soussi, M., Ocaña, A., Lluch, C. (1998). Effects of salt stress on growth, photosynthesis and nitrogen fixation in chick-pea (Cicer arietinum L.). J. Exp. Bot. 49, 1329–1337.

Sparling, G. P., Littler, R., Schipper, L. A., Stevenson, B., Sherman, L., Russell, J. M. (2015). Changes in characteristics of soils irrigated with processing wastewater from three New Zealand dairy factories. Soil Research, 53(4), 448-460.

Stanford, G., Dzienia, S., Vander Pol, R.A. (1975). Effect of temperature on denitrification rate in soils. Soil Science Society of America Journal 39, 867–870.

Ste-Marie, C., Paré, D. (1999). Soil, pH and N availability effects on net nitrification in the forest floors of a range of boreal forest stands. Soil Biology and Biochemistry 31, 1579–1589.

Stevenson, F. J., Cole, M. A. (1999). Cycles of Soil: Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients, 2nd Edition. Wiley, New York, USA. 427p.

Stevenson, F.J. (1986). Cycles of Soil: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. Wiley. New York. 380p.

Suddick, E.C., Steenwerth, K., Garland, G.M., Smart, D.R., Six, J. (2011). Discerning Agricultural Management Effects on Nitrous Oxide Emissions from Conventional and Alternative Cropping Systems: A California Case Study, in: Guo, L., Gunasekara, A.S., McConnell, L.L. (Eds.), Understanding Greenhouse Gas Emissions from Agricultural Management. American Chemical Society, Washington, DC, 203–226.

Sutton, M.A., Howard, C., Erisman, J.W., Billen, G., Bleeker, A., Grennfelt, P., van Grinsven,

H., Grizzetti, B. (2011). The European Nitrogen Assessment, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 612p.

Tarre, S., Green, M. (2004). High-Rate Nitrification at Low pH in Suspended- and Attached-Biomass Reactors. Appl Environ Microbiol 70, 6481–6487.

Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. Proceedings of the National Academy of Sciences, 108(50), 20260-20264.

Thorburn, P.J., Dart, I.K., Biggs, I.M., Baillie, C.P., Smith, M.A., Keating, B.A. (2003a). The fate of nitrogen applied to sugarcane by trickle irrigation. Irrigation Science, 22, 201–209.

Thorburn, P.J., Cook, F.J., Bristow, K.L. (2003b). Soil-dependent wetting from trickle emitters: implications for system design and management. Irrigation Science, 22, 121–127.

Trasar-Cepeda, C., Gil-Sotres, F., Leirós, M.C. (2007). Thermodynamic parameters of enzymes in grassland soils from Galicia, NW Spain. Soil Biology and Biochemistry 39, 311–319.

Treusch, A.H., Leininger, S., Kletzin, A., Schuster, S.C., Klenk, H.-P., Schleper, C. (2005). Novel genes for nitrite reductase and Amo-related proteins indicate a role of uncultivated mesophilic crenarchaeota in nitrogen cycling. Environmental Microbiology 7, 1985–1995.

Valé, M. (2006). Quantification et prédiction de la minéralisation nette en azote du sol in situ, sous divers pédoclimats et systèmes de culture français. Ph.D. thesis, INPT-ENSAT, 183 pp + annexes

Valé, M., Mary, B., Justes, E. (2007). Irrigation practices may affect denitrification more than nitrogen mineralization in warm climatic conditions, Biology and fertility of soils, 43 (6), 641-651.

Van Grinsven, H. J. M., Ten Berge, H. F. M., Dalgaard, T., Fraters, B., Durand, P., Hart, A., Hofman, G., Jacobsen, B. H., Lalor, S. T. J., Lesschen, J. P., Osterburg, B., Richards, K. G., Techen, A.-K., Vertès, F., Webb, J., Willems, W. J. (2012). Management, regulation and environmental impacts of nitrogen fertilization in Northwestern Europe under the Nitrates Directive: a benchmark study. Biogeosciences, 9(12), 5143-5160.

Van Groenigen, J.W., Huygens, D., Boeckx, P., Kuyper, Th. W., Lubbers, I. M., Rütting, T., Groffman, P. M. (2015), The soil N cycle: new insights and key challenges, Soil 1,

235-256.

Verberne, E.L.J., Hassink, J., Willigen, P. de, Groot, J.J.R., Veen, J.A. van (1990). Modelling organic matter dynamics in different soils. Netherlands Journal of Agricultural Science 38, 221–238.

Verhagen, F.J.M., Laanbroek, H.J., Woldendrop, J.W. (1995). Competition for ammonium between plant roots and nitrifying and heterotrophic bacteria and the effects of protozoan grazing. Plant and Soil 170, 241–250.

Verstraete, W., Focht, D.D. (1977). Biochemical Ecology of Nitrification and Denitrification, in: Alexander, M. (Ed.), Advances in Microbial Ecology, Advances in Microbial Ecology. Springer US, 135–214.

Vetsch, J. A., Randall, G. W. (2004). Corn production as affected by nitrogen application timing and tillage. Agronomy Journal, 96(2), 502-509.

Viero, F., Bayer, C., Vieira, R. C. B., Carniel, E. (2015). Management of irrigation and nitrogen fertilizers to reduce ammonia volatilization. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 39(6), 1737-1743.

Vitousek, P.M., Andariese, S.W. (1986). Microbial transformations of labelled nitrogen in a clear-cut pine plantation. Oecologia 68, 601–605.

Vitousek, P.M., Aber, J.D., Howarth, H.W., Likens, G.E., Matson, P.A., Schindler, D.W., Schlesinger, W.H., Tilman, D. (1997). Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences, Ecological Applications, 7 (3), 737-750.

Vlek, P. L. G., Byrnes, B. H., & Craswell, E. T. (1980). Effect of urea placement on leaching losses of nitrogen from flooded rice soils. Plant and Soil, 54(3), 441-449.

Wang, D., Shannon, M.C., Grieve, C.M., Yates, S.R. (2000). Soil water and temperature regimes in drip and sprinkler irrigation, and implications to soybean emergence. Agricultural Water Management 43, 15–28.

Wang, W. J., Chalk, P. M., Chen, D., Smith, C. J. (2001). Nitrogen mineralisation, immobilisation and loss, and their role in determining differences in net nitrogen production during waterlogged and aerobic incubation of soils. Soil Biology and Biochemistry, 33(10), 1305-1315.

Ward, B. B. (2012). The Global Nitrogen Cycle. In: A. H. Knoll, D. E. Canfield and K. O. Konhauser, Editors, Fundamentals of Geomicrobiology, Wiley-Blackwell, Chichester, UK, 36-48.

Wiesler, F., Horst, W. J. (1994). Root growth and nitrate utilization of maize cultivars

under field conditions. Plant and Soil, 163(2), 267-277.

Wijler, J., Delwiche, C.C. (1954). Investigations on the denitrifying process in soil. Plant Soil 5, 155–169.

Xiang, S.-R., Doyle, A., Holden, P.A., Schimel, J.P. (2008). Drying and rewetting effects on C and N mineralization and microbial activity in surface and subsurface California grassland soils. Soil Biology and Biochemistry 40, 2281–2289.

Yoseftabar, S. (2012). Effect of split application of nitrogen fertilizer on leaf color chart values in hybrid rice (GRH1), International Journal of Biology 5 (1), 79-84.

Zahran, H.H. (1999). Rhizobium-Legume Symbiosis and Nitrogen Fixation under Severe Conditions and in an Arid Climate. Microbiol. Mol. Biol. Rev. 63, 968–989.

Zaman, M., Di, H. J., Cameron, K. C. (1999). A field study of gross rates of N mineralization and nitrification and their relationships to microbial biomass and enzyme activities in soils treated with dairy effluent and ammonium fertilizer. Soil Use and Management 15, 188–194.

Zeng, X. (2001). Global vegetation root distribution for land modeling. Journal of Hydrometeorology, 2(5), 525-530.

Zotarelli, L., Scholberg, J.M., Dukes, M.D., Muñoz-Carpena, R. (2007). Monitoring of Nitrate Leaching in Sandy Soils. Journal of Environment Quality 36(4), 953-962.

Chapitre IV

Effet de la technique d'irrigation sur la minéralisation de l'azote : étude expérimentale.

Mohammad Barakat[a,b,†], Bruno Cheviron[a], Rafael Angulo-Jaramillo[b], Cyril Dejean[a].

[a] IRSTEA, UMR G-EAU "Gestion de l'Eau, Acteurs et Usages", 361 rue Jean-François Breton, BP 5095, 34196 Montpellier Cedex 5, France

[b] Université de Lyon, UMR 5023 Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés, CNRS, ENTPE, Université Lyon 1, 3 rue Maurice Audin, 69518 Vaulx-en-Velin, France.

† Correspondant : mohammadbarakat83@yahoo.com

Résumé

La bonne connaissance de la fertilisation azotée est la base de l'agriculture de précision. Cependant, la détermination de la dose d'azote optimale est cruciale puisque celle-ci dépend des interactions complexes entre les plantes, le sol et les transformations de l'azote contrôlées à la fois par les conditions météo et les systèmes d'irrigation (Barakat et al., 2016).

Dans cette étude, la recherche qui détermine les flux d'azote et l'azote du sol potentiellement minéralisable, sous deux systèmes d'irrigation, permet de prévoir l'azote disponible pour les cultures le long de la saison culturale et d'établir une relation plus claire entre le cycle de l'azote et le système d'irrigation.

1. Introduction

L'application d'engrais en doses excessives et dans des stratégies mal pensées (dates d'apport, type de molécules utilisées, emplacement des fertilisants, complémentarité entre l'irrigation et la fertilisation) contribue à la dégradation des sols et à la contamination des eaux souterraines par lixiviation des quantités excédentaires d'azote (Ju et al., 2006). Pour rationner la dose d'engrais au plus près des besoins réels des cultures, il faut à la fois être capable, (i) de connaître les reliquats d'azote avant la mise en place de la culture, (ii), d'estimer la quantité d'azote qui proviendra de la minéralisation de l'humus du sol entre la date de semis et la date de maturité de la culture, et (iii), d'estimer la demande totale en azote de la plante. Cette demande est forte durant les premiers stades de la croissance mais cesse souvent avant l'atteinte de la maturité. Dans les points précédents, la minéralisation de l'azote organique est une source bénéfique. Elle influence directement le calcul des quantités d'engrais à apporter (Jarvis et al., 1996).

L'influence favorable de l'humidité du sol sur l'activité microbienne, et donc sur la minéralisation, est bien connue (Cabrera, 1993; Fierer and Schimel, 2002; Valé et al., 2007). Toutefois, une humidité excessive (proche de la saturation) empêche l'aération du sol et prive les micro-organismes de l'oxygène nécessaire à leur respiration, ce qui joue

contre la minéralisation. Les situations les plus favorables à la minéralisation sont celles dans lequelles à la fois l'humidité et la température du sol sont élevées sur des périodes assez longues et de manière relativement stable, conditions qui sont typiquement réunies l'été lorsque l'irrigation se fait en goutte-à-goutte enterré (GGE). A contrario, d'autres techniques d'irrigation peuvent s'avérer bien moins propices (Barakat et al., 2016). Par exemple, en irrigation par aspersion (ASP), l'application peu fréquente de forts volumes d'eau entraîne des perturbations importantes de l'état hydrique du sol, depuis la saturation (risque de lixiviation) jusqu'à un assèchement assez prononcé des couches superficielles du sol, soit deux conditions a priori défavorables pour la minéralisation (Thorburn et al., 2003). La littérature indique cependant l'existence d'un flash de minéralisation (*Birch effect*) au cours des cycles d'humidification et d'assèchement caractéristiques de l'aspersion ; flash qui survient au début de la désaturation du sol (Birch, 1958; Franzluebbers, 1999; Fierer and Schimel, 2002; Fierer et al., 2003; Mikha et al., 2005; Xiang et al., 2008).

Deux hypothèses ont été proposées afin d'expliquer cette augmentation (brève mais marquée) de la minéralisation :

- La sécheresse du sol diminue le potentiel matriciel du sol, ce qui réduit l'activité microbienne. En conséquence, les micro-organismes accumulent dans leurs cellules les solutés organiques et non organiques, afin de résister aux forces de succion. Ils réduisent leur potentiel matriciel pour atteindre l'équilibre avec les conditions locales. La réhumidification suivante (irrigation, précipitation) provoque alors la libération rapide de ces solutés vers la solution du sol, ce qui conduit au flash de minéralisation (Fierer et al., 2003; Xiang et al., 2008).
- Une deuxième explication est la rupture des agrégats du sol causée par les cycles d'humidification et assèchement. Ces cycles libèrent les matières organiques piégées dans les agrégats ou bien adsorbées sur les surfaces des particules argileuses. Dans ces cas, les matières organiques deviennent directement accessibles à l'activité microbienne dont elles sont le moteur. Ceci se traduit par une augmentation du taux de minéralisation (Franzluebbers, 1999; Bengtsson et al., 2003; Miller et al., 2005; Ouyang and Li, 2013).

Toutefois, l'ampleur du flash de minéralisation ainsi que l'influence de la technique d'irrigation sur la minéralisation sont encore mal connues. Ce sujet a été traité récemment

sous l'angle bibliographique (Barakat et al., 2016) bien que peu d'informations soient disponibles dans la littérature concernant l'influence de la technique d'irrigation sur le cycle et le bilan de l'azote. L'objectif du papier est alors de mettre en évidence la relation existante entre la technique d'irrigation (GGE ou ASP) et la minéralisation de l'azote dans le sol. Une étude expérimentale a été menée sur deux placettes de sol limono-argileux sur la station agricole de Lavalette, à l'Irstea Montpellier pour (i), chiffrer les quantités d'azote présent sous forme minérale dans le sol, (ii) en suivre l'évolution au cours du temps et (iii), comparer les effets sur la minéralisation des systèmes d'irrigation GGE et ASP.

2. Matériel et méthodes

Le site d'étude est le domaine expérimental de Lavalette (43.38°N, 3.50°E) situé à la limite nord de Montpellier, en France. Le sol est profond, d'origine colluvio-alluviale. L'horizon de surface du sol, celui qui est concerné par la minéralisation, possède une texture à dominante limoneuse (argile 17%, limon 43%, sable 40%). L'analyse physico-chimique indique des teneurs massiques faibles en carbone (1.5%) et en matière organique (2.1%). Le maïs utilisé pour cette expérimentation est la variété PR35Y65 de Pioneer (un hybride tardif) qui présente un rendement potentiel supérieur à 18 Mg ha^{-1}. Le semis a été effectué le 26 avril 2015 avec un semoir classique mono-graine en présence de résidus enterrés de la récolte précédente (les pailles du maïs).

La Fig.1 présente le site expérimental et les quantités d'azote appliquées dans les différentes parcelles en 2014 et 2015. L'estimation de la minéralisation a été faite en 2015 sur les parcelles A1-A2 (GGE) et B2 (ASP) pour lesquelles aucun apport d'azote n'a été réalisé. Le dispositif GGE est constitué d'une station de tête, équipée d'un tamis, d'un filtre à sable et d'un système d'injection des fertilisants par pompe doseuse, qui alimente un réseau de gaines enterrées à 35 cm de profondeur (Fig.35, zone A). L'irrigation par aspersion au canon a été utilisée dans la zone B.
L'humidité et la température du sol, connues pour être les principaux déterminants de la minéralisation, ont été mesurées en continu au moyen de deux stations Campbell dans l'horizon de surface des parcelles A1-A2 et B2.

L'estimation de la minéralisation au champ est obtenue pour les placettes cultivées sans aucun apport d'engrais (A1-A2 et B2). Par ailleurs, l'évolution de la quantité de nitrates

au cours du temps a été suivie à trois profondeurs dans le sol (0-10, 10-20 et 20-30 cm) sur chacune des placettes concernées. Celles-ci sont subdivisées en 3 blocs (bloc nord, bloc sud et un troisième bloc au milieu, entre les deux précédentes) afin d'améliorer la précision de calcul du stock azoté, pour chaque horizon. Les prélèvements ont été effectués à la tarière, à sept dates (Tableau 8). Les prélèvements ont eu lieu sur une surface d'environ 2500 m² pour les placettes A1-A2 et B2 (1426 et 1020 m² respectivement) au sein desquelles, 3 répétitions pour chaque prélèvement ont été effectuées. Une répétition dans chaque bloc permet d'obtenir une précision satisfaisante pour la teneur en azote minéral, à chaque horizon pour chaque date. Les échantillons de sol ont été stockés à -5°C dans des sacs fermés jusqu'à la date de l'analyse d'azote.

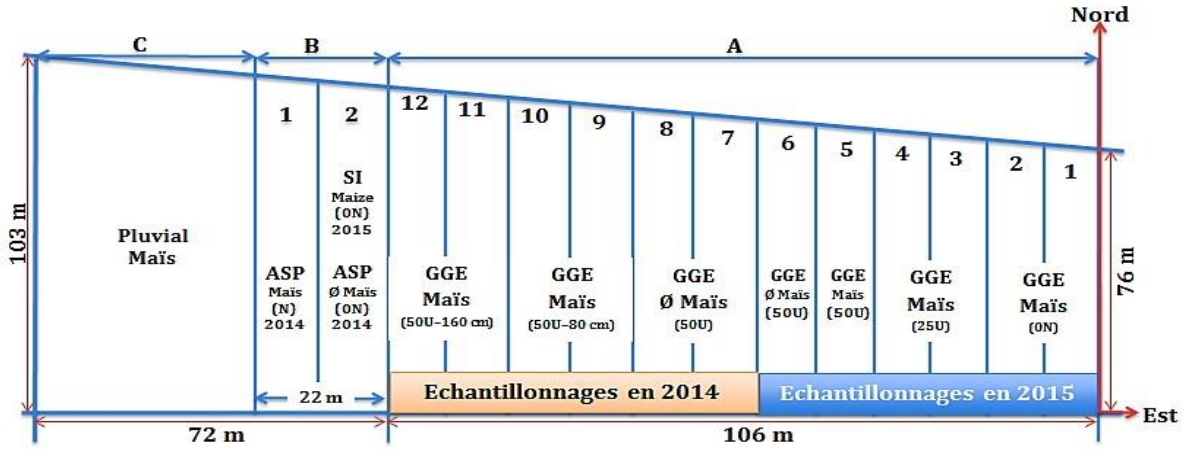


Figure 35. Schéma du site expérimental durant les années 2014 et 2015. Deux systèmes d'irrigation coexistent : l'irrigation par goutte-à-goutte enterré (GGE) dans les 12 sous-parcelles de la zone A et l'irrigation par aspersion (ASP) dans la zone B. Aucune irrigation n'est appliquée dans la zone C. Les mêmes parcelles A1-A2 et B2 ont été utilisées pour les mesures de température et de teneur eau en 2014, puis pour les prélèvements de sol avant analyses d'azote en 2015.

3. Résultats et discussion

3.1. Effet de la technique d'irrigation sur la teneur en eau et la température

L'activité bactérienne responsable de la minéralisation est supposée dépendre de l'humidité et de la température, elles-mêmes fonctions de la profondeur et du temps, avec

des dynamiques différentes entre GGE et ASP. L'activité bactérienne n'a pas été mesurée directement mais la Fig.36 indique les valeurs des contrôles de la minéralisation, pour une période choisie au début de l'été 2014 qui présente l'avantage de comporter une pluie [1], des épisodes d'irrigation [2, 3] et des enregistrements continus, ce qui n'a pas été le cas lors de la période d'irrigation de 2015. La Fig.36 représente un certain nombre d'éléments caractéristiques des différences entre GGE et ASP, susceptibles d'expliquer la minéralisation sous GGE et ASP (Section 3.2). Comme attendu (Barakat et al., 2016), les températures moyennes relevées dans les horizons de surface sont plus élevées en GGE qu'en ASP et les teneurs en eau des horizons de surface sont bien moins variables en GGE qu'en ASP. A contrario, les teneurs en eau aux alentours de la gaine d'irrigation (les gaines sont à 35 cm de profondeur) sont à la fois plus fortes et moins variables en GGE qu'en ASP. Dans les sols de la station expérimentale, la capillarité ne permet pas la remontée de l'eau au-delà d'une dizaine de centimètres (Rosique 2011, *unpublished data*) donc les irrigations GGE n'ont pas d'effet significatif sur les teneurs en eau des horizons supérieurs (0-30 cm). Bien que la température mesurée soit légèrement plus favorable à l'activité microbienne en GGE, la teneur en eau semble suffisamment faible pour être un frein à l'activité microbienne.

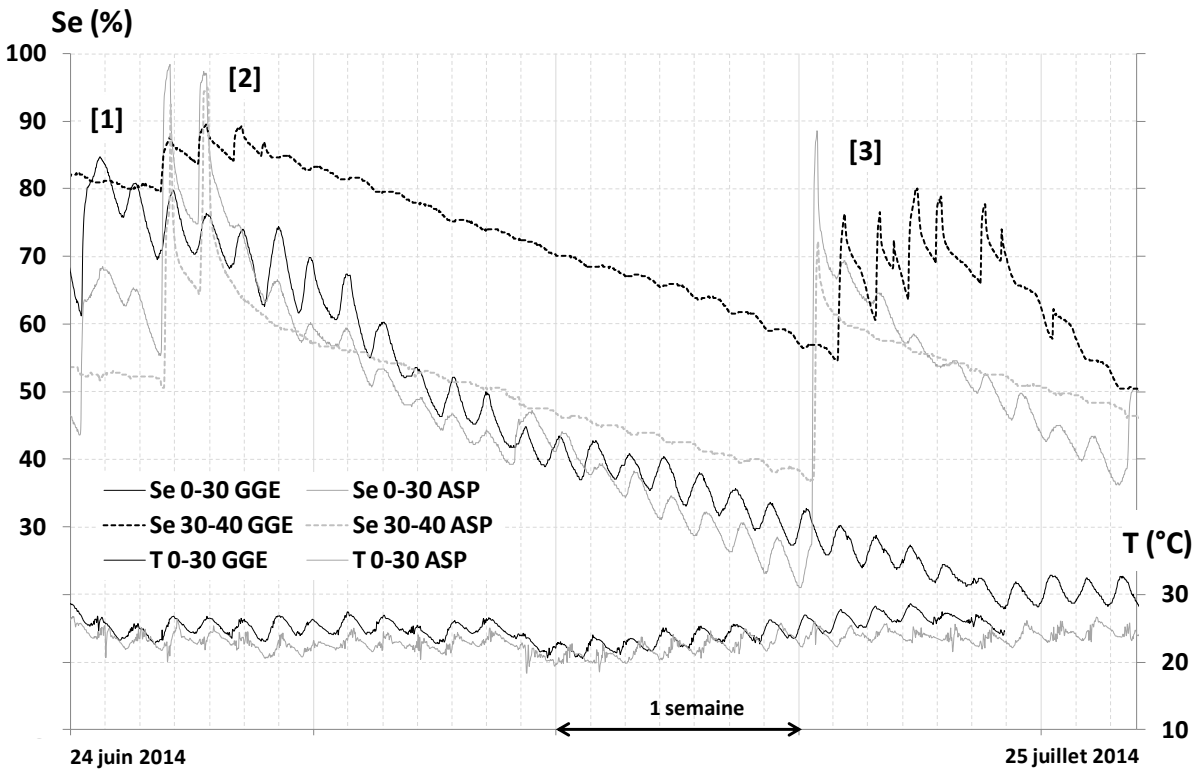


Figure 36. Chronique des indices de saturation (ratio de la teneur en eau à la porosité) et des températures du sol, en valeurs moyennes sur les profondeurs 0-30 et 30-40 cm, pour les parcelles irriguées en goutte-à-goutte enterré (GGE, parcelles A1-A2, Fig.35) et en aspersion (ASP, parcelles B1-B2) pour le début de l'été 2014 (24 juin au 25 juillet). La notation [1] indique un épisode de pluie, [2] et [3] indiquent des épisodes d'irrigation identifiables par les pics sur les courbes de teneur en eau.

3.2. Effet de la technique d'irrigation sur la concentration de nitrates

Les données les plus complètes pour évaluer l'effet direct de la technique d'irrigation ont été acquises en 2015. Les chroniques des quantités de nitrates ($N\text{-}NO_3^-$) mesurées dans le sol sont consignées dans le Tableau 8.

Tableau 8. Quantités de nitrates mesurées à différentes profondeurs du sol, lors de la saison 2015, dans les parcelles A1-A2 (Fig.1) irriguées en goutte-à-goutte enterré (GGE) et B1-B2 irriguées en aspersion (ASP)

Dates	GGE				ASP			
	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	moy.	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	moy.
	mg kg^{-1}							
13/04/2015	5.75	3.92	4.38	4.68	4.58	3.44	4.12	4.05
24/04/2015	2.36	2.82	1.94	2.37	1.11	1.16	2.31	1.53
21/05/2015	1.48	1.98	3.10	2.19	4.20	5.81	7.92	5.98
28/06/2015	1.65	2.53	1.47	1.88	5.81	8.67	13.67	9.38

13/07/2015	0.71	1.53	0.61	0.95	9.72	11.44	6.93	9.36
28/07/2015	0.65	1.47	0.55	0.89	12.32	4.16	3.98	6.82
30/08/2015	1.8	1.26	0.62	1.23	5.11	3.74	2.15	3.67

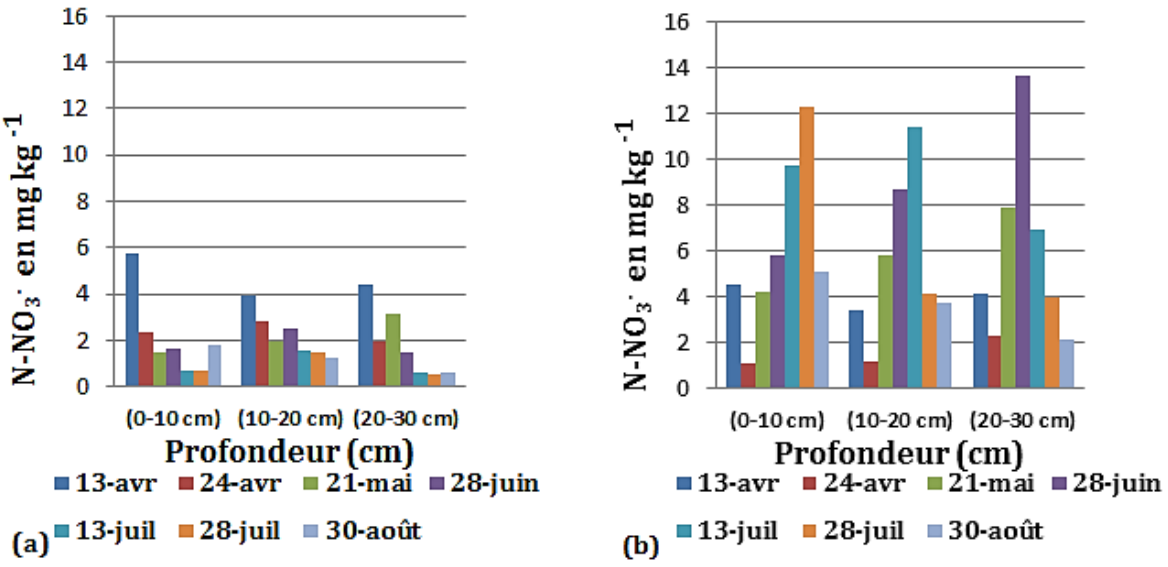


Figure 37. Quantités de nitrates mesurées à différentes profondeurs du sol, lors de la saison 2015, dans les parcelles A1-A2 (Fig.35) irriguées en goutte-à-goutte enterré (GGE) et B1-B2 irriguées en aspersion (ASP)

Dans le sol irrigué par le GGE, les résultats obtenus assument une production de N-NO_3dans la couche 3 (20-30 cm) et atteint sa valeur maximale (3,1 mg kg^{-1}) au mois de mai. Dans cette période, les conditions favorables de température et d'humidité du sol sont réunies pour créer un milieu approprié à la minéralisation près des gaines enterrées (profondeur 35 cm) (figure 37a). En revanche, la baisse prononcée de la production de N-NO_3^- dans la couche 0-20 cm peut-être expliquée par la faible humidité dominante dans cette tranche de sol.

La quantité d'azote minéralisé cumulée, N-NO_3^-, est plus élevée sur la saison pour le sol irrigué par aspersion que pour le sol irrigué en goutte à goutte enterré.

Selon nos résultats, l'augmentation de la valeur potentielle de minéralisation en irrigation par aspersion peut atteindre une valeur maximale d'environ 13 mg kg^{-1} au mois de juin où la température et l'humidité du sol sont favorables. Alors que la valeur de la minéralisation ne dépasse pas 4 mg kg^{-1} pour la même période sous l'irrigation GGE.

3.3. Relation Plante-Irrigation-Minéralisation

En relation avec le développement du stade végétatif du maïs, on peut constater trois périodes principales en irrigation par aspersion (Fig. 38a). La diminution de la concentration de $N\text{-}NO_3^-$ au début de l'étude expérimentale (Période1 - Figure 38a, b) est expliquée par la quantité consommée pour la dégradation des pailles enfouies au moment du semis, nommée également « faim d'azote ».

Il est bien connu que l'absorption de l'azote par le maïs est assez lente dans les six ou sept premières semaines de croissance. Cette période correspond à une augmentation de la production en nitrate par minéralisation. Cette augmentation continue jusqu'à la fin du mois de juin ou début juillet (Période 2 - Figure 38a) où l'absorption de l'azote dans le sol devient importante, suivie par une forte diminution de la concentration en nitrate dans les 30 premiers centimètres du sol en raison de l'intense besoin du maïs qui peut atteindre jusqu'à 3 $kg_N\ ha^{-1}\ j^{-1}$ (Période 3 - Figure 38a). Durant cette période, le maïs prélève la majorité de ses besoins. L'absorption racinaire est généralement plus importante à partir du mois de juillet, particulièrement dans la couche 20-30 cm où se trouve le maximum des racines. Elle est moindre dans les deux premières couches, 0-10 et 10-20 cm, où l'extraction racinaire ne commence qu'à partir de la fin du mois de juillet. L'humidité plus faible dans les horizons supérieurs (0-30 cm, où l'activité microbienne est la plus importante) est moins favorable pour la minéralisation. Ceci explique pourquoi la relation plante-irrigation-minéralisation est moins nette pour l'irrigation GGE (Figure 5b).

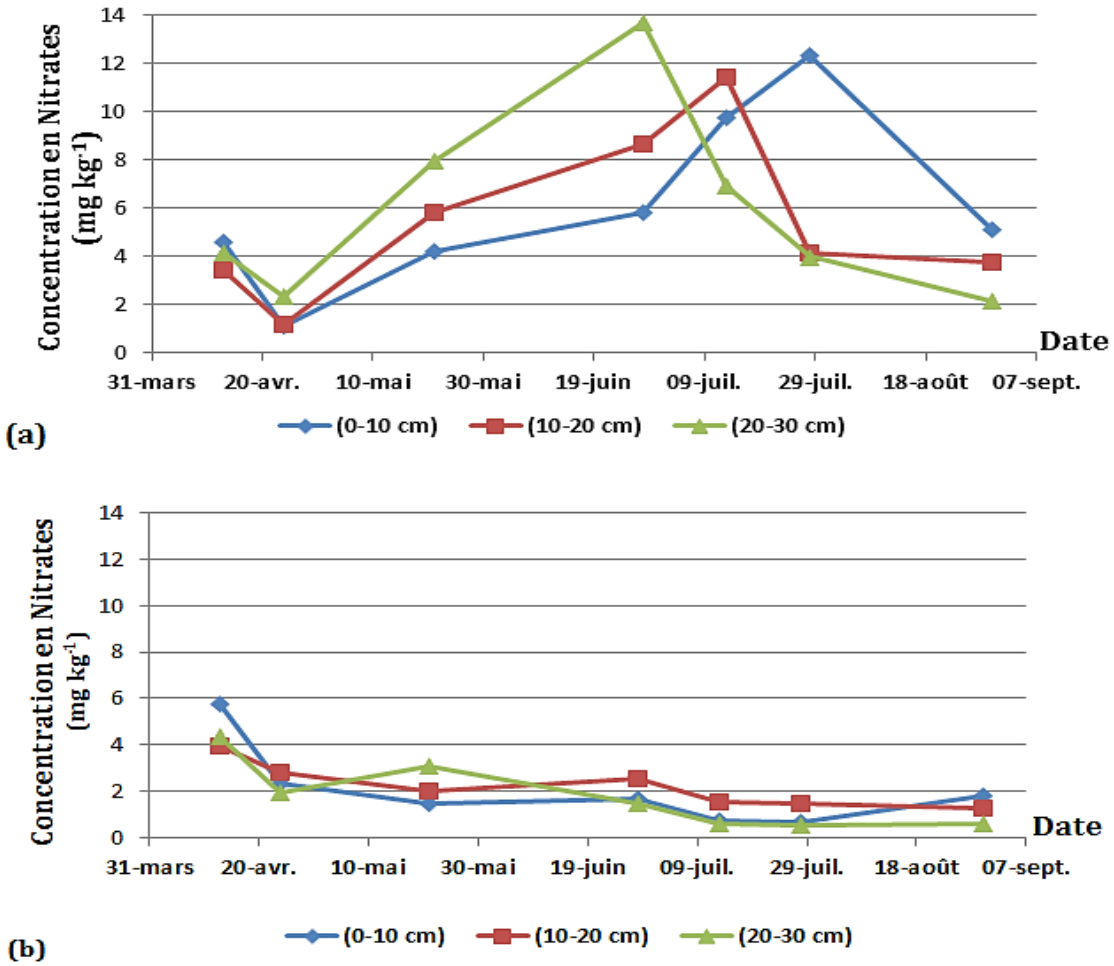


Figure 38. Concentration en nitrates sous l'irrigation par ASP (a) et en GGE (b) pour trois périodes végétatives du maïs. (Période 1 : 13 - 24 avril ; Période 2 : 21 mai - 1 juillet et Période 3 : 13 juillet - 30 août)

3.4. Détermination de la valeur potentielle de la minéralisation

Dans l'hypothèse où il n'y a pas eu ni lessivage, ni pertes par voie gazeuse sur les deux placettes (traitement 0 N), l'azote présent dans le sol et dans les plants de maïs donne une estimation de la minéralisation sous les cultures irriguées à condition de connaître tous les autres paramètres du bilan (N initial, N sol en cours de la saison, N dans les plantes et N à la récole), qui sont détaillés dans le Tableau 9.

Tableau 9. Estimation de la valeur potentielle de la minéralisation (kgN ha-1 j-1) sous les deux systèmes d'irrigation (GGE et ASP).

Traitement	Site	Tranche (cm)	Stock initial ($mg.kg^{-1}$)	Stock initial ($kg.ha^{-1}$)	Stock final ($kg.ha^{-1}$)	Apport (kg)	Plante absorbation	Min ($kg_N\ ha^{-1}$)	Min ($kg_N\ ha^{-1}\ j^{-1}$)
0N	A1-A2	0-30	15.48	20.12	4.78	0	91	**75.66**	**0.62**
0N	B2	0-30	12.14	15.78	14.30	0	91	**89.52**	**0.73**

La valeur utilisée pour exprimer l'absorption de l'azote par le maïs, est référencée dans (Nemeth, I. 2001).

Nous avons quantifié la minéralisation pour (t= 123 jours) à (89,52 Kg N/ha) pour la placette B2 et à (75,66 Kg N/ha) pour la placette A (1 et 2) suivant l'équation (10) :

$$N_{min} = N_{fin} + N_p - N_{ini} \quad (10)$$

N_{min} : la valeur potentielle de la minéralisation en kg ha^{-1}

N_{fin} : la teneur finale de l'azote nitrique en kg ha^{-1}

N_p : l'absorption par la plante en kg ha^{-1}

N_{ini} : la teneur initiale de l'azote nitrique en kg ha^{-1}

D'après nos résultats, le choix du système d'irrigation agit significativement sur la minéralisation de l'azote. Cela permet d'ajuster la quantité d'engrais en fonction du mode d'irrigation utilisé.

4. Conclusion

La minéralisation de l'azote a été évaluée par l'analyse de la solution du sol suite à des prélèvements du sol le long de la saison du maïs irrigué par deux systèmes GGE et ASP. En fonction des conditions d'humidité et de température propres à chaque système d'irrigation, il ressort que la minéralisation varie effectivement selon la méthode d'irrigation utilisée (75.66 kgN ha^{-1} en ASP et 89.52 kgN ha^{-1} en GGE), à cause des différences qui existent entre les profils d'humidité et de température sur les 30 premiers centimètres de sol. Ce travail peut servir à rationner les doses d'engrais au plus près des besoins réels des cultures et limiter la contamination des eaux souterraines suite à la lixiviation de la quantité apportée non utilisée par les plantes.

Références du chapitre IV

Barakat, M., Cheviron, B., & Angulo-Jaramillo, R. (2016). Influence of the irrigation technique and strategies on the nitrogen cycle and budget: A review. Agricultural Water Management, 178, 225-238.

Bengtsson, G., Bengtson, P., & Månsson, K. F. (2003). Gross nitrogen mineralization-, immobilization-, and nitrification rates as a function of soil C/N ratio and microbial activity. Soil Biology and Biochemistry, 35(1), 143-154.

Birch, H. F. (1958). The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. Plant and soil, 10(1), 9-31.

Cabrera, M. L. (1993). Modeling the flush of nitrogen mineralization caused by drying and rewetting soils. Soil Science Society of America Journal, 57(1), 63-66.

Fierer, N., & Schimel, J. P. (2002). Effects of drying–rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations. Soil Biology and Biochemistry, 34(6), 777-787.

Fierer, N., Schimel, J. P., & Holden, P. A. (2003). Influence of drying–rewetting frequency on soil bacterial community structure. Microbial ecology, 45(1), 63-71.

Franzluebbers, A. J. (1999). Microbial activity in response to water-filled pore space of variably eroded southern Piedmont soils. Applied Soil Ecology, 11(1), 91-101.

Jarvis, S. C., Stockdale, E. A., Shepherd, M. A., & Powlson, D. S. (1996). Nitrogen mineralization in temperate agricultural soils: processes and measurement. Advances in Agronomy, 57, 187-235.

Ju, X. T., Kou, C. L., Christie, P., Dou, Z. X., & Zhang, F. S. (2007). Changes in the soil environment from excessive application of fertilizers and manures to two contrasting intensive cropping systems on the North China Plain. Environmental Pollution, 145(2), 497-506.

Mikha, M. M., Rice, C. W., & Milliken, G. A. (2005). Carbon and nitrogen mineralization as affected by drying and wetting cycles. Soil Biology and Biochemistry, 37(2), 339-347.

Miller, A. E., Schimel, J. P., Meixner, T., Sickman, J. O., & Melack, J. M. (2005). Episodic rewetting enhances carbon and nitrogen release from chaparral soils. Soil Biology and Biochemistry, 37(12), 2195-2204.

Nemeth, I. (2001). Devenir de l'azote sous irrigation gravitaire. Application au cas d'un

perimètre irrigué au Mexique. Sciences et techniques du Languedoc. Université de Montpellier II. 260p.

Ouyang, Y., & Li, X. (2013). Recent research progress on soil microbial responses to drying–rewetting cycles. Acta Ecologica Sinica, 33(1), 1-6.

Thorburn, P. J., Cook, F. J., & Bristow, K. L. (2003). Soil-dependent wetting from trickle emitters: implications for system design and management. Irrigation Science, 22(3-4), 121-127.

Valé, M., Mary, B., & Justes, E. (2007). Irrigation practices may affect denitrification more than nitrogen mineralization in warm climatic conditions. Biology and Fertility of Soils, 43(6), 641-651.

Xiang, S. R., Doyle, A., Holden, P. A., & Schimel, J. P. (2008). Drying and rewetting effects on C and N mineralization and microbial activity in surface and subsurface California grassland soils. Soil Biology and Biochemistry, 40(9), 2281-2289.

Chapitre V

Numerical simulation of soil nitrate dynamics with HYDRUS-2D for experimental maize plots under sprinkler and subsurface drip irrigation[10]

Mohammad Barakat[a, b, c], Bruno Cheviron[a,*], Benjamin Deweppe[b], Cyril Dejean[a], Laurent Lassabatere[b], Rafael Angulo-Jaramillo[b],

[a] IRSTEA, UMR G-EAU "Gestion de l'Eau, Acteurs et Usages", 361 rue Jean-François Breton, BP 5095, 34196 Montpellier Cedex 5, France

[b] Université de Lyon, UMR 5023 Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés, CNRS, ENTPE, Université Lyon 1, 3 rue Maurice Audin, 69518 Vaulx-en-Velin, France.

[c] Department of Rural Engineering, Faculty of Tishreen, Lattakia, Syria

* Corresponding author: bruno.cheviron@irstea.fr

[10] This paper is submitted to ***Agricultural Water Management journal***.

Abstract

This paper aims at the numerical simulation of soil nitrate dynamics under sprinkler and subsurface drip irrigation, showing the spatiotemporal patterns of soil water content and nitrates concentration for various initial conditions and fertilisation strategies. Although a popular, reference tool for soil physicists and agronomists, the HYDRUS-2D software had not yet been used to place emphasis on the effects of subsurface fertigation. This exploratory work therefore proposes recipes for a convenient geometrical problem representation before tackling model calibration and validation issues. The dataset used in this study was assembled from intensive experimental campaigns taking place in 2014 and 2015 on the Lavalette experimental station, near Montpellier, France, consisting in more of 2000 soil samples and as many analyses of soil nitrogen content, in maize plots. The migration of nitrates with the wetting front was correctly simulated for both irrigation techniques, and so were root water and nitrogen uptakes, confirming already-existing qualitative knowledge by quantitative results. The assessment of the impact of irrigation techniques on lixiviation confirms that significant differences in nitrates losses may be associated with local fertigation practices. Moreover, a far lesser reduction of root uptake is obtained by application of fertigation "pulses" and the use of reduced doses.

Summary

1. INTRODUCTION 119

2. MATERIAL AND METHODS 121

2.1. EXPERIMENTAL SITE 121

2.1.1. Location and soil type 121

2.1.2. Climate 121

2.1.3. System installation and design of field experiments 122

2.1.4. Measurement campaigns and fertigation strategies 122

2.2.1. Water flow 124

2.2.2. Solute flow 126

2.2.3. Spatial discretization and model parameterization 126

2.2.4. Initial and intermediate conditions 127

2.2.5. Boundary conditions 128

3. RESULTS AND DISCUSSION 128

3.1. CALIBRATION AND VALIDATION 128

3.1.1. Calibration from water content for subsurface drip irrigation 128

3.1.2. Validation from water content and nitrate concentrations for subsurface drip irrigation 130

3.1.3. Validation from water content and nitrate concentrations for sprinkler irrigation 133

3.1.4. Numerical comparisons of lixiviation between sprinkler and subsurface drip irrigation 135

3.2. FOCUS ON NUMERICAL SIMULATIONS OF SUBSURFACE DRIP IRRIGATION 136

3.2.1. Influence of the initial conditions and antecedent practices 136

3.2.2. Water and nitrogen uptake by plant roots 138

3.2.3. Effects of the irrigation and fertigation strategies and doses 139

1. Introduction

The spatiotemporal pattern of nitrogen concentration in unsaturated agricultural soils directly depends on water movements, exhibiting thus noticeable differences between irrigation techniques (Santos et al., 1997; Asadi et al., 2002; Zhang et al., 2015; Barakat et al., 2016). For example, sprinkler irrigation resorts to infrequent applications of large water amounts responsible for ponding and the temporary saturation of the first soil millimetres, typically because the break of soil surface aggregates results in the detachment of fine particles, in the obstruction of the larger soil pores, and therefore in low infiltration rates. And second, water is driven downwards by gravity in a 1D pattern, significantly increasing the saturation index in the whole subsoil root zone (Cote et al., 2003). By contrast, surface and subsurface drip irrigation deliver limited water amounts, at frequent intervals, so as to maintain rather high local water contents in "wet bulbs", during irrigations, though generally not reaching saturation. As a consequence, water percolation occurs in a radial direction from the emitter, under the combined effects of capillary and gravity forces, giving the wet bulb an elliptical shape whose characteristics are dictated by soil type, irrigation amount and irrigation frequency (see Oron et al., 1999 or Lassabaterre et al., 2009) for general insights on the numerical treatment of infiltration under sources of circular shape). Hence, the appropriate management of nitrogen transfer in agricultural soils is closely related to the controls possibly exerted on water movements in the vadose zone, first through the choice of relevant irrigation techniques (Haynes, 1985).

Knowledge on the mechanisms of water and nitrogen transfers in irrigated soils may either be gained from experimental campaigns or from modelling approaches (Patel and Rajput, 2008) with multiple possible approaches to simulate water movements (Brandt et al., 1971) as well as the transport of non-reactive solutes (Bresler, 1975) in the 1D patterns of flood or sprinkler irrigation or the 2D/3D patterns of fluxes that emanate from the buried sources of subsurface drip irrigation (Ben-Asher and Phene, 1993 ; Coelho and Or, 1996). Among others, Mmolawa and Or (2000) presented a semi-analytical model to describe and predict the transport of water and non-reactive solutes from a buried point source, with a good match between numerical and experimental results. However, the release of HYDRUS-1D then HYDRUS-2D (Simunek et al., 1998, 1999) and its rapid gain in popularity have triggered and allowed numerous research studies interested in the fine description of water, solute and heat transfer in the unsaturated zone. This software solves Richards equation (Richards, 1931) in a modified version that accounts for preferential flows (through a dual porosity model that distinguishes mobile and immobile water contents) and also handles sink terms associated with root activity, which makes it especially relevant for agricultural applications. HYDRUS-1D and 2D have thus been widely used to simulate multiple irrigation and fertigation strategies (e.g Cote et al., 2003; Gärdenäs et al., 2005; Hanson et al., 2006; Phogat et al., 2013). Recent improvements in computational power have allowed then facilitated the study of more and more complex systems and geometries, among which subsurface drip irrigation

equipment, taking advantage of the successive evolutions of HYDRUS-2D (Skaggs et al., 2004; Provenzano, 2007; Kandelous and Simunek, 2010).

Although the present paper is the first to address nitrogen fate under subsurface drip irrigation systems with HYDRUS-2D in real field conditions (at least to the authors knowledge), there are a few studies in the literature to which it could be compared. For example, Cote et al. (2003) used HYDRUS-2D to model the transport of non-reactive solutes from a point source buried at 0.3 m under the hypothesis of zero initial concentration but without reference to any experimental data. Li and Liu (2011) tested the effect of the depth of the drip tape on the distribution of water and nitrates but only in the laboratory. Finally, only few experimental datasets seem available to quantify the nitrogen dynamics under subsurface drip irrigation: the reason is that the spatiotemporal patterns of water and nitrogen movements are more complex under subsurface drip irrigation than under sprinkler irrigation (for example) which makes the dedicated experimental studies far more demanding, costly and even difficult to decipher (Kachanoski et al., 1994; Li et al., 2003; Zhang et al., 2015). Here, the objective is to compare experimentally and numerically subsurface drip and sprinkler irrigation with regards to water movement and nitrates in the soil. The studied site gathers several cultivated subplots allowing for different treatments, located near Montpellier, France. Data collection consisted in two intensive campaigns (2014 and 2015) of soil water and nitrogen content measurements, under sprinkler and subsurface drip irrigation thus with procedures intended to capture the expected specific spatiotemporal patterns of water and nitrogen dynamics.

The manuscript is organized as follows. Section 2 presents the experimental site and details the experimental campaigns (Section 2.1) then indicates which are the key equations of HYDRUS-2D for the present purposes, also describing the choices made for model parameterization, initial and boundary conditions (Section 2.2). Section 3 first deals with the calibration and validation of the model, exhibiting noticeable differences between subsurface drip irrigation and sprinkler irrigation in the patterns of water content and nitrates concentration (Section 3.1). Emphasis is then placed on subsurface drip irrigation (Section 3.2), describing the influence of initial conditions on simulation results (Section 3.2.1), the patterns of root water and nitrogen uptake (Section 3.2.2) and finally the effects of various irrigation strategies and fertigation doses (Section 3.2.3). Section 4 provides concluding remarks, discusses practical applications and future research leads.

2. Material and Methods

2.1. Experimental site

2.1.1. Location and soil type

The data collection campaigns took place at the experimental domain of Lavalette (43.38°N, 3.50°E), located north of Montpellier (France), near the confluence of the Lez river and the ephemeral Lironde stream. The plots used in this study have deep colluvio-alluvial undeveloped brown soils (Ruelle, 1995). Soil texture goes from loamy to clay-loam with an apparent density of 1.4 g cm^{-3} and a neutral pH over the whole soil profiles. The daily monitoring of climatic data (air temperature, rainfall, and potential evapotranspiration) was performed by an automated meteorological station installed on site. In complement, neutron probes, TDR probes, tensiometers and Campbell stations were used to measure the water status of the soil and plants, either manually (the neutron probes were used at selected times only) or automatically.

2.1.2. Climate

The experimental station benefits from a Mediterranean climate, with mean monthly temperatures of 6°C in January and 22°C in July. The mean annual rainfall was about 838 mm for the two-year period (2014-2015) examined here. The heaviest rains occurred in September 2014 and August 2015, which is typical of the region. Figure 39 shows the water deficit on a monthly basis, especially for the spring and summer months when the Penman evapotranspiration exceeds the rain amounts and irrigation is most needed to increase crop yield. More precisions on site properties and climate may be found in Mubarak et al. (2009) and Albasha et al. (2015).

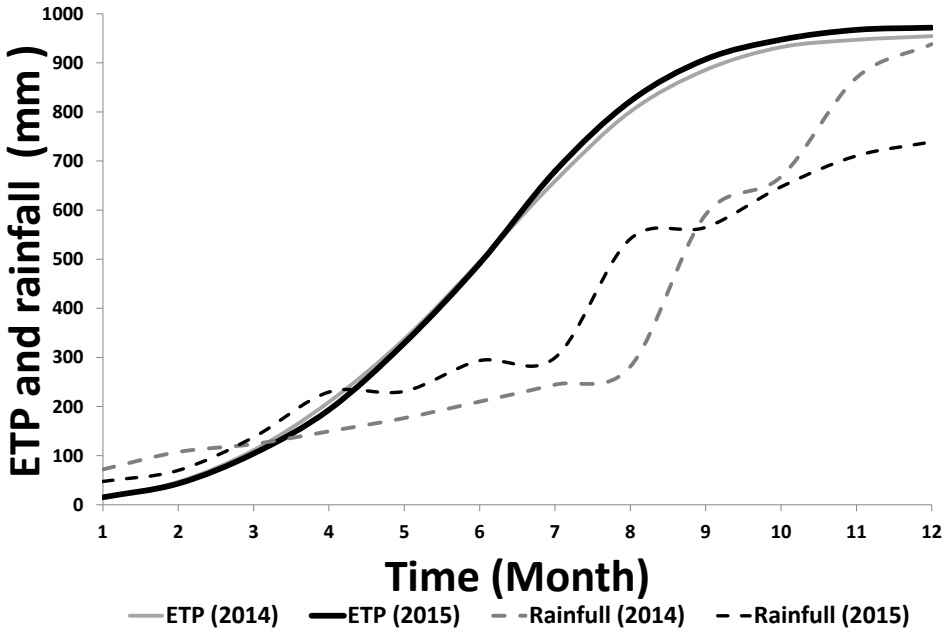


Figure 39. Cumulative potential evapotranspiration (ETP) and rainfall (mm) recorded during 2014 and 2015.

Figure 39. Cumulative potential evapotranspiration (ETP) and rainfall (mm) recorded during 2014 and 2015.

2.1.3. System installation and design of field experiments

A new subsurface drip irrigation network was installed in March 2014, covering about 1 ha out of the total area of 1.6 ha used for the experiments (Fig.40, zone A). The parallel drip tapes are separated by a 80-cm distance and the irrigation system may be tested either with 80-cm or 160-cm distances between "active" tapes. Only the latter option is explored here, for more contrasted situations between crop rows. The tapes were buried at 35 cm (as recommended by Douh and Boujelben, 2011), the distance between emitters is 50 cm and each emitter is able to deliver 0.53 L h^{-1} for a working pressure of 0.5 to 1.0 bar. The head pumping station is equipped with a filtration system and fertigation facilities. The remaining part (0.6 ha) of the experimental plot was divided into two zones (B) and (C) as indicated in Fig.40. Sprinkler irrigation was used on zone B: integral cover in 2014 and raingun in 2015. Zone C was left without irrigation during 2014 and 2015 for so-called "rainfed treatments".

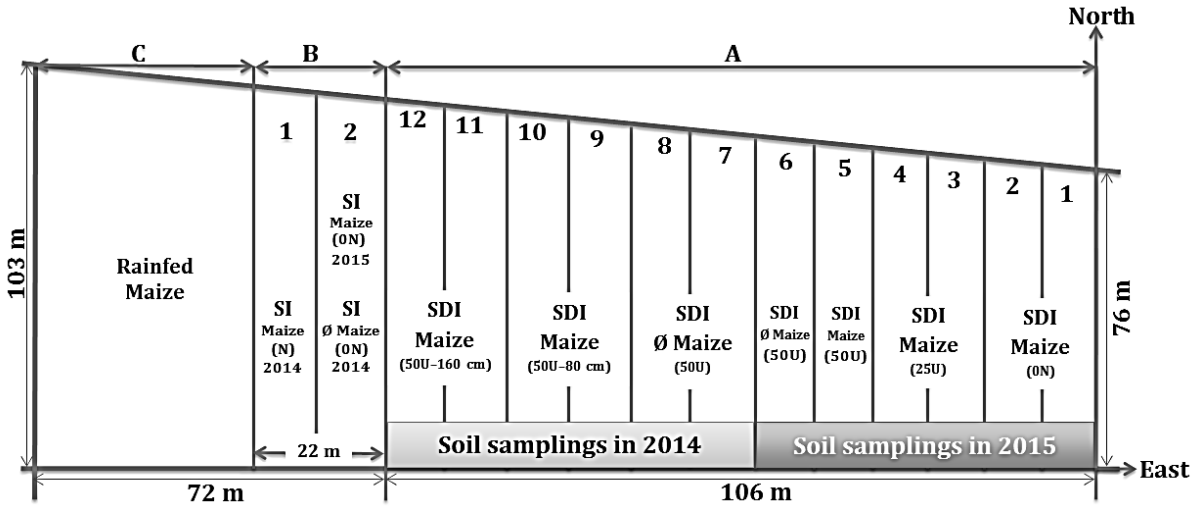


Figure 40. Layout of the experimental plot during 2014 (pale grey) and 2015 (dark grey). Two irrigation systems coexist: subsurface drip irrigation in the 12 subplots of zone A and sprinkler irrigation in the 2 subplots of zone B. No irrigation was applied in zone C. Two irrigation and fertigation strategies were applied in 2014, S1: 50 nitrate units on A11-12 and S2: 50 nitrate units on A7-8. Five strategies were applied in 2015, S3: 50 nitrate units on A6, S4: 50 nitrate units on A5, S5: 25 nitrate units on A3-4, S6: 50 nitrate units on A5 and S7: 25 nitrate units on A3-4. Additional tests consisted of no nitrate applications on B1 but a local manual fertilisation of 25 kg of nitrates on 700 m2 in subplot B2. Figure 41 details all strategies.

2.1.4. Measurement campaigns and fertigation strategies

Three vertical neutron probes access tubes were installed on each of the 12 subplots comprised in zone A, at distances of 10, 30 and 50 cm of the buried drip tape. In zone B two similar tubes were installed, the first one in the maize row, the second one in the inter-row. The water and nitrogen content measurements were made from manual 10-cm depth soil samplings, from soil surface to 160 or even 180 cm depth in places, at 4 dates (1, 2, 4 and 7 days) after each fertigation episode. In complement, the water amount brought by sprinkler irrigation in zone B

was recorded by pluviometers. Other soil samplings have been collected before sowing and immediately after harvesting to assess the initial and final conditions in terms of nitrogen residues, for both the A and B zones. Neither irrigation nor fertilisation were applied in zone C. The intensive measurements partly described in Fig.40 were intended to capture the expected wide diversity of cases between zones (A, B, C), distances to the drip tapes (10, 30 and 50 cm), soil samplings depths (from 0-10 to 170-180 cm) and dates (1, 2, 4 and 7 days after each fertigation), with or without maize (in only a few cases). In addition different irrigation and fertigation strategies were tested, with the objectives to deliver different nitrate units (25U or 50U, i.e. 25 or 50 kg ha^{-1}) and to change both the scheduling and the specific duration of fertigation within irrigation events (Fig.41).The nitrate concentrations used in S1 to S4 were 1.4 g L^{-1}, then 1.6, 3.5 and 3.2 g L^{-1} were used for S5, S6 and S7, respectively. The most frequent fertigation strategy applied on site was to deliver 50 units within long durations (5 hr), as in S1 to S4, at multiple times during the crop growth period. Although thought to exceed plant demands, S1 can thus be considered as the reference strategy, against which alternative strategies (25 units and/or applications in pulses) needed to be explored.

Strategy S1 : 50U / 5hr / Maize

Date	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h	24h	1h
18.07.2014																									
Location A11-12													I				F					I			

Strategy S2 : 50U / 5hr / No maize

Date	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h	24h	1h
18.07.2014																									
Location A7-8													I				F					I			

Strategy S3 : 50U / 5hr / No maize

Date	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h	24h	1h
12.07.2015																									
Location A6													I				F					I			

Strategy S4 : 50U / 5hr / Maize

Date	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h	24h	1h
12.07.2015																									
Location A5													I				F					I			

Strategy S5 : 25U / 2hr / Maize

Date	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h	24h	1h
12.07.2015																									
Location A3-4													I		F							I			

Strategy S6 : 50U Pulse / 2hr / Maize

Date	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h	24h	1h
29.08.2015																									
Location A5													I		F							I			

Strategy S7 : 25U Pulse / 1hr / Maize

Date	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h	24h	1h
29.08.2015																									
Location A3-4													I		F							I			

Figure 41. Scheduling of the tested irrigation (I) and fertigation (F) strategies S1 to S7, for subsurface drip irrigation in 2014 and 2015, indicating the total nitrate units delivered (e.g. 25U=25 kg ha-1), the scheduling and specific duration of fertigation, the presence of maize (or not), the application date and the location in Fig.40.

2.2. Design of numerical simulations with HYDRUS-2D

2.2.1. Water flow

HYDRUS-2D models water, solute and heat transfer in multi-layer saturated or unsaturated soils. Water movements are described by solving Richards equation (Richards, 1931), knowing the characteristic curves for water retention θ(h) and hydraulic conductivity K(h):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[K(h)\frac{\partial h}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[K(h)\frac{\partial h}{\partial z} + K(h)\right] - S_w \quad (1)$$

where θ is the volumetric water content [-], t is time [T], x is the horizontal space coordinate [L], K is the hydraulic conductivity [L T^{-1}], h is the pressure head (or matric potential) [L], z is the vertical (positive upwards) space coordinate [L] and S_w is a sink term [T^{-1}].

The characteristic θ(h) and K(h) curves may be given by the van Genuchten-Mualem model (van Genuchten 1980):

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \dfrac{(\theta_s - \theta_r)}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & \text{if } h < 0 \\ \theta_s & \text{if } h \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$K(h) = K_s S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}}\right)^m\right]^2 \quad (3)$$

with

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4)$$

where θ_r [-] and θ_s [-] are the residual and saturated water content, respectively, α [L^{-1}] is the air entry parameter (i.e. the weak value of matric potential at which air entry is possible), m [-] and n [-] are pore size distribution parameters, K_s [$L\ T^{-1}$] is the saturated hydraulic conductivity, Se [-] is soil saturation index and l [-] is the pore tortuosity parameter (Mualem 1976) fixed at l=0.5 in the present case, as in most cases.

The Mualem condition allows linking m to n:

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (5)$$

Root water uptake is modeled by the formulation proposed by Feddes et al. (1978) that relates the sink term S_w in (1) to soil matric potential h:

$$S_w(h) = \Gamma(h) S_p \quad (6)$$

where S_w is defined as the rate of root water uptake by unit soil volume, Γ [-] is the function that describes the response to water stresses (with values in the [0; 1] interval) and S_p [T^{-1}] is the potential root water uptake rate, i.e. the maximum possible value of S_w. In the construction of Γ(h), Feddes et al. (1998) opted for a function linear by intervals, hypothesizing Γ=0 for extreme values of h (either $h>h_1$ or $h<h_4$, where h_1 and h_4 are model parameters, accounting for thresholds of oxygen deficiency and permanent wilting point, respectively), Γ=1 for middle-range values of h ($h_3<h<h_2$, where h_2 and h_3 also are model parameters) and linear variations of Γ for $h_2<h<h_1$ (oxygen deficit) and $h_4<h<h_3$ (water deficit).

2.2.2. Solute flow

The total volumetric concentration of solutes in soil writes:

$$C_T = \theta c + \rho_b s \quad (7)$$

where C_T [M L^{-3}] accounts for both the concentration in liquid phase c [M L^{-3}] and for sorption s [-] on soil particles, assuming a bulk soil density ρ_b [M L^{-3}]. In the present case, the sorption term vanishes because nitrates are not expected to degrade or to sorb onto the soil given their negative charge.

The convection-dispersion equation writes:

$$\frac{\partial(\theta c)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\theta D_e \frac{\partial c}{\partial z}\right) - \frac{\partial(J_w c)}{\partial t} - S_{wN} \quad (8)$$

where D_e [L^2 T^{-1}] is the effective soil diffusivity (defined as $D_e=D+\lambda v$, if D [L^2 T^{-1}] is the molecular diffusion coefficient in soil, λ [L] is soil dispersivity and v [L T^{-1}] is the average pore water velocity), J_w [L^3 T^{-1}] is the volumetric water flux and S_{wN} [$ML^{-3}T^{-1}$] is a mass flux rate sink term that describes nitrogen uptake by the roots.

2.2.3. Spatial discretization and model parameterization

The irrigation tape is buried at 35 cm depth and its approximate diameter is 1 cm. By symmetry, the emitter is thus represented by a half-circle, located at x=0, y=-35 cm, whose radius is 1 cm (Fig.42a). The default triangular grid proposed by HYDRUS was manually refined in the vicinity of the emitter to prevent numerical instability issues. The region of interest is a vertical (x, z) plane of 80 cm width (half the distance between irrigation tapes) and 150 cm depth (enough to ensure deep drainage conditions prevail at the bottom of the profile). Three soil horizons are present over the selected depth: the arable layer (0-45 cm) then the second (45-90 cm) and third (90-150 cm) layers (Fig.42b) whose properties are detailed in Table 10. Starting values for the hydrodynamic parameters of the three soil layers were determined from prior knowledge, refined then by using the inverse solver implemented in HYDRUS and finally fixed by manual adjustments, checking their coherence with direct observation data and the known local site properties. The last step was to select diffusion and dispersivity values, choosing D=1.55 cm^2 h^{-1} and λ=1.5 cm as given by Albasha et al. (2015).

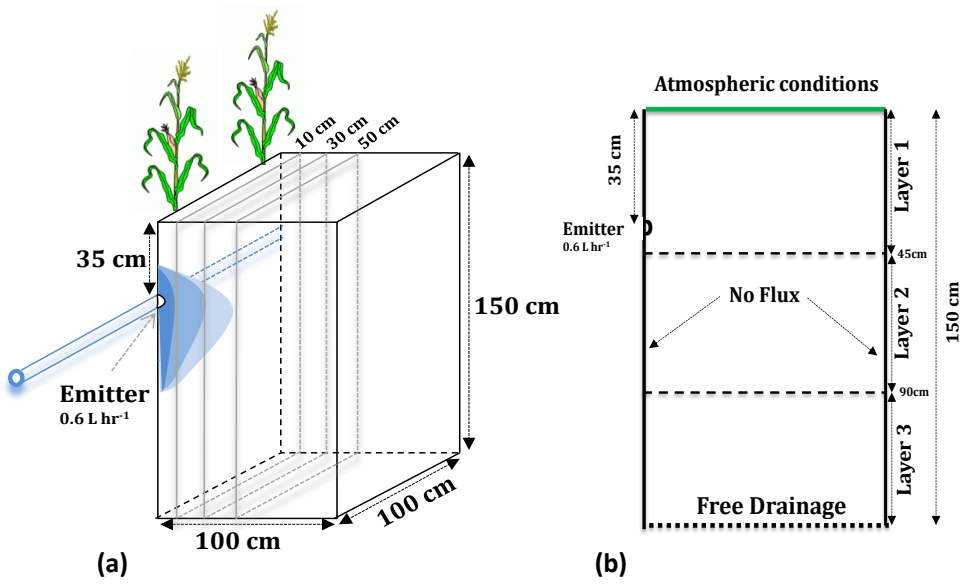


Figure 42. Geometry of the installation (a) and boundary conditions (b) used to describe the water and nitrogen fluxes in the vicinity of the subsurface drip irrigation system, as represented in HYDRUS-2D. The plane in the foreground of (a) is the one detailed in (b) and used for the simulations. The intersecting planes parallel to the drip tape and located at horizontal distances of 10, 30 and 50 cm from the emitter are of special interest for the numerical simulations and have been identified in (a).

Tableau 10. Hydrodynamic parameters of the van Genuchten (1980) model, where θ r (-) and θ s (-) denote the residual and saturated volumetric soil water contents respectively, α (cm-1) and n (-) are empirical shape parameters, Ks (cm hr-1) is the soil hydraulic conductivity at saturation and l (-) is a pore connectivity parameter.

Layers	Depth (cm)	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	θ_r (-)	θ_s (-)	α (cm^{-1})	n (-)	K_s ($cm\ hr^{-1}$)	l (-)
1	0 - 45	18	42	40	0.01	0.36	0.013	1.2	2.30	0.5
2	45 - 90	22	47	31	0.05	0.38	0.006	1.5	0.50	0.5
3	90 - 150	25	52	18	0.09	0.41	0.013	1.31	0.26	0.5

2.2.4. Initial and intermediate conditions

A 15-day "warm-up period" was used prior to the simulation of the first irrigation and fertigation, both in 2014 and 2015. This period was considered long enough to ensure the establishment of equilibrium conditions in water contents and nitrate concentrations before the irrigation seasons start. The initial conditions of water content (θ_0) and nitrates concentration (C_0) at the beginning of the warm-up periods were known from direct measurements (data not shown). The water content values were obtained by neutron probes while nitrate concentrations were determined by the US-49 CIRAD laboratory at Montpellier, using the color photometry method. In complement, Table 11 reports the intermediate (θ_i, C_i) conditions simulated at the dates of the irrigation and fertigation events.

Tableau 11. Layer-averaged values of the intermediate conditions of water content θi (-) and nitrate concentrations Ci (g/cm3) at the dates of each irrigation and fertigation events in 2014 and 2015. Also indicated are the corresponding strategies detailed in Fig.41.

Dates	Strategy	Layers	θ_i (-)	C_i (g cm^{-3})
18.07.2014	S1	1	0.15-0.31	$1.0\ 10^{-6}$
	S2	2-3	0.35	$1.0\ 10^{-6}$
12.07.2015	S3-S4-S5	1	0.10-0.30	$1.3\ 10^{-4}$
29.08.2015	S6	2	0.30-0.35	$2.0\ 10^{-5}$
29.08.2015	S7	3	0.35-0.41	$6.0\ 10^{-6}$

2.2.5. Boundary conditions

The expression proposed in (9) was used to calculate the source flux out of the emitter (Fig.42). The underlying hypothesis was that the water amount delivered by one meter drip tape (thus two emitters, Fig.42b) was concentrated in the disc half of r=1 cm radius, which yields:

$$q = \frac{Flow\ rate}{Surface\ area} \quad (9)$$

where q was approximately 1.1 cm hr^{-1} corresponding to a volumetric flow rate around 0.6 L hr^{-1}.

The atmospheric boundary condition was used to simulate the case of sprinkler irrigation with fertilisation, assuming using rainfall "loaded with non-zero nitrates concentration" was the best option to represent real-life conditions, i.e. fertilisation by solid particles placed on the soil surface (in crop inter-rows) before sprinkler irrigation starts. From these assumptions, an atmospheric boundary condition was imposed on soil surface, distributing the daily potential evapotranspiration into hourly data, hypothesizing a sinusoidal trend during daytime (with peak values at 2.00 pm) and no climatic demand during night time. The daily actual evapotranspiration was estimated with the Optirrig crop model (Cheviron et al. 2016) while the parameters of the root water uptake model were taken from the recent Albasha et al. (2015) paper on the same study site. Initial conditions were assigned to fixed water contents and nitrate concentrations on the basis of the values obtained on the field (Table 11). Sides were assigned zero flux conditions. The lower boundary was assigned a free drainage condition, given the large distance to water table.

3. Results and discussion

3.1. Calibration and validation

3.1.1. Calibration from water content for subsurface drip irrigation

The first stage was the calibration of model parameters (θ_r, θ_s, n, K_s,α) controlling water fluxes, based on the experimental water content data (45 data) obtained for the S3 strategy (Fig.41) applied on the A6 subplot (Fig.40) thus without maize. The parameter values used by Albasha et al. (2015) were replaced by these calculated by the inverse solver with additional manual adjustments. Figure 43 shows the water

content profiles obtained in the calibration stage (Fig.43a, b and c) and in the validation stage (Fig.43d, e and f). The calibration dataset comprises 45 data corresponding to water contents measured 1 day after irrigation. The validation dataset also comprises 45 water content data measured 2 days after irrigation. Figure 43 indicates a good agreement between the measured and simulated water contents, to a few exceptions among which the slight jumps at about 45 and 90 cm, corresponding to the interfaces between successive layers (noted [1] and [2] in Fig.43a, respectively). This is a classical limitation of numerical codes to have difficulties in correctly simulating the natural smooth transitions between layers (and the threshold effect stays limited here). The other minor concern is the imperfect fit for the first soil centimetres, which may be explained by intrinsic limitations of the neutron probe method for near-surface water content measurements, known to yield approximate values in such conditions due to neutron dispersion into the air. Moreover, the weak water contents characteristic of the topsoil centimetres lie in the range of values for which the neutron probes do not perform very well. A known surrogate would be to replace the neutron probes by horizontal TDR (Time Domain Reflectometry) probes very near the soil surface when needing accurate local estimations of soil water content but then other technical issues could appear, for example drifts with time or the same difficulties with "out of range" or "limit-range" measurements (although the principle of measurement is different).

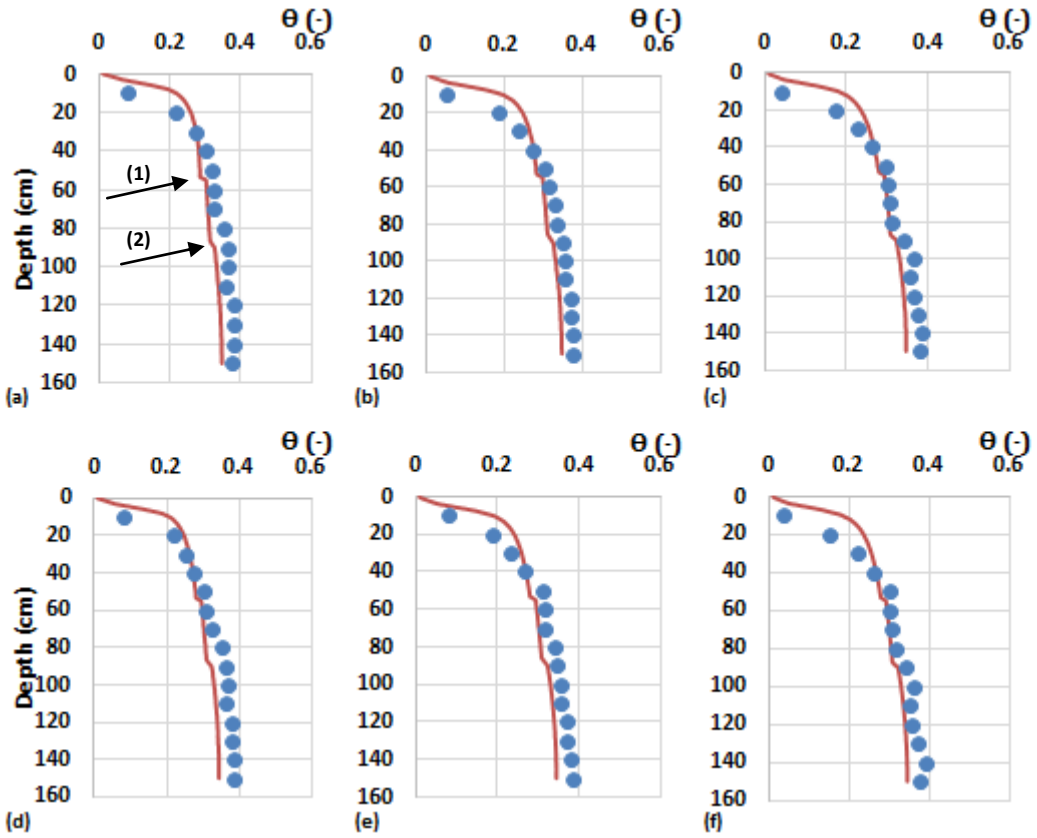


Figure 43. Subsurface drip irrigation. Simulated (lines) and measured (points) soil water content (-) in a vertical plane parallel to the drip tape, at three horizontal distances from the emitter: x=10 cm (a, d), x=30 cm (b, e) and x=50 cm (c,

f). The points in sketches (a), (b) and (c) belong to the calibration dataset (1 day after irrigation S3, see Fig.41) while these of sketches (d), (e) and (f) belong to the validation dataset (2 days after irrigation S3). The bare soil subplot A6 (Fig.40) was used for this preliminary stage. Arrows [1] and [2] in (a) indicate minor jumps in the predicted numerical values, commented in the text.

3.1.2. Validation from water content and nitrate concentrations for subsurface drip irrigation

Nitrate fluxes are expected to directly depend on water fluxes, with very minor additional or specific effects (e.g. Santos et al. 1997). In accordance, the robustness of the set of hydrodynamic parameters calibrated in Section 3.1.1 (on the irrigation part of the S3 strategy and for bare soils) is now re-examined for the fertigation part of the S3 strategy (bare soil, Fig.44) then for the fertigation part of the S4 strategy (with maize, thus in presence of root water uptake, Fig.45). Both figures show the robustness of the previously calibrated parameter set, together with that of the root water uptake parameters (h_1 to h_4, Section 2.2.1) of Albasha et al. (2015) in Fig.45. No-recalibration was deemed necessary when confronting the measured and simulated data. The wetting front dictates nitrate fluxes thus the spatiotemporal pattern of nitrate concentrations with (Fig.45) or without maize (Fig.44). In the former case, root uptake is especially efficient in the first 50 cm which causes the expected progressive decrease in nitrate concentrations, at distances of 10 cm (Fig.45a, d, g, j), 30 cm (Fig.45b, e, h, k) and 50 cm (Fig.45c, f, i, l) from the drip tapes. By contrast, Fig.44 shows the accumulation of nitrates in the vicinity of the emitters, following the wetting front, which is in coherence with the literature (Badr and El-Yazied, 2007; Liu and Liu, 2011).

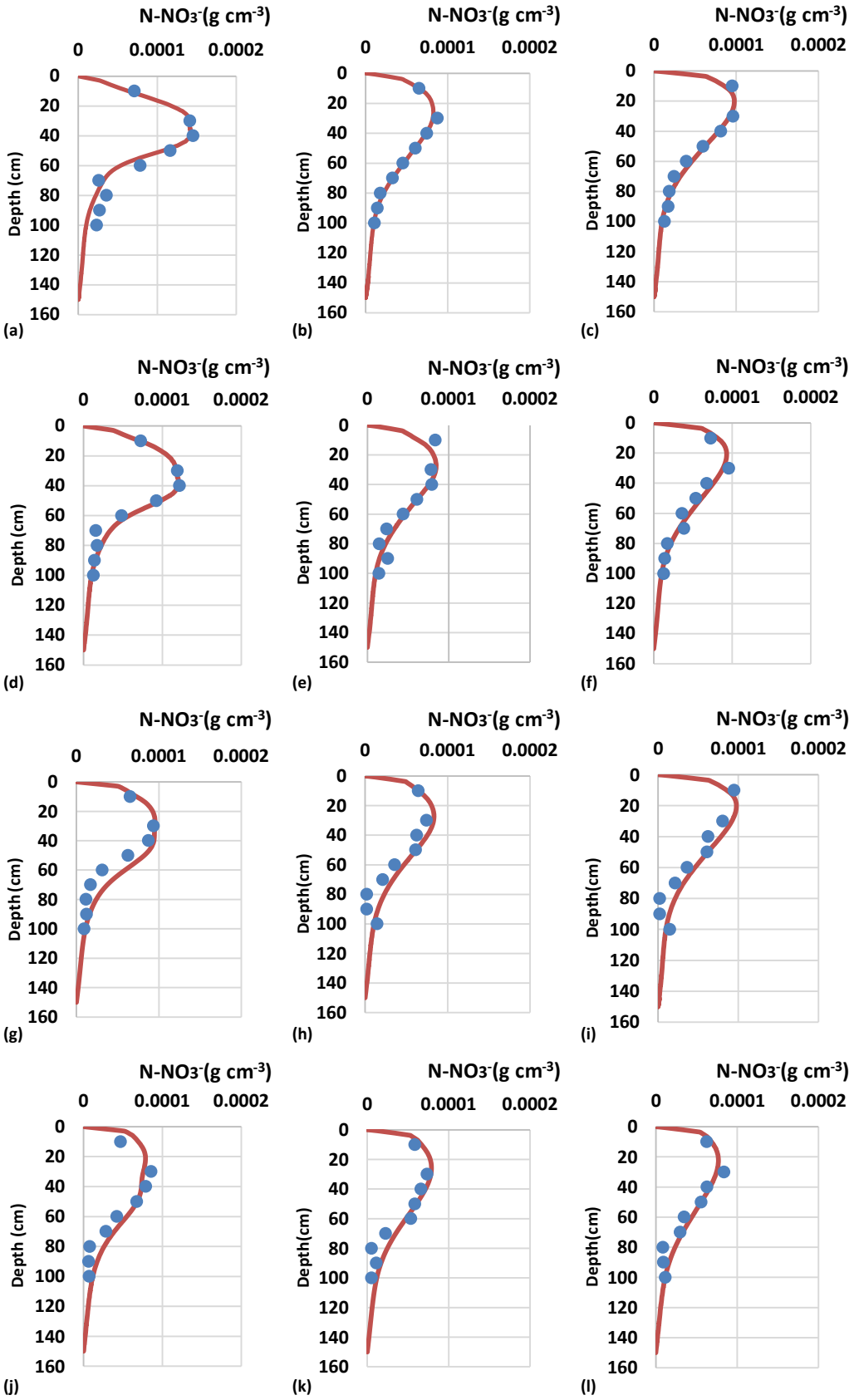


Figure 44. Subsurface drip irrigation. Simulated (lines) and measured (points) nitrate concentrations in a vertical plane parallel to the drip tape, at three horizontal distances from the emitter: x=10 cm (a, d, g, j), x=30 cm (b, e, h, k) and x=50 cm (c, f, i, l). The points in sketches (a), (b) and (c) are validation data (1 day after fertigation S3, see Fig.41). The points in sketches (d), (e) and (f) are validation data (2 days after fertigation S3). The points in sketches (g), (h) and (i)

are validation data (4 days after fertigation S3). The points in sketches (j), (k) and (l) are validation data (7 days after fertigation S3). Subplot A6 (Fig.40) was used for these tests.

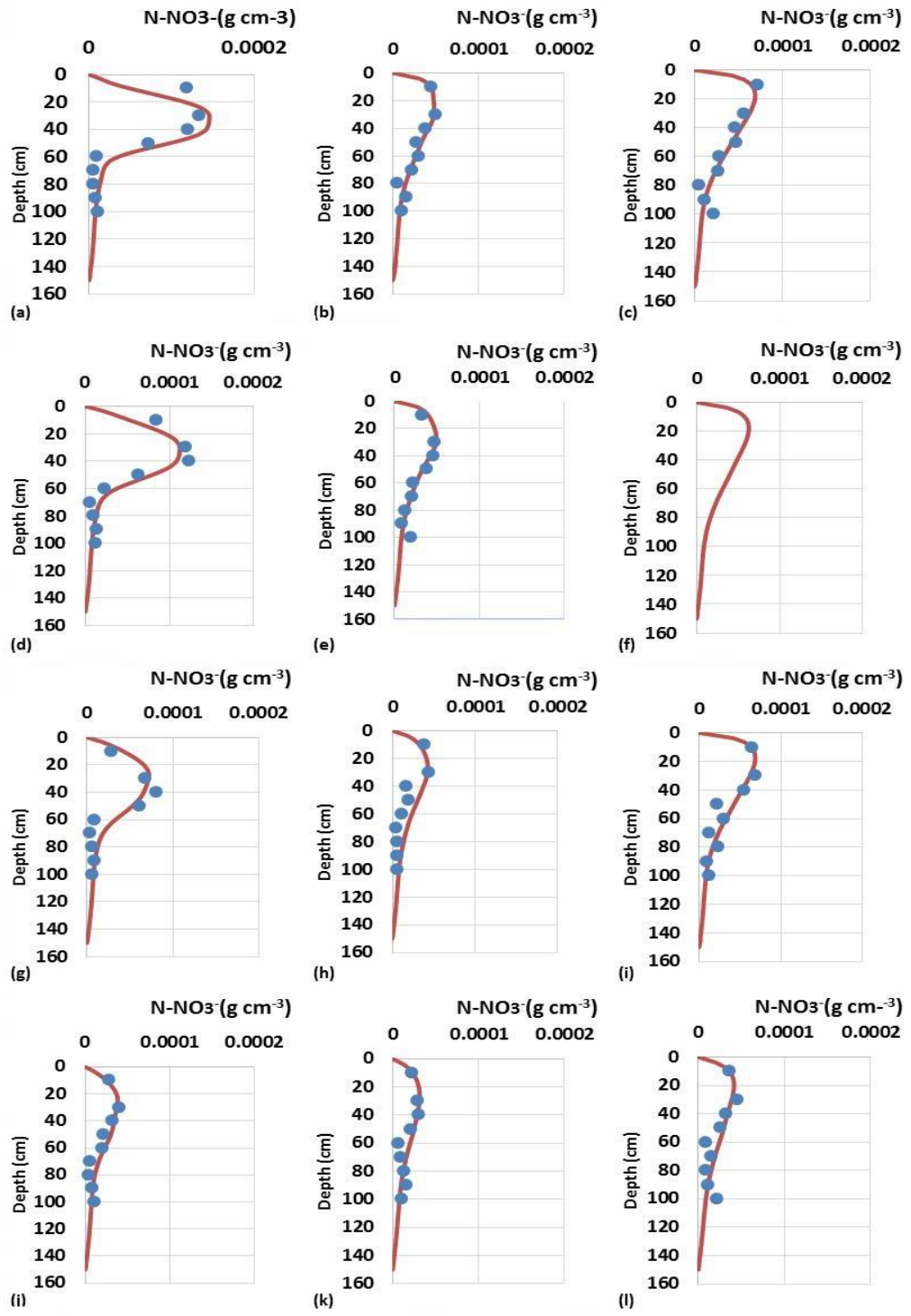


Figure 45. Subsurface drip irrigation. Simulated (lines) and measured (points) nitrate concentrations in a vertical plane parallel to the drip tape, at three horizontal distances from the emitter: x=10 cm (a, d, g, j), x=30 cm (b, e, h, k) and x=50 cm (c, f, i, l). The points in sketches (a), (b) and (c) are validation data (1 day after fertigation S4, see Fig.41). The points in sketches (d), (e) and (f) are validation data (2 days after fertigation S4). The points in sketches (g), (h) and (i) are validation data (4 days after fertigation S4). The points in sketches (j), (k) and (l) are validation data (7 days after fertigation S4). Subplot A5 (Fig.40) was used for these tests.

3.1.3. Validation from water content and nitrate concentrations for sprinkler irrigation

Unlike subsurface drip irrigation, sprinkler irrigation results in temporary soil saturation thus in gravity-driven downwards fluxes in which soil capillarity is not expected to play any significant role, at least after the early stages of water infiltration This time, the propagation of the wetting front is very likely 1D. Figure 46 shows this pattern for water content (Fig.46a, c, e and g) and nitrates concentration (Fig.46b, d, f and h) in a vertical plane. The high water contents characteristic of sprinkler irrigation are reproduced in a satisfying manner here and so is the signal of nitrates concentration. Even if the vertical-only associated fluxes are known to enhance lixiviation risks the limited nitrogen amounts applied here (manual spraying of granular fertilizers at the soil surface before irrigation) do not result in significant contamination below the root zone. A plausible explanation is the absence of macropores in the soil of the study site: otherwise, the high water contents would have activated preferential flow, thus triggered the quick propagation of nitrates to deeper soil horizons. Alternatively, the Darcyian flow is also able to propagate the nitrates further downwards but at far lower rates, probably as the result of root uptake (which would necessitate far longer experimental campaigns for direct evidences).

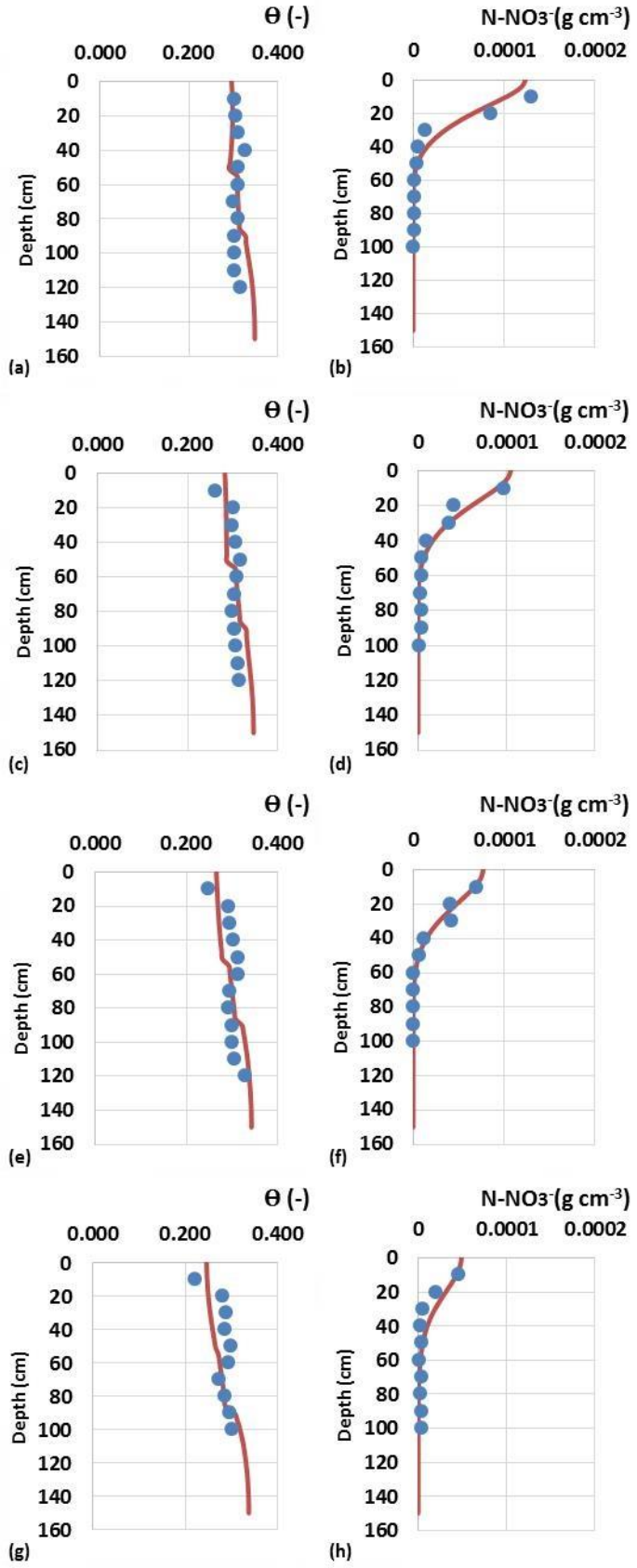


Figure 46. Sprinkler irrigation. Simulated (lines) and measured (points) water contents (a, c, e, g) and nitrate concentrations (b, d, f, h) in a vertical plane. All sketches are validation data obtained 1 day after fertilisation (a, b), 2 days after fertilisation (c, d), 4 days after fertilisation (e, f) and 7 days after fertilisation (g, h). Subplot B2 (Fig.40) was used for these tests.

3.1.4. Numerical comparisons of lixiviation between sprinkler and subsurface drip irrigation

In the previous section the comparison between lixiviation risks in sprinkler and subsurface drip irrigation was impossible from experimental data, because of different initial conditions and different nitrogen applications. A numerical simulation remedies these drawbacks and yields a clear picture, confirming and quantifying (in the present case) what is known from literature. Figure 47 shows the results obtained in the simple hypothesis of identical initial water content profiles and zero initial nitrate concentrations (on 01/07/2015). The irrigation and fertigation strategies were similar to S5 (Fig.41) for subsurface drip irrigation (i.e., rather underestimating the most current nitrate applications) while granular fertilisation was used (with the doses described in Fig.40) together with sprinkler irrigation. The simulated irrigation consisted of 10 mm each 2 days in subsurface drip irrigation vs. 30 mm each 7 days for sprinkler irrigation, throughout the whole cropping season until harvest (12/07/2015-15/10/2015) assuming only one fertigation (12/07/2015). The simulation lasted then until the end of the year (31/12/2015) under natural rain conditions. In the above situations, Figure 47 compares the cumulative lixiviation obtained in a vertical plane parallel to the drip tape, at a distance of 10 cm from the emitter, with the cumulative lixiviation obtained under sprinkler irrigation.

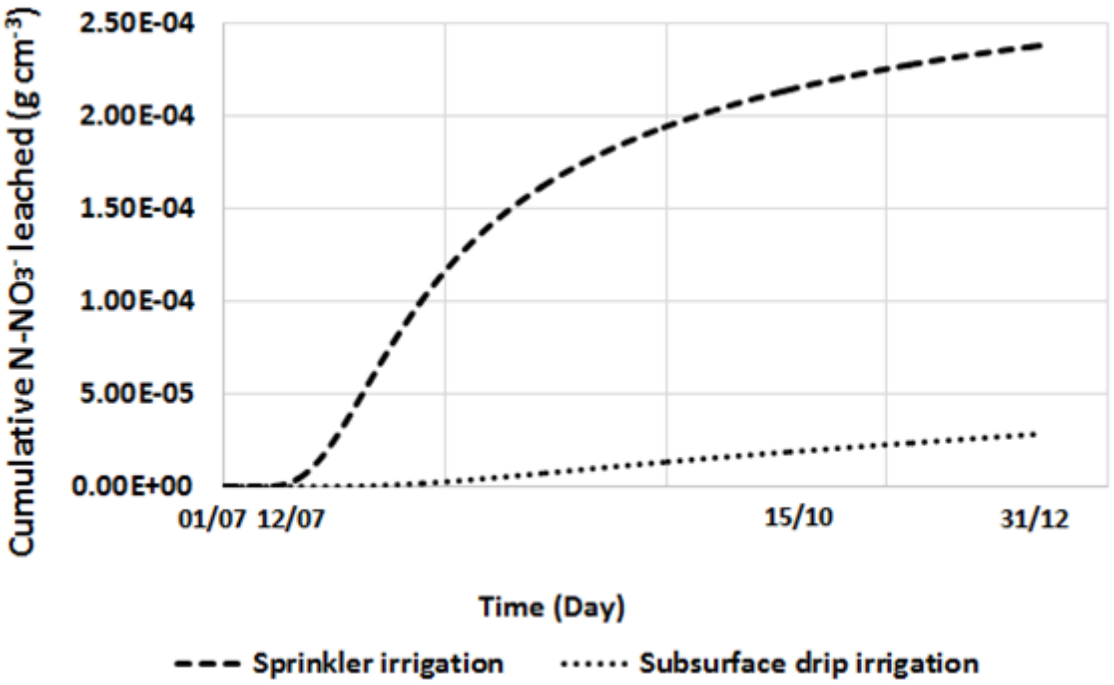


Figure 47. Numerical simulation of cumulative nitrates lixiviation below 150 cm, under sprinkler (bold dotted line) and subsurface drip irrigation (thin dotted line), in a vertical plane parallel to the drip tape, at the horizontal distance of 10 cm from the emitter.

3.2. Focus on numerical simulations of subsurface drip irrigation

3.2.1. Influence of the initial conditions and antecedent practices

In 2014 there were significant nitrogen residues in the subplots concerned by the present section (A11-12 in Fig.40) before the beginning of the irrigation season (Table 12). Several sprinkler irrigations were thus used to lower the nitrate concentrations before planting, even if subsurface drip irrigation was to be applied on the indicated subplot. In 2015, the problem was the same on the A5 subplot but the remediation was different as the pre-season irrigations were subsurface drip irrigations. Then 3 irrigations of about 35 mm each were applied on A11-12 in the few days after sowing in 2014 and also 3 on A5 in 2015, delivering 6.31, 1.78 and 6.84 m^3 on 04/07/2015, 06/07/2015 and 09/07/2015, respectively. Figure 48 shows the water content and nitrates concentration profiles on 19/07/2014 and 13/07/2015. The initial water content and nitrate concentrations at the beginning of the warm-up period for numerical simulations for A11-12 and A5 are these of Table 11. No significant difference in climatic conditions occurred between the test period of 2014 and that of 2015. Figure 48a and b exhibits similar profiles in vertical planes parallel to and near the drip tape (at a distance of 10 cm) while clear discrepancies appear at distances of 30 cm (Fig.48c and d) and 50 cm (Fig.48e and f). The simulations indicate that nitrates hardly reached the regions located at horizontal distances of 30 cm or more from the emitter in 2014 (after pre-season sprinkler irrigations) in comparison with 2015 (after pre-season subsurface drip irrigations). For typical practices (irrigation strategies, dates and doses) the most plausible interpretation is the confirmation that (antecedent) subsurface drip irrigations create favourable conditions for carrying nutrients (here pre-existing nitrogen amounts) to a larger fraction of the rooting system, as already advocated in the literature (e.g. Badr and El-Yazied, 2007; Elmaloglou and Diamantopoulos, 2009). Complementary and concordant indications are provided by Fig.49, plotted for the A5 subplot in 2015, which depicts the continuous variations of water content and nitrates concentration with increasing distances to the emitter (perpendicular to it and at the same depth).

Tableau 11. Layer-averaged values of the nitrogen residues concentrations before the fertigation events at the date of sowing in 2014 and one month after the sowing in 2015.

Year	Date of sowing	Location	Horizon (cm)	Mineral nitrogen		Total nitrogen (kg ha^{-1})	Cumulative N (kg ha^{-1})
				N-NH4 (mg kg^{-1})	N-NO3 (mg kg^{-1})		
2014	14/04/2014	A11-12	0-30	0.82	9.25	13.09	13.09
			30-60	1.21	9.19	14.56	27.65
			60-90	1.89	6.34	11.52	39.17
			90-120	1.23	3.41	6.50	45.67
2015	16/04/2014	A5	0-30	2.78	15.48	23.74	23.74
			30-60	4.58	6.59	15.64	39.38
			60-90	6.70	6.18	18.03	57.41
			90-120	6.67	4.66	15.86	73.27

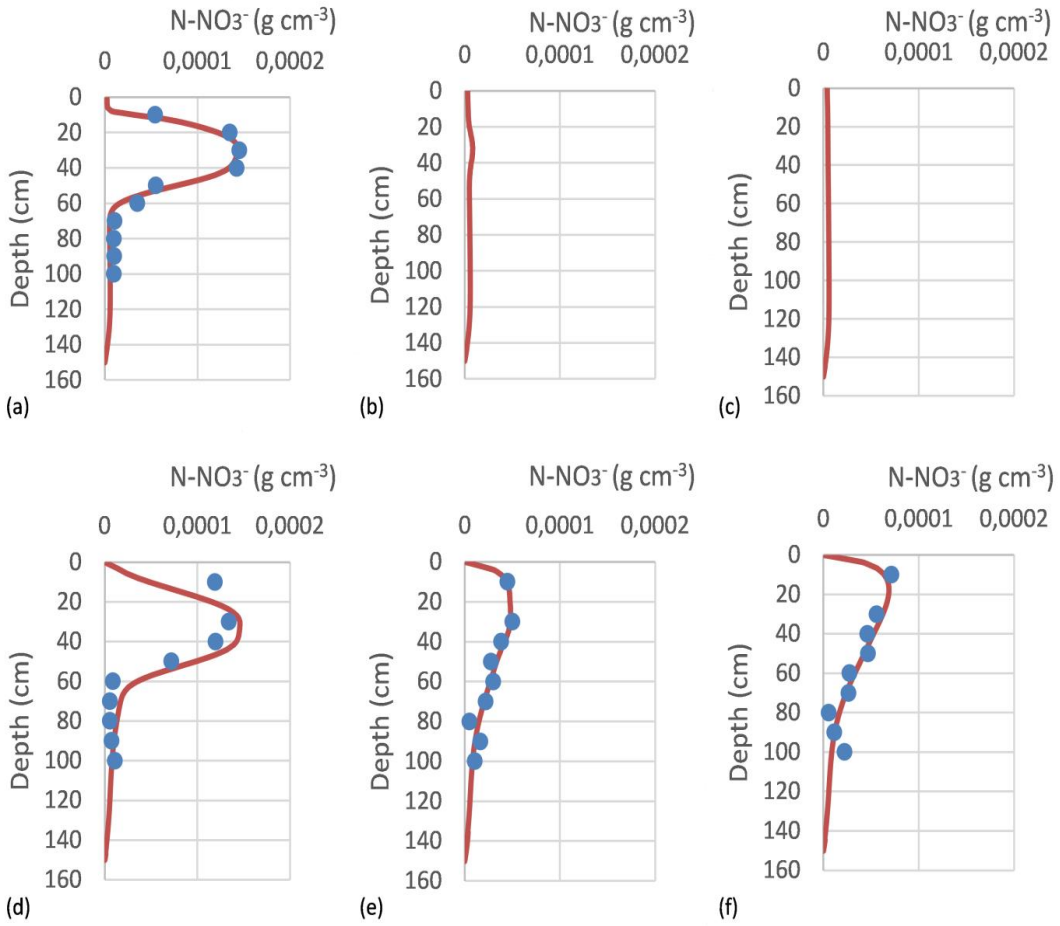


Figure 48. Subsurface drip irrigation. Simulated (lines) and measured (points) nitrate concentrations in vertical planes parallel to the drip tape, at three horizontal distances from the drip line: 10 cm (a, d), 30 cm (b, e) and 50 cm (c, f). Sketches (a), (b) and (c) depict nitrates concentration on the first day of fertigation on the A11 subplot in 2014. Sketches (d), (e) and (f) depict situations on the first day of fertigation on the A5 subplot in 2015.

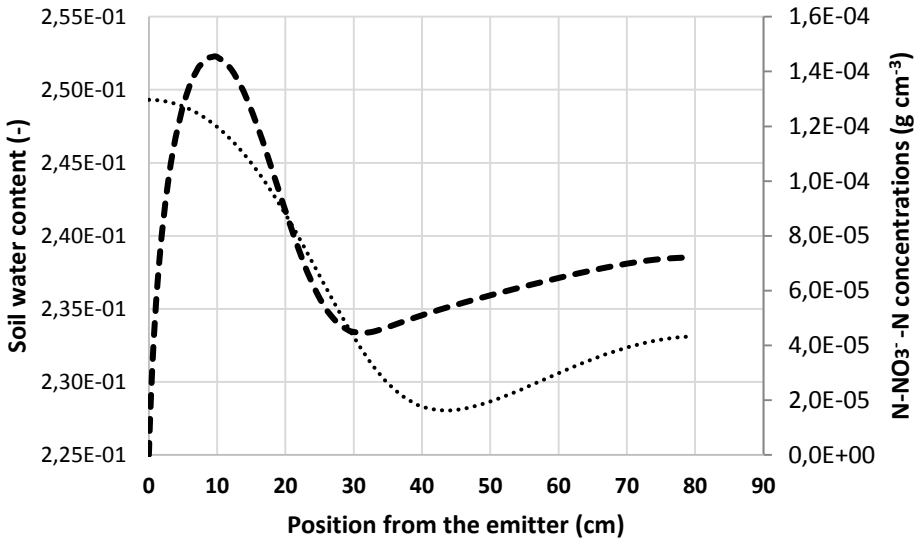


Figure 49. Continuous variations of soil water content and nitrates concentration with the horizontal distance to the emitter, at the same depth (35 cm), for the A5 subplot in Fig.40 after a series of pre-season subsurface drip irrigations.

3.2.2. Water and nitrogen uptake by plant roots

A focus is possible on the effect of nitrogen root water uptake when comparing the cases with or without maize (Table 13, Fig.50) with the example of nitrate concentrations at 35 cm depth (depth of the emitter) and at distances of 10 cm and 50 cm from the drip tape (the intermediate distance of 30 cm was discarded to show more contrasted results) at several dates (1, 2, 4 and 7 days) after fertigation. The S3 and S4 strategies (Fig.41) were used in the present example. The most obvious effect in Fig.50 is the increasing difference between nitrate concentrations at 10 cm from the drip tape, which is attributable to significant root uptake at close range of the emitters and becomes maximal 7 days after fertigation. The maize row lies above the drip tape and parallel to it (Fig.42a) which explains why the effect at 10 cm is greater than that at 50 cm. Another effect is clearly visible, for the cases without maize: in absence of maize and given the low local capillarity, gravity is the dominant force that tends to drag both water and nitrates downwards, causing a smooth progressive decrease of the concentrations.

Tableau 12. Nitrate concentrations (g cm-3) simulated at the depth of the emitter (35 cm), in vertical planes parallel to the drip tape located at horizontal distances of 10 cm and 50 cm from the emitter, for 1, 2, 4 and 7 days after the irrigation and fertigation strategy S3 and S4 (Fig.41) occurring on 2015, on the A5-6 subplots (Fig.40).

	Horizontal distance from the emitter			
	10 cm		50 cm	
Dates	Without maize	With maize	Without maize	With maize
13.04.2015	$1.41\ 10^{-4}$	$1.45\ 10^{-4}$	$8.56\ 10^{-5}$	$5.74\ 10^{-5}$
14.07.2015	$1.20\ 10^{-4}$	$1.12\ 10^{-4}$	$8.26\ 10^{-5}$	$5.29\ 10^{-5}$
16.07.2015	$9.47\ 10^{-5}$	$6.89\ 10^{-5}$	$7.13\ 10^{-5}$	$4.52\ 10^{-5}$
19.07.2015	$7.41\ 10^{-5}$	$3.55\ 10^{-5}$	$7.11\ 10^{-5}$	$3.62\ 10^{-5}$

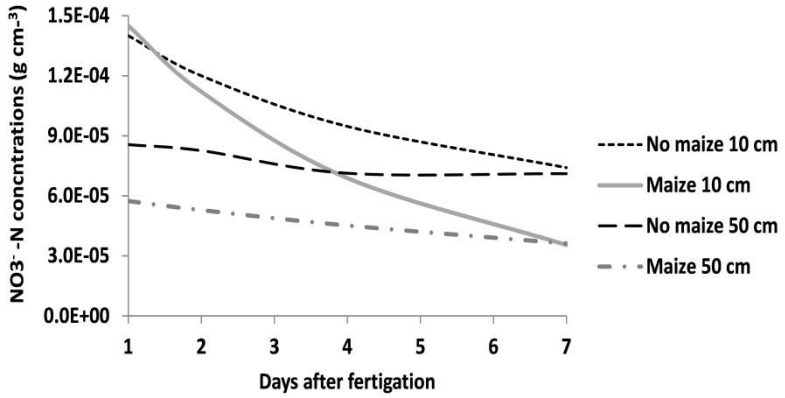


Figure 50. Nitrate concentrations simulated at the depth of the emitter (35 cm), in vertical planes parallel to the drip tape located at horizontal distances of 10 cm and 50 cm from the emitter, for 1, 2, 4 and 7 days after the irrigation and fertigation strategies S3 and S4 (Fig.41) applied in 2015 on the A6 and A5 subplots, respectively (Fig.40).

3.2.3. Effects of the irrigation and fertigation strategies and doses

This section first investigates the effects of the scheduling of fertigation within irrigation events, comparing strategies S4 and S6 in Fig.41. The former delivers 50 nitrogen units in 5 hr, the latter the same amount in a 2-h pulse. Figure 51 shows the simulated and measured differences 1 day after fertigation: nitrate concentrations are much higher in the vicinity of the emitter for S4 (Fig.51a) than for S6 (Fig.51c) which is in accordance with nitrates migration already described for similar application pulses (e.g. Phogat et al., 2013; Zhang et al., 2015). By contrast, quasi-identical results were obtained at distances of 30 and 50 cm from the emitter thus only the 30-cm case was shown in Fig.51b (strategy S4) and Fig.51d (strategy S6). The long duration of fertigation in S4 is known to enhance nitrates migration near the drip tape both vertically and laterally while the pulse of S6 rather favours lateral movements.

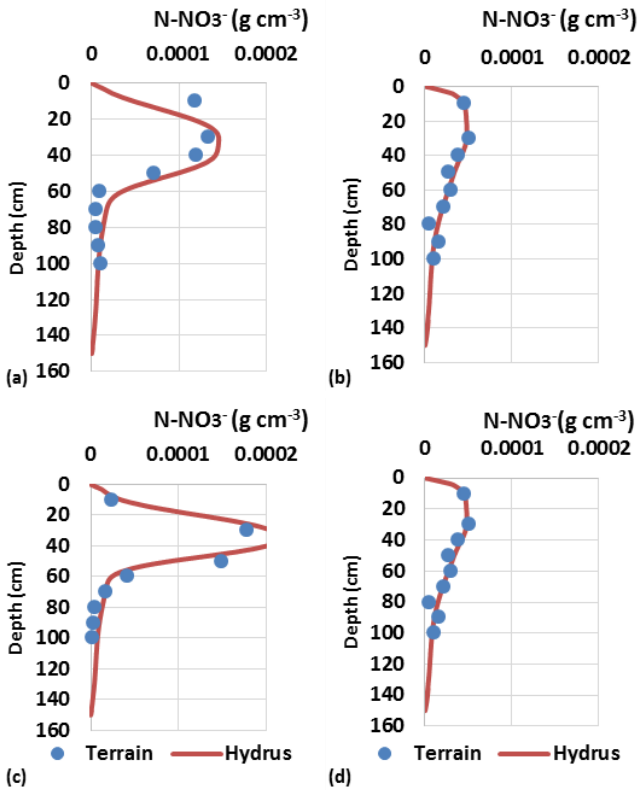


Figure 51. Subsurface drip irrigation. Simulated (lines) and measured (points) nitrate concentrations in vertical planes parallel to the drip tape, at two horizontal distances from the drip line: 10 cm (a, c) and 30 cm (b, d). Sketches (a) and (b) show the profiles obtained 1 day after irrigation and fertilization on the A5 subplot (Fig.40) with the S4 strategy (Fig.41) in 2015. Sketches (c) and (d) show the profiles obtained 1 day after subsurface drip irrigation and fertigation on the A5 subplot (Fig.40) with the S6 strategy in 2015.

The second point of this section is to investigate the effect of different doses for strategies with a similar timing of fertigation within the irrigation events. It is known that the application of nitrogen at a rate lower than the maximal absorption capacity of the plants is prone to drastically reduce lixiviation. This, in turn, requires correct estimations of the nitrogen plant demand throughout the cropping season and of the initial soil nitrogen content before fertigation (e.g. Randall and Sawyer 2008; Gheysari et al., 2009; Hassan et al., 2010; Barakat et al. 2016). The usual "by default" practice on site was to estimate the total nitrogen dose to be applied during the cropping season, then to split it in as many 50U applications as necessary, in irrigation and fertigation strategies of the S1 type. The objective here was therefore to assess the merits of alternatives strategies (S5: 25U, S7: 25U pulse, S4: 50U, S6: 50U pulse and 37U), taking the nitrogen root uptake and the simulated lixiviation as target variables. The initial conditions of Table 11 for 2015 were used. The first step was the comparison between doses of 50U (S4) and 25U (S5). A field measurement of nitrogen content in plant leaves yielded very similar values (2.4 vs. 2.5% of total dry biomass) which advocates the use of reduced nitrogen amounts (and probably decreases lixiviation risks). As the Pulse-type strategies were proven efficient to ensure high homogeneous nitrate concentrations at close range from the emitter, the next step was to test the 25U pulse S7 strategy vs. the 50U pulse S6 strategy. From Fig.52, the S7 strategy can be chosen in place of the S4 strategy because

of slightly higher root uptake. However, the S6 strategy guarantees the highest root uptake but with the associated highest lixiviation risk, which triggers the search for an intermediate option: a 37U pulse strategy (termed here S8). This seemed a satisfying compromise that significantly increased root uptake while leaving lixiviation risks almost unchanged with respect to 25U strategies.

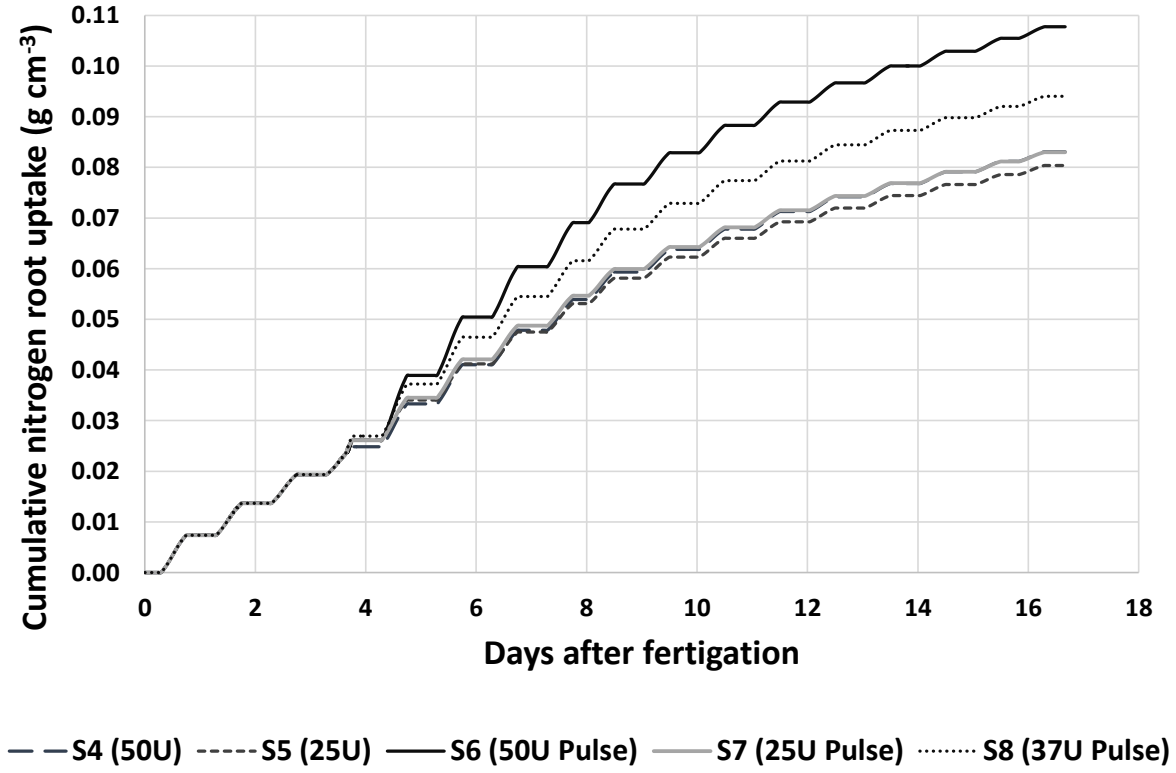


Figure 52. Subsurface drip irrigation. Simulated cumulative nitrogen uptake by the roots through for strategies S4 to S7 (Fig.41) and for the fictitious S8 strategy (37 nitrate units).

4. Conclusion

This paper performed the numerical simulation of soil nitrate dynamics under sprinkler (1D) and subsurface drip irrigation (2D) by means of the HYDRUS-2D model. The experimental part was to follow the spatiotemporal patterns of soil water content and nitrates concentration for various initial conditions and fertilisation strategies, during two intensive field campaigns in maize plots. The conceptual part consisted first in proposing an appropriate 2D geometrical setting (i.e., relevant arguments of symmetry to deal with the source terms and instructive choices for results representation at a series of depths and distances from the emitters) and second in deriving a model parameterization capable of reproducing the observations as well as possible, taking advantage of the wide dataset of cases available for model calibration and validation. The analytical part aimed at the exploration of alternative fertilisation strategies, seeking the determinants of the simulated nitrate concentrations, root nitrogen uptake and lixiviation in the influence of initial conditions and in the characteristics of the

fertigation (nitrogen doses, scheduling of the nitrogen distribution within irrigation events).This study shows that correct parameterizations of HYDRUS-2D provide site-specific quantitative insights where only prior qualitative or semi-quantitative knowledge was formerly available (thus with insufficient precision to recommend good practices).

For example, the evolution of the wetting front and the migration of nitrates with can be correctly simulated, for bare soils or in presence of maize. In the former situation, as expected for subsurface drip irrigation, nitrates tend to accumulate in the vicinity of the emitters, near the edge the wetting bulb, showing clear evidence of lateral and vertical diffusion in the time period immediately following irrigation and fertigation. By contrast their gravity-driven downward movement may be very limited the days after, most likely because of incomplete soil saturation. Even if HYDRUS should not be considered a "true" crop model, due to the absence of interactions (feedback loops) between soil reserves and root growth, root water and nitrogen uptake may still be simulated in an efficient manner. Nitrates concentration profiles simulated in presence of roots reproduce the observational evidence very well, also illustrating the known advantage of subsurface drip irrigation to "spoon feed" plant roots at depths where their efficiency in absorbing water and nutrients is maximal. From there, prospective simulations show significant differences in nitrates lixiviation for the given soil conditions and local fertigation practices, hence the requirements made to alter the way nitrates are delivered within irrigation events. The present study advocates applications in fertigation "pulses" and the use of reduced doses, anticipating a far lesser reduction of root uptake: such diagnostics and the associated quantifications are possibly adaptable to different agro-pedoclimatic contexts.

Références du chapitre V

Albasha, R., Mailhol, J. C., & Cheviron, B. (2015). Compensatory uptake functions in empirical macroscopic root water uptake models–Experimental and numerical analysis. Agricultural Water Management, 155, 22-39.

Asadi, M. E., Clemente, R. S., Gupta, A. D., Loof, R., & Hansen, G. K. (2002). Impacts of fertigation via sprinkler irrigation on nitrate leaching and corn yield in an acid–sulphate soil in Thailand. Agricultural Water Management, 52(3), 197-213.

Badr, M. A., & El-Yazied, A. A. (2007). Effect of fertigation frequency from subsurface drip irrigation on tomato yield grown on sandy soil. Aust. J. Basic Appl. Sci 1(3), 279-285.

Barakat, M., Cheviron, B., & Angulo-Jaramillo, R. (2016). Influence of the irrigation technique and strategies on the nitrogen cycle and budget: A review. Agricultural Water Management, 178, 225-238.

Ben-Asher, J., & Phene, C. J. (1993). Analysis of surface and subsurface drip irrigation using a numerical model. JORGENSEN, GS; NORUM, KN Subsurface drip irrigation. Theory, practices and application. Fresno: California Center of Irrigation Technology, 185-201.

Brandt, A., Bresler, E., Diner, N., Ben-Asher, I., Heller, J., & Goldberg, D. (1971). Infiltration from a trickle source: I. Mathematical models. Soil Science Society of America Journal, 35(5), 675-682.

Bresler, E. (1975). Two-dimensional transport of solutes during nonsteady infiltration from a trickle source. Soil Science Society of America Journal, 39(4), 604-613.

Coelho, E. F., & Or, D. (1996). Flow and uptake patterns affecting soil water sensor placement for drip irrigation management. Transactions of the ASAE, 39(6), 2007-2016.

Cote, C. M., Bristow, K. L., Charlesworth, P. B., Cook, F. J., & Thorburn, P. J. (2003). Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. Irrigation Science, 22(3-4), 143-156.

Douh, B., & Boujelben, A. (2011). Effects of surface and subsurface drip irrigation on agronomic parameters of maize (Zea mays L.) under Tunisian climatic condition. J. Nat. Prod. Plant Resour, 1(3), 8-14.

Elmaloglou, S., & Diamantopoulos, E. (2009). Simulation of soil water dynamics under

subsurface drip irrigation from line sources. Agricultural Water Management, 96(11), 1587-1595.

Gärdenäs, A. I., Hopmans, J. W., Hanson, B. R., & Šimůnek, J. (2005). Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation. Agricultural water management, 74(3), 219-242.

Gheysari, M., Mirlatifi, S. M., Homaee, M., Asadi, M. E., & Hoogenboom, G. (2009). Nitrate leaching in a silage maize field under different irrigation and nitrogen fertilizer rates. Agricultural water management, 96(6), 946-954.

Hanson, B. R., Hopmans, J., & Simunek, J. (2005). Effect of Fertigation Strategy on Nitrogen Availability and Nitrate Leaching using Microirrigation. HortScience, 40(4), 1096-1096.

Hassan, S. W., Oad, F. C., Tunio, S., Gandahi, A. W., Siddiqui, M. H., Oad, S. M., & Jagirani, A. W. (2010). Effect of N application and N splitting strategy on maize N uptake, biomass production and physio-agronomic characteristics. Sarhad Journal of Agriculture, 26(4), 551-558.

Haynes, R. J. (1985). Principles of fertilizer use for trickle irrigated crops. Fertilizer research, 6(3), 235-255.

Kachanoski, R. G., Thony, J. L., Vauclin, M., Vachaud, G., & Laty, R. (1994). Measurement of solute transport during constant infiltration from a point source. Soil Science Society of America Journal, 58(2), 304-309.

Kandelous, M. M., & Šimůnek, J. (2010). Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. Agricultural Water Management, 97(7), 1070-1076.

Lassabatere, L., Angulo-Jaramillo, R., Soria-Ugalde, J. M., Šimůnek, J., & Haverkamp, R. (2009). Numerical evaluation of a set of analytical infiltration equations. Water resources research, 45(12).

Li, J., & Liu, Y. (2011). Water and nitrate distributions as affected by layered-textural soil and buried dripline depth under subsurface drip fertigation. Irrigation Science, 29(6), 469-478.

Li, J., Zhang, J., & Ren, L. (2003). Water and nitrogen distribution as affected by fertigation of ammonium nitrate from a point source. Irrigation Science, 22(1), 19-30.

Mmolawa, K., & Or, D. (2000). Root zone solute dynamics under drip irrigation: A review. Plant and soil, 222(1-2), 163-190.

Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water resources research, 12(3), 513-522.

Mubarak, I., Mailhol, J. C., Angulo-Jaramillo, R., Bouarfa, S., & Ruelle, P. (2009). Effect of temporal variability in soil hydraulic properties on simulated water transfer under high-frequency drip irrigation. Agricultural Water Management, 96(11), 1547-1559.

Oron, G., DeMalach, Y., Gillerman, L., David, I., & Rao, V. P. (1999). Improved saline-water use under subsurface drip irrigation. Agricultural Water Management, 39(1), 19-33.

Patel, N., & Rajput, T. B. S. (2008). Dynamics and modeling of soil water under subsurface drip irrigated onion. Agricultural water management, 95(12), 1335-1349.

Phogat, V., Skewes, M. A., Cox, J. W., Alam, J., Grigson, G., & Šimůnek, J. (2013). Evaluation of water movement and nitrate dynamics in a lysimeter planted with an orange tree. Agricultural water management, 127, 74-84.

Provenzano, G. (2007). Using HYDRUS-2D simulation model to evaluate wetted soil volume in subsurface drip irrigation systems. Journal of irrigation and drainage engineering, 133(4), 342-349.

Randall, G.W., & Sawyer, J.E. (2008). Nitrogen application timing, forms and additives. In: Final Report: Gulf Hypoxia and Local Water Quality Concerns Workshop, Upper Mississippi River Sub-Basin Hypoxia Nutrient Committee, American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, MI, pp. 73–85.

Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. Journal of Applied Physics, 1(5), 318-333.

Ruelle, P. (1995). Variabilité spatiale à l'échelle de parcelles de cultures: étude expérimentale et modélisation des bilans hydriques et des rendements (Doctoral dissertation).

Santos, D. V., Sousa, P. L., & Smith, R. E. (1997). Model simulation of water and nitrate movement in a level-basin under fertigation treatments. Agricultural Water Management, 32(3), 293-306.

Šimůnek, J., M. Šejna, and M. Th. van Genuchten. 1998. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably- saturated media. Version 1.0. IGWMC - TPS - 70, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, 186pp

Šimůnek, J., M. Šejna, and M. Th. van Genuchten. 1999. The HYDRUS-2D software package for simulating two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media. Version 2.0, IGWMC - TPS - 53, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, 251pp..

Skaggs, T. H., Trout, T. J., Šimunek, J., & Shouse, P. J. (2004). Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. Journal of irrigation and drainage engineering, 130(4), 304-310.

Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil science society of America journal, 44(5), 892-898.

Zhang, J. J., Li, J. S., Zhao, B. Q., & Li, Y. T. (2015). Simulation of water and nitrogen dynamics as affected by drip fertigation strategies. Journal of Integrative Agriculture, 14(12), 2434-2445.

Conclusion, recommandations et perspectives

Conclusion

Dans le domaine agricole, une meilleure compréhension de la dynamique des transferts hydriques et azotés permet des pratiques de gestion des ressources plus pertinentes, en particulier pour réduire à la fois, le gaspillage d'eau et la pollution du sous-sol liée à l'utilisation d'intrants agrochimiques dont les nitrates. Notre travail de recherche vise à améliorer le fonctionnement de la fertigation en goutte à goutte enterré, au moyen de stratégies expérimentales précises, peu dispendieuses et relativement faciles à mettre en place, en contexte méditerranéen. La première partie du travail (**chapitre I**) a consisté à passer en revue les principaux développements historiques de l'irrigation, dans une vue d'abord très large puis de plus en plus ciblée sur la problématique énoncée ci-dessus. . Au cours de trois saisons expérimentales (2013, 2014, 2015, **chapitre II**) nous avons testé diverses stratégies d'irrigation et de fertilisation pour deux techniques d'irrigation (aspersion et goutte à goutte enterré) qui visaient à satisfaire tout ou partie des besoins de la plante en eau et en azote. Le **chapitre III** (article de revue bibliographique paru dans Agricultural Water Management) a cherché à élucider les relations (supposées mais peu connues) entre la méthode d'irrigation et les flux et transformations d'azote dans le sol. La mise en évidence de ces relations n'a été possible qu'en identifiant le rôle des pratiques culturales et des stratégies d'apport sur l'activité microbienne du sol, donc sur les transformations de l'azote. La littérature indique que les motifs spatiaux et temporels de la teneur en eau et de la température du sol sont différents pour l'irrigation en goutte-à-goutte enterré et en aspersion. Cette constatation a permis de quantifier la valeur potentielle de la minéralisation pour une culture de maïs irriguée par ces deux différentes techniques **(chapitre IV)**. Les résultats expérimentaux indiquent que la minéralisation varie effectivement selon la méthode d'irrigation utilisée, à cause des différences qui existent entre les profils d'humidité et de température sur les 30 premiers centimètres de sol. Nous avons démontré que la minéralisation est plus importante sous l'irrigation par aspersion que sous l'irrigation en goutte à goutte enterré. Ce résultat permettra de préconiser des apports azotés au plus près des besoins, par un calcul rigoureux des fournitures totales du sol. La conséquence attendue sera de limiter les risques de pertes par lixiviation, lors des pluies parfois intenses au printemps.

Les développements résumés ci-dessus doivent être vus comme des étapes vers l'objectif principal de cette thèse, qui était la caractérisation (in situ et par modélisation) du transfert des nitrates dans les systèmes irrigués, en examinant différentes techniques et stratégies d'apport. C'est le **chapitre V** qui donne les réponses, sous forme d'un article soumis à *Agricultural Water Management*, dans lequel la modélisation par HYDRUS-2D permet de décrire la dynamique de l'azote pour des irrigations en aspersion et en goutte à goutte enterré.

Pour mettre en place les différentes stratégies expérimentales, nous avons effectué beaucoup de prélèvements (environ 2000) afin de quantifier la concentration des nitrates à certaines positions précises dans le sol, pour les deux systèmes d'irrigation. Cependant, il a fallu chercher une méthode d'analyse manuelle à cause du manque de financement de cette thèse. C'est pourquoi nous avons mis au point une méthode manuelle simple et peu coûteuse (**Annexe 1**). Celle-ci repose sur la réduction des nitrates en nitrites via des agents réducteurs, à travers une colonne de cadmium. Les ions nitrites sont ensuite dosés directement par des mesures spectrophotométriques. Nous avons validé l'efficacité de cette méthode pour analyser les nitrates contenus dans une cinquantaine d'échantillons prélevés. Malgré le temps exigé pour l'analyse de chaque échantillon, cette méthode est efficace pour déterminer la concentration des nitrates dans les extraits du sol. Elle peut être utilisée par les conseillers agricoles pour estimer le niveau de fertilité du sol, dans le cas d'un nombre limité d'échantillons.

Dans cette thèse, les résultats numériques (quantitatifs) du dernier chapitre sont cohérents avec les observations expérimentales (qualitatives et quantitatives), déjà cruciales pour préciser un savoir (qualitatif) issu de l'expertise, de la littérature et/ou du bon sens pratique. L'irrigation en goutte à goutte enterré permet d'acheminer l'eau et les engrais de manière localisée, directement aux racines des plantes. Cette application favorise la bonne maîtrise de l'azote dans la zone racinaire et réduit considérablement la lixiviation par rapport à l'irrigation par aspersion. Elle se révèle donc à la fois plus efficace et plus respectueuse de l'environnement. En revanche, cette méthode d'irrigation exige plus de technicité, son déroulement n'est pas directement observable (il n'y a que des mesures indirectes de ses déficiences) et elle ne peut pas totalement remplacer l'irrigation par aspersion, en particulier dans les premiers stades de croissance de la plante et si les goutteurs sont installés à 35 cm de profondeur.

Cette thèse a aussi permis d'évaluer les effets des doses apportées et la stratégie d'application sur la lixiviation et sur l'absorbation racinaire, en particulier via la méthode d'irrigation en goutte à goutte enterré. L'objectif était de montrer que l'application d'une dose réduite pouvait permettre de limiter la lixiviation tout en satisfaisant les besoins de la culture. Nous avons montré que la dose "50 Unités" pouvait être remplacée par la dose "25 Unités", sans différence significative sur la croissance de la plante, à condition de bien choisir les dates d'application. En ce qui concerne la stratégie d'application, nous avons constaté que l'application de l'engrais en fertigation via un "pulse" (courte durée de la fertilisation au sein d'un épisode d'irrigation) est une bonne solution pour limiter l'hétérogénéité du développement végétal. Celle-ci avait été remarquée pour un écartement de 160 cm entre les gaines enterrées. Y remédier implique aussi de prendre en compte la teneur initiale en nitrate dans le sol et l'historique de l'irrigation (les cycles d'irrigation précédant le fertigation) pour appliquer la stratégie indiquée lorsque les conditions de teneur en eau sont favorables. Les impacts de ces stratégies, examinés placette par placette, ont été analysés à l'aide de la modélisation bidimensionnelle au moyen du modèle HYDRUS-2D. Le but n'était pas seulement la représentation des flux, c'était aussi d'utiliser les résultats comme outil de gestion, pour fournir des recommandations. Le modèle a fourni des résultats similaires aux mesures obtenues in-situ pour les transferts hydriques et azotés. Il a permis de gérer de manière précise les flux sous différentes stratégies de fertigation et certaines méthodes d'irrigation. Nous pourrions donc l'utiliser afin d'alléger les travaux expérimentaux, mais à condition de savoir les valeurs des paramètres hydrodynamiques et l'histoire de la fertigation pour chaque simulation.

Perspectives - Recommandations pour le site de Lavalette

Une des premières recommandations est l'utilisation du "GPS différentiel" pour déterminer la position des gaines, comme cela a été fait pour dessiner la carte de la parcelle en 2014. Cette technique permet de réduire le travail nécessaire pour localiser les gaines avant chaque campagne expérimentale et pendant les opérations culturales ou les travaux de métrologie. Il est nécessaire aussi de mettre en œuvre le système de programmation de l'irrigation installé pour chaque placette, à la place de l'ouverture et la fermeture manuelle des vannes avant et après chaque cycle d'irrigation. Il faut également équiper chaque placette de manomètres situés en aval afin de détecter la chute ou l'augmentation de pression : ceci permet d'éviter la disjonction des gaines et les dommages causés au réseau au cours de l'irrigation. Etant donné que le réseau d'irrigation goutte à goutte enterré est composé de 12 blocs (placettes), nous recommandons de déterminer le stock initial de l'azote total pour chaque placette en particulier s'il y a une stratégie différente de fertigation pour chacune des placettes au cours de la même saison.

Pour améliorer l'homogénéité du développement végétal dans les placettes irriguées par le goutte à goutte enterré, avec écartement de 160 cm entre les gaines, nous proposons d'abord d'appliquer une dose importante d'engrais à la même date que le semis (à 10-20 cm de profondeur), puis d'effectuer plusieurs cycles d'irrigation en goutte à goutte enterré. De cette manière, l'engrais est rendu disponible dans le cas où les rangs de maïs sont situés à 50-60 cm de la gaine. Sinon, les rangs doivent être localisés directement au-dessus des gaines enterrées.. L'adoption de ces nouvelles stratégies de fertigation permettrait de limiter les effets environnementaux dus à l'application fréquente d'engrais.

Dans cette thèse et afin de quantifier la valeur potentielle de la minéralisation, nous avons supposé que les autres transformations qui figurent dans le cycle de l'azote (la dénitrification et la volatilisation) étaient négligeables. Toutefois, dans les conditions d'expérimentations réelles, le déversement d'un fort volume d'eau via l'irrigation par aspersion peut occasionnellement conduire à une valeur importante de la dénitrification, en conditions estivales. Lorsque la température est très élevée et que l'irrigation par aspersion est utilisée, le terme de dénitrification peut ne plus être négligeable et devrait alors être quantifié.

Les données acquises dans le cadre de cette thèse, participent également au développement d'un nouveau modèle, le modèle Optirrig, qui permet la génération, l'analyse et l'optimisation de scénarios d'irrigation - et bientôt de fertigation. Ce nouveau modèle prendra en compte le cycle de l'azote, en particulier des nitrates apportés par l'irrigation goutte-à-goutte enterré. La validation de la nouvelle version de Optirrig intégrant la gestion de l'azote se fera par la vérification des paramètres estimés par le modèle et mesurés in-situ sur plusieurs saisons culturales, notamment les saisons 2014 et 2015 et par comparaison au modèle HYDRUS-2D (Simunek et al. 1998, Kandelous and Simunek, 2010), utilisé dans le cadre de cette thèse.

Annexe

Validation d'une méthode manuelle d'analyse de l'azote nitrique dans le sol : extraction au KCl et dosage par la méthode colorimétrique après réduction sur colonne

Dans les zones agricoles, l'utilisation rationnelle des engrais azotés permet d'assurer une nutrition adéquate des plantes et de maintenir en permanence des conditions optimales de fertilité du sol. En revanche, l'application massive de fertilisants azotés constitue l'une des causes principales de la contamination des eaux de surface et des nappes phréatiques (Pei et al., 2015).

Pour éviter que la fertilisation azotée ne devienne une source de pollution, le niveau de fertilité du sol (reliquats azotés), sa capacité de minéralisation (la conversion de l'azote organique en forme minérale utilisable par les plantes), la dénitrification (réaction de réduction des nitrates en azote gazeux) et la lixiviation doivent absolument être maîtrisés. Ceci exige un suivi attentif, par des échantillonnages suffisamment fréquents, qui impliquent un dosage in situ ou au laboratoire.

Ce dosage des nitrates ou d'autres éléments nutritifs du sol se fait par différentes méthodes, plus ou moins complexes et plus ou moins précises, qui permettent de quantifier les nitrates et/ou nitrites présents dans le sol, les eaux et la plante.

1. Méthodes de dosage

1.1. Chromatographie ionique

C'est la technique la plus répandue pour des raisons de rapidité, sensibilité, souplesse, simplicité de mise en œuvre, fiabilité, ainsi que pour les possibilités d'automatisation (Stewart, 1987; Rantakokko et al., 2004) . Cette méthode présente également plus de sensibilité et de précision que les méthodes spectroscopiques (Siu and Henshall, 1998) ci-après. En effet, elle nous permet de séparer et de doser les ions chlorures, nitrates et

sulfates très précisément et ce grâce à une détection conductimétrique[11]. Son principal inconvénient est son coût élevé et son protocole expérimental assez compliqué (Michalski and Kurzyca, 2006).

1.2. Electrophorèse capillaire

L'électrophorèse capillaire (EC) est une technique alternative aux méthodes chromatographiques (Stahl, 1994). Elle est basée sur le rapport taille/charge des espèces chimiques soumises à un champ électrique. L'EC regroupe un grand nombre de modes de séparation ionique (électrophorèse de zone, micellaire ou sur gel, isoélectrofocalisation et électrochromatographie) (Kaniansky et al., 1999). Cette méthode est de plus en plus utilisée, notamment pour une détection simultanée de plusieurs espèces ioniques par des séparation rapides et sélectives (Jones and Jandik, 1991; Moorcroft et al., 2001).

La rapidité de préparation des échantillons et des analyses, la simplicité, l'excellente séparation des molécules (ex. les ions inorganiques) en systèmes complexes, la précision de l'analyse ainsi que la rapidité de détection d'une grande variété d'anions sont les avantages principaux de cette méthode (Jackson and Haddad, 1993; Öztekin et al., 2002). Au contraire de HPLC[12], cette technique est séduisante par le faible volume à analyser, la faible consommation de solution tampon et d'autres réactifs (Moorcroft et al., 2001; Oliveira et al., 2012).

Cependant, elle présente quelques inconvénients tels que :

- La faible vitesse de séparation, qui est limitée par la chaleur de Joule (l'échauffement du milieu conducteur dû au courant électrique qui le traverse).
- La faible reproductibilité et une sensibilité limitée surtout en comparaison avec la chromatographie ionique (IC) (Alvarez-Benedi and Munoz-Carpena, 2004; Anning et al., 2004).
- L'impossibilité d'automatiser entièrement ce procédé électrophorétique.

1.3. Méthode potentiométrique

Elle consiste en un dosage direct des nitrates par l'utilisation d'une électrode sélective. Cette électrode possède une mince couche de liquide échangeur d'ions, non miscible à la

[11] **Détection standard en Chromatographie ionique.**
[12] **La chromatographie en phase liquide à haute performance.**

solution de sol et spécifique aux nitrates. Cette couche de liquide est maintenue en place par une membrane poreuse inerte.

La méthode est relativement simple, souple à appliquer, appropriée pour les analyses en routine (Růžička et al., 1977; Mazloumet et al., 2004) et séduisante pour la rapidité d'analyse obtenue grâce à une mesure directe de la concentration des nitrates dans la solution de sol (Milham et al., 1970). En revanche, elle peut être rendue délicate en raison de sa sensibilité à un grand nombre d'ions interférents (Myers and Paul, 1968).

1.4. Méthode titrimétique

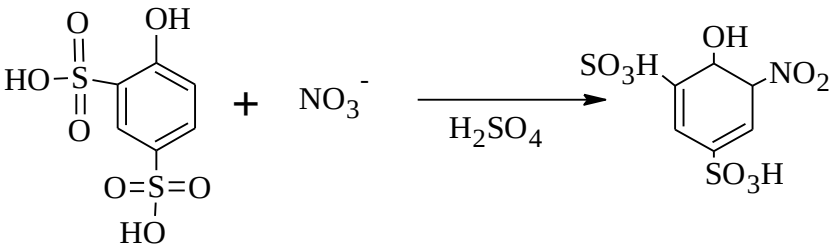
Son principe est la réduction des nitrates en ammonium d'après la méthode DEVARDA et titration après distillation, et ensuite entrainement dans la vapeur de l'ammonium. Elle constitue géneralement une bonne technique de réference mais elle présente cependant l'inconvénient d'être lente (Kieselbach, 1944; Wolf, 1944).

1.5. Méthodes spectroscopiques

1.5.1. Dosage spectrophotométrique des ions nitrates

Le dosage spectrophotométrique des ions nitrates peut se faire par nitration de différents composés phénoliques, décrits ci-après.

- L'Acide 2. 4-phénoldisulfonique selon la réaction suivante



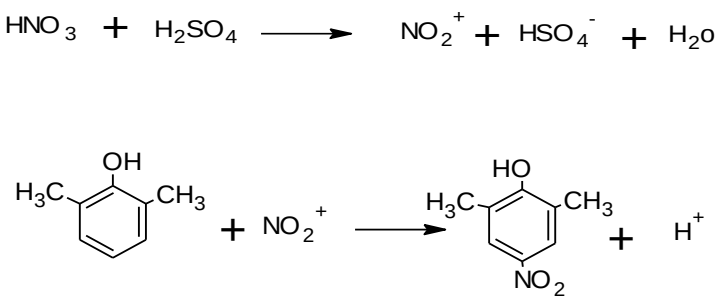
En présence d'acide 2.4 phénoldisulfonique les ions nitrates réagissent en milieu acide (H_2SO_4) pour former un dérivé nitré (l'acide 6 nitro 2.4-phénoldisulfonique), qui en milieu basique a une couleur jaune susceptible d'être mesurée par spectrophotométrie à 400 nm. Il faut noter que l'intensité de la couleur dépend de la quantité de nitrates présents au départ.

Cette méthode est très adaptée au dosage des nitrates en raison de sa simplicité de mise en œuvre au laboratoire (Harper, 1924). Elle concerne tous les dérivés oxydés de l'azote (de NO à NO_3H) à l'exception de NO_2. Cependant, elle exige du temps ainsi que des réactifs coûteux. De plus, les extraits du sol doivent être filtrés et évaporés avant que les réactifs de couleur puissent être ajoutés, ce qui produit une perte de nitrates (Myers and Paul, 1968). Il y a également la possibilité d'interférences avec plusieurs ions, surtout l'ion chlorure (West and Lyles, 1960; Boese et al., 1977) dont la teneur doit donc être inférieure à 10 mg L^{-1} (Ruf, 1959). Il existe également des risques d'interférences avec les matières organiques colorées en jaune par réaction avec l'acide sulfurique (Buckett et al, 1955).

- Le 3.4-xylenol

  Cette méthode développée par Barnes est moins sujette aux interférences et présente notamment une bonne sensibilité et une bonne reproductivité (Lewis, 1961). Par contre, la procédure est très longue (Gaya and Alimi, 2006).
- Le 2.6-xylenol

  En présence de 2.6-xylénol et d'acide sulfurique, les nitrates se transforment en 4-nitro-2.6-xylénol, extractible par le toluène et donnant en milieu alcalin une coloration jaune, susceptible d'un dosage spectrophotométrique selon la réaction suivante, qui se fait en deux étapes (Hartley and Asai, 1963) :



Etant donné que l'extraction se fait par un solvant, sans besoin d'une distillation à la vapeur, cette méthode est simple et rapide ; elle présente une bonne sensibilité mais elle ne convient pas à la détermination de nitrates dans les eaux usées et/ou salines (Andrews, 1964; Praus, 2002).

Contrairement à l'acide 2.4 phénoldisulfonique, où les produits de la réaction doivent être évaporés pour l'application de la méthode, les composés obtenus suite aux réactions avec le 2.6-xylenol ou le 3.4-xylénol peuvent être séparés par distillation à la vapeur ou par extraction (Andrews, 1964).

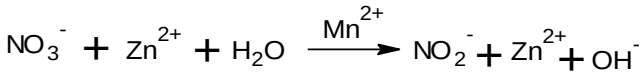
- L'acide chromotropique : cette méthode est sensible, sélective, simple et rapide (West and Lyles, 1960).
- Le salicylate de sodium : les nitrates donnent du paranitrosalicylate de sodium coloré en jaune et susceptible d'un dosage spectrophotométrique.

1.5.2. Dosage spectrophotométrique des composés azotés produits par l'oxydation de composés aromatiques par la brucine, en présence d'acide sulfurique

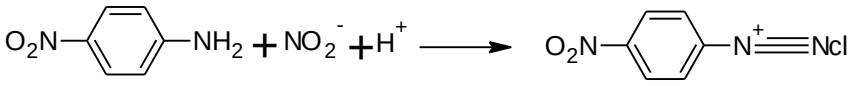
Cette méthode présente un risque d'interférences avec le chlorure, les nitrites et le fer (Boese et al., 1977). A cause de ces interférences, la détermination des nitrates dans les échantillons de sol se fait par la brucine après avoir détruit les nitrites présents au préalable dans le sol. Ce type de dosage permet de réduire le temps d'analyse et demande également moins d'équipements de laboratoire, par comparaison avec l'acide phénolsulphonique (Robinson et al., 1959; Baker, 1967).

1.5.3. Dosage des nitrates suite à la réduction de nitrates en nitrites d'après une réaction en deux étapes

La réduction des nitrates présents dans l'extrait de sol en nitrites peut se faire via des agents réducteurs tels que le zinc, un mélange sulfate de cuivre-sulfate d'hydrazine et par une colonne de cadmium cuivré (Margeson et al., 1980). Le dosage des nitrates impose que la mesure soit réalisée dans les plus courts délais après le prélèvement car le NO_3^- peut rapidement être réduit et il faut les transformer en nitrites afin de les détecter. Les ions nitrates peuvent être dosés directement. Ces méthodes directes présentent souvent un manque de sensibilité et sont affectées par diverses matrices interférentes. Afin de palier à ces deux inconvénients, NO_3^- est souvent préalablement réduit en NO_2^-. Ce sont donc les concentrations en nitrites qui sont évaluées. Cette approche nécessite alors une détermination des teneurs en nitrites présentes dans l'échantillon avant réduction des nitrates. Les concentrations en nitrates se déduisent finalement de la différence entre les concentrations en nitrites avant et après réduction (Slack, 1987).



- Les nitrites sous forme d'acide nitreux HNO_2 en milieu acide réagissent avec une amine aromatique le sulfanilamide (amino-4-benzènesulfonamide) dans une réaction de diazotation pour former un composé diazoïque (chlorure de diazonium) qui, en milieu acide, réagit avec le dihydrochlorure de N-(1-naphtyl)-éthylènediamine (N.E.D.) pour former un composé rosé à violet dont l'absorbance à 540 nm est proportionnelle à la concentration des nitrates et des nitrites (Slack, 1987 ; Rodier, 1996; Michalski and Kurzyca, 2006).



2. Détermination des nitrates dans les sols agricoles : la méthode manuelle colorimétrique

D'après la bibliographie, il existe plusieurs méthodes d'analyse directe ou indirecte de l'azote dans le sol. Dans cette étude nous nous sommes intéressés à examiner et valider une méthode manuelle indirecte qui permet de répondre au manque de moyens financiers dans cette thèse. Cette méthode est simple et économique du point de vue de la consommation de réactifs. Elle permet de doser les trois formes d'azote inorganique présentes dans le sol. Seule l'efficacité à estimer la concentration en nitrates a été examinée ici car la majeure partie de ce travail de thèse porte sur le transfert des nitrates et non de l'azote total ou de l'ammonium.

2.1. Principe d'analyse

Les analyses par cette méthode manuelle reposent sur la détermination des teneurs en nitrates par la réduction des nitrates en nitrites à travers une colonne de cadmium. Le dosage s'effectue en deux étapes. La première étape consiste à extraire l'échantillon au moyen d'une solution de chlorure de potassium 2 N[13]. Dans la seconde étape, les nitrates extraits sont ensuite réduits en nitrites par passage sur une colonne de réduction

[13] **KCL concentration**

constituée de cuivre déposé sur du cadmium. Cette réaction a lieu en milieu légèrement alcalin (pH 8 à 9). Cette méthode est fondée sur le même principe que la méthode automatisée du CIRAD, ce qui permet de comparer les teneurs en nitrates obtenues donc de valider la méthode manuelle proposée ici.

2.2. Matériel et Méthodes

2.2.1. Extraction des nitrates

La plupart des nitrates présents dans la solution du sol sont solubles dans l'eau. C'est pourquoi l'eau ou une solution saline diluée suffisent pour l'extraction du nitrate dans la plupart des sols. De très nombreux réactifs sont possibles (ex: KCl, $CuSO_4$, $CaCl_2$, $(NH_4)_2SO_4$) à différentes concentrations. L'utilisation d'un milieu salin permet une bonne floculation de l'argile présente, ce qui facilite la clarification de l'extrait. Dans cette étude on va utiliser une solution de KCl à 1M puis pour une bonne séparation on utilisera l'agitation mécanique pendant une heure puis la centrifugation (300 tours par minute) pendant 7 à 10 min.

2.2.2. Prélèvement et conservation

Il faut prélever les échantillons représentatifs dans un contenant de plastique ou de verre et les conserver à environ 4 °C. Le délai de conservation entre le prélèvement et l'analyse ne doit pas excéder 1 mois.

2.2.3. Préparations des solutions

Avant d'accéder au dosage, il convient de préparer deux types de solutions, les solutions de dosages et les solutions de coloration.

Ci-dessous la liste des solutions de dosage :

- Solution mère de nitrate (NO_3^--N)= 600 mg L^{-1}
- Solutions étalons de nitrate aux différentes concentrations de 0.5, 2, 5 et 6 mg L^{-1} (permet de tracer la courbe d'étalonnage d'après la mesure de l'absorbance des solutions étalons préparées)
- Solution mère de nitrite (NO_2^--N)=600 mg L^{-1}
- Solution étalon de nitrite (NO_2^--N)= 6 mg L^{-1} (permet de vérifier l'efficacité de la colonne de réduction en comparant l'absorbance de la solution étalon de nitrate avec celle de la solution étalon de nitrite)

- Solution mère de chlorure d'ammonium(NH_4Cl) = 100 g L^{-1}
- Solution tampon diluée de chlorure d'ammonium(NH_4Cl) = 10 g L^{-1}
- Solution d'ammoniaque, w(NH_4OH) à 6% permet d'ajuster le pH de la solution mère de chlorure d'ammonium(NH_4Cl) à une valeur comprise entre 8.7 et 8.8
- Acide phosphorique, w(H_3PO_4) = 80%

Ci-dessous la liste des solutions de coloration :

- Solution de sulfanilamide ($C_{12}H_{16}N_2Cl_2$) = 80 g L^{-1}
- Solution de chlorure de N-(1-naphtyl) éthylènediamine dihyraté (N.E.D) = 4 g L^{-1}
- Réactif de coloration (20 mL de solution de sulfanilamide + 20 mL de solution de chlorure de N-(1-naphtyl) éthylènediamine dihyraté + 20 mL d'acide phosphorique)

2.2.4. Activation de la colonne

Après avoir préparé la poudre de cadmium et rempli la colonne de réduction conformément aux étapes données dans le protocole d'analyse[14] et avant de procéder à la réduction, il faut activer la colonne en versant, dans l'ordre, les quantités suivantes des solutions :

- 20 mL de solution tampon diluée (NH_4Cl) = 10 g L^{-1}
- 20 mL de solution mère de chlorure d'ammonium (NH_4Cl) = 100 g L^{-1}
- 20 mL de solution tampon diluée (NH_4Cl) = 10 g L^{-1}

2.3. Réduction des nitrates en nitrites

Une fois la colonne activée, nous pouvons procéder à la réduction des nitrates en nitrites en versant les solutions suivantes, dans l'ordre :

- 1 mL de filtrat contenant les nitrates à réduire
- 10 mL de solution tampon diluée (NH_4Cl) = 10 g L^{-1}
- 20 mL de solution tampon diluée (NH_4Cl) = 10 g L^{-1} pour rincer la colonne

Il faut ensuite recueillir le tout dans un flacon de prélèvement de 50 mL, puis la colonne est prête pour un nouvel échantillon.

[14] **Qualité du sol - Dosage des nitrates, des nitrites et de l'ammonium dans les sols bruts par extraction au moyen d'une solution de chlorure de potassium - Partie 1 : méthode manuelle**

Il convient de mesurer en même temps l'absorbance des solutions suivantes :

- Solution de chlorure de potassium
- Solutions étalons de nitrate
- Solution étalon de nitrite
- Solution étalon zéro (l'eau)

La mesure da la densité optique de ces solutions sert à :

- comparer l'absorbance de la solution étalon de nitrate et celle de la solution étalon de nitrite afin de vérifier l'efficacité de la conversion par la colonne de cadmium.
- Une mesure de l'extrait à blanc permet d'éviter la contamination au cours de travail au laboratoire.

2.3. Résultats et discussion

Quatre solutions étalons de différentes concentrations en nitrates (0.5, 2, 5 et 6 mg L^{-1}), ont été préparées à partir de la solution mère (concentration connue, 600 mg L^{-1}). La réduction de nitrates en nitrites a été faite par la colonne de cadmium et mesurée par deux méthodes, la méthode automatisée (CIRAD, notée A) et la méthode manuelle (notée B). Le Tableau (14) présente les résultats.

Tableau 13. Les concentrations des nitrates mesurées via les deux méthodes A et B et leurs absorbances optiques estimées via la colorimétrie à 543 nm.

Solutions de nitrates (mg L^{-1}) préparées et mesurées via méthode A	Densité optique mesurée via méthode B	Concentration mesurée par la méthode B		
		1er essai	2ème essai	3ème essai
6	0.586	5.46	5.87	5.92
5	0.506	4.70	4.70	4.82
2	0.21	1.88	1.9	1.79
0.5	0.052	0.47	0.49	0.47

Nous remarquons que l'emploi manuel des pipettes à volume variable est une source d'erreurs non négligeable. En effet, on observe des différences de 3 à 5 % entre les concentrations de nitrates mesurées par la méthode B (3 essais) et les concentrations mesurées par la méthode A. Toutefois, ces erreurs irréductibles sont dans une gamme acceptable pour des analyses manuelles.

A partir de ces mesures présentées, nous pouvons établir une relation entre les concentrations en nitrates et leurs absorbances optiques obtenues par la mesure colorimétrique. Cette relation (Fig. 39) permet de calculer directement la concentration des nitrates, dans les échantillons de sol prélevés, à partir de leurs absorbances optique mesurées à une longueur d'onde de 543 nm.

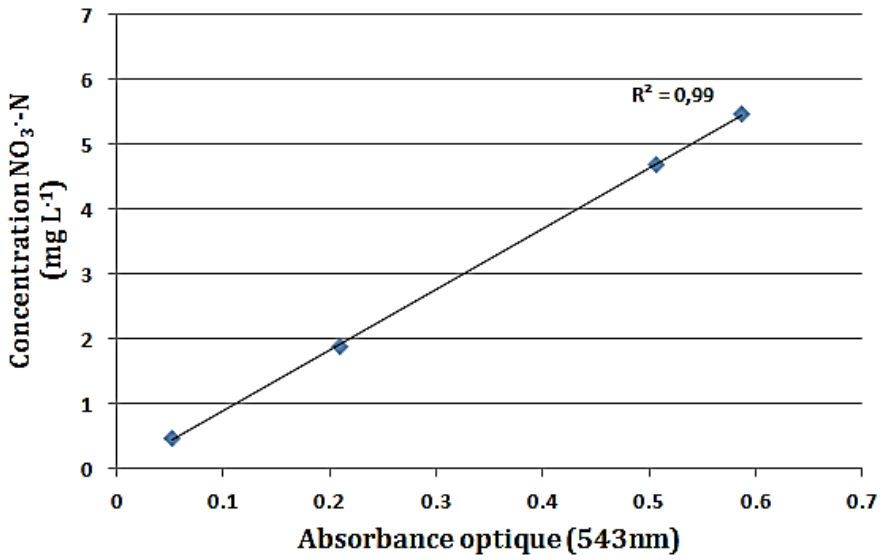


Figure 53. Courbe d'étalonnage entre la concentration et l'absorbance à 543 nm mesuré par la méthode B.

La teneur en nitrates a été mesurée pour une série de quarante-deux échantillons afin évaluer la sensibilité, la justesse et la robustesse de la méthode colorimétrique manuelle (B) en comparaison avec celle mesurée par la méthode spectrophotométrique (A). Les extraits de chacun de ces échantillons, leurs concentrations en nitrates et leurs absorbances optiques sont indiqués dans le Tableau 15 ci-dessous.

Tableau 14. La concentration et l'absorbance mesurées par les deux méthodes A (automatisée) et B (manuelle) pour une série de 42 échantillons.

Méthode	A		B		Méthode	A		B	
N° d'échantillon	D.O	$N\text{-}NO_3^-$	D.O	$N\text{-}NO_3^-$	N° d'échantillon	D.O	$N\text{-}NO_3^-$	D.O	$N\text{-}NO_3^-$
1	0.0661	1.51	0.175	1.54	22	0.0353	0.68	0.084	0.68
2	0.0519	1.18	0.143	1.24	23	0.0347	0.67	0.082	0.66
3	0.0348	0.79	0.095	0.79	24	0.033	0.64	0.08	0.64
4	0.054	1.23	0.148	1.29	25	0.036	0.7	0.096	0.8
5	0.0531	1.21	0.141	1.23	26	0.0563	1.09	0.126	1.08
6	0.0361	0.82	0.096	0.80	27	0.0568	1.1	0.135	1.16
7	0.0306	0.69	0.079	0.63	28	0.0386	0.75	0.089	0.73
8	0.0278	0.63	0.077	0.61	29	0.046	0.89	0.095	0.79
9	0.0305	0.69	0.082	0.66	30	0.0334	0.65	0.082	0.66
10	0.0324	0.74	0.09	0.74	31	0.0334	0.65	0.079	0.63
11	0.0685	1.56	0.175	1.54	32	0.0319	0.62	0.073	0.58
12	0.0448	1.02	0.117	1	33	0.0941	1.81	0.215	1.93
13	0.0455	1.04	0.118	1.1	34	0.0421	0.81	0.093	0.77
14	0.0341	0.78	0.095	0.79	35	0.0326	0.63	0.076	0.6
15	0.0269	0.61	0.079	0.63	36	0.0342	0.66	0.08	0.64
16	0.0654	1.26	0.149	1.3	37	0.0327	0.63	0.072	0.6
17	0.0626	1.21	0.141	1.22	38	0.0314	0.61	0.077	0.62
18	0.0471	0.91	0.112	0.94	39	0.0346	0.67	0.08	0.64
19	0.0379	0.73	0.092	0.76	40	0.0336	0.65	0.08	0.64
20	0.0358	0.69	0.088	0.71	41	0.036	0.69	0.085	0.69
21	0.0353	0.68	0.085	0.69	42	0.0455	1.04	0.118	1.2

La méthode manuelle semble être tout à fait applicable pour analyser les nitrates dans le sol agricole (Tableau 15 et Fig. 40). La différence de l'absorbance optique mesurée peut être expliquée par l'utilisation de deux appareils différents, la colorimétrie et la spectrométrie.

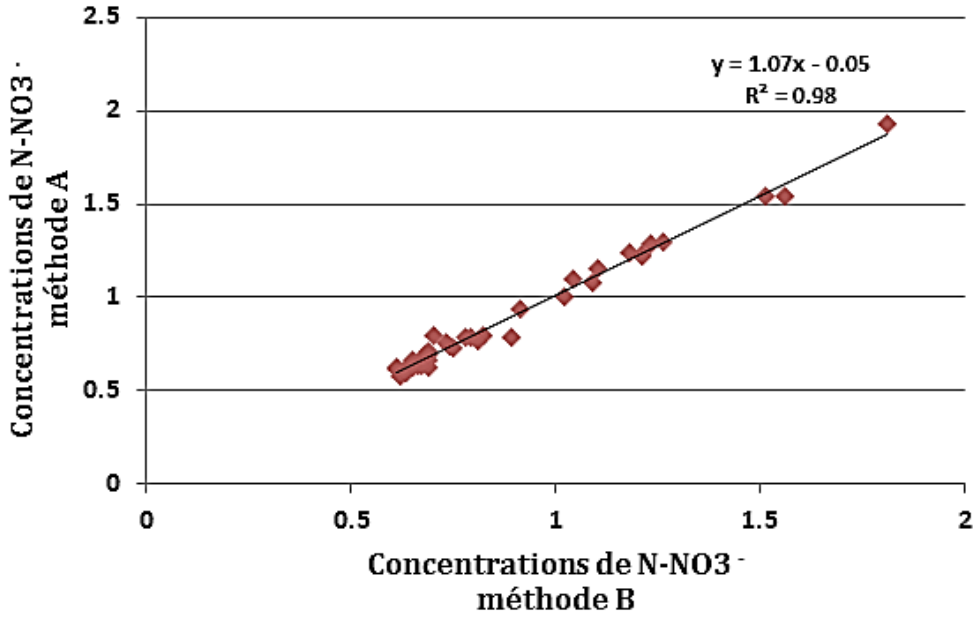


Figure 54. Les concentrations des nitrates mesurées dans les 42 échantillons par les deux méthodes : (A) méthode manuelle et (B) méthode automatisée.

Pour les nitrates, une régression hautement significative a été obtenue entre les concentrations déterminées par la méthode B et celles trouvées par la spectrophotométrie de référence utilisée au CIRAD.

En somme, cette méthode B est simple à mettre en œuvre et efficace pour déterminer les nitrates dans les extraits de sol. Cependant, elle ne permet pas d'effectuer des analyses sur le terrain et la fréquence des analyses est très faible, ce qui est une contrainte, y compris pour mener à bien des comparaisons avec la méthode automatisée.

3. Conclusion

La détermination de la teneur en nitrates en plein champ est difficile parce que l'azote sous forme d'ion nitrate (NO_3^-) est un élément très mobile et peu retenu par les particules du sol, notamment les agrégats argileux chargés négativement. L'effort physique et le temps considérable consacrés aux prélèvements dont l'analyse se fait à un prix prohibitif ont de quoi faire réfléchir l'expérimentateur.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons examiné et validé une méthode manuelle qui repose sur la réduction des nitrates en nitrites par une colonne de cadmium et qui permet de déterminer la concentration en azote dans les échantillons prélevés sur le site

expérimental. En revanche, cette méthode présente plusieurs inconvénients, telles que le temps nécessaire pour analyser chaque échantillon et le blocage partiel (fréquent) de la colonne de cadmium après plusieurs passages. De plus, nous n'avons pas pu tester l'efficacité de cette méthode à détecter la faible concentration de nitrates qui peut être trouvée dans les échantillons de sol (i.e. il a été impossible de déterminer la limite basse de détection).

Références de l'annexe

Alvarez-Benedi, J., Munoz-Carpena, R. (2004). Soil-water-solute process characterization: an integrated approach. CRC Press.

Andrews, D. W. W. (1964). A sensitive method for determining nitrate in water with 2, 6-xylenol. Analyst, 89(1064), 730-734.

Anning, L. L. Z. J. Z., Weiqin, X. (2004). Quantification of inorganic anions in soil by capillary electrophoresis. Acta Pedologica Sinica, 6, 006

Ardakani, M. M., Salavati-Niasari, M., Jamshidpoor, M. (2004). Selective nitrate poly (vinylchloride) membrane electrode based on bis (2-hydroxyacetophenone) ethylenediimine vanadyl (IV). Sensors and Actuators B: Chemical, 101(3), 302-307.

Buckett, J., Duffield, W. D., Milton, R. F. (1955). The determination of nitrate and nitrite in soil. Analyst, 80(947), 141-145.

Boese, S. W., Archer, V. S., O'Laughlin, J. W. (1977). Differential pulse polarographic determination of nitrate and nitrite. Analytical chemistry, 49(3), 479-484.

De Oliveira, M. A. L., do Carmo Soares, D., Tostes, G. S., do Carmo Guimarães, M., Vaz, F. A. S. (2012). Optimization of an alternative methodology for simultaneous analysis of nitrite and nitrate in water from urban stream by capillary electrophoresis under direct UV detection. American Journal of Analytical Chemistry, 3(7), 484.

Gaya, U. I., Alimi, S. (2006). Spectrophotometric determination of nitrate in vegetables using phenol. Journal of Applied Sciences and Environmental Management, 10(1), 79-83.

Harper, H. J. (1924). The Accurate determination of nitrates in soils. Industrial & Engineering Chemistry, 16(2), 180-183.

Hartley, A. M., Asai, R. I. (1963). Spectrophotometric determination of nitrate with 2, 6-Xylenol reagent. Analytical Chemistry, 35(9), 1207-1213.

Jackson, P. E., Haddad, P. R. (1993). Capillary electrophoresis of inorganic ions and low-molecular-mass ionic solutes. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 12(6), 231-238.

Jones, W. R., Jandik, P. (1991). Controlled changes of selectivity in the separation of ions by capillary electrophoresis. Journal of Chromatography A, 546, 445-458.

Kaniansky, D., Masár, M., Marák, J., Bodor, R. (1999). Capillary electrophoresis of inorganic

anions. Journal of Chromatography A, 834(1), 133-178

Kieselbach, R. (1944). Microdetermination of nitrates by Devarda method. Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition, 16(12), 764-766.

Lewis, D. G. (1961). Colorimetric determination of nitrate with 3, 4-Xylenol. Analytical Chemistry, 33(8), 1127-1128.

Margeson, J. H., Suggs, J. C., Midgett, M. R. (1980). Reduction of nitrate to nitrite with cadmium. Analytical Chemistry, 52(12), 1955-1957.

Michalski, R., Kurzyca, I. (2006). Determination of nitrogen species (nitrate, nitrite and ammonia ions) in environmental samples by ion chromatography (review). Polish Journal of Environmental Studies, 15, 5–18

Milham, P. J., Awad, A. S., Paull, R. E., Bull, J. H. (1970). Analysis of plants, soils and waters for nitrate by using an ion-selective electrode. Analyst, 95(1133), 751-757.

Milham, P. J., Awad, A. S., Paull, R. E., Bull, J. H. (1970). Analysis of plants, soils and waters for nitrate by using an ion-selective electrode. Analyst, 95(1133), 751-757.

Moorcroft, M. J., Davis, J., Compton, R. G. (2001). Detection and determination of nitrate and nitrite: a review. Talanta, 54(5), 785-803.

Myers, R. J. K., Paul, E. A. (1968). Nitrate ion electrode method for soil nitrate nitrogen determination. Canadian Journal of Soil Science, 48(3), 369-371.

Öztekin, N., Nutku, M. S., & Erim, F. B. (2002). Simultaneous determination of nitrite and nitrate in meat products and vegetables by capillary electrophoresis. Food chemistry, 76(1), 103-106.

Pei, H., Scanlon, B. R., Shen, Y., Reedy, R. C., Long, D., Liu, C. (2015). Impacts of varying agricultural intensification on crop yield and groundwater resources: comparison of the North China Plain and US High Plains. Environmental Research Letters, 10(4), 044013.

Robinson, J. B. D., Allen, M. D. V., Gacoka, P. (1959). The determination of soil nitrates with a brucine reagent. Analyst, 84(1004), 635-640.

Rantakokko, P., Mustonen, S., Yritys, M., Vartiainen, T. (2004). Ion chromatographic method for the determination of selected inorganic anions and organic acids from raw and drinking waters using suppressor current switching to reduce the background noise. Journal of liquid chromatography & related technologies, 27(5), 829-842.

Růžička, J., Hansen, E. H., Zagatto, E. A. (1977). Flow injection analysis: Part VII. Use of ion-

selective electrodes for rapid analysis of soil extracts and blood serum. Determination of potassium, sodium and nitrate. Analytica Chimica Acta, 88(1), 1-16.

Stahl, R. (1994). Routine determination of anions by capillary electrophoresis and ion chromatography. Journal of Chromatography A, 686(1), 143-148.

Stewart, B. M. (1987). Ion chromatographic determination of nitrate in 2 M KC1 soil extracts. Journal of soil science, 38(3), 415-419.

Siu, D. C., Henshall, A. (1998). Ion chromatographic determination of nitrate and nitrite in meat products. Journal of chromatography A, 804(1), 157-160.

West, P. W., Lyles, G. L. (1960). A new method for the determination of nitrates. Analytica Chimica Acta, 23, 227-232.

Wolf, B. (1944). Determination of nitrate, nitrite, and ammonium nitrogen rapid photometric determination in soil and plant extracts. Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition, 16(7), 446-447.