



HAL
open science

Synthèse bibliographiques des impacts du drainage agricole en contexte de marais

Julien Tournebize

► **To cite this version:**

Julien Tournebize. Synthèse bibliographiques des impacts du drainage agricole en contexte de marais. [Rapport Technique] INRAE UR HYCAR. 2019, pp.1-31. hal-03748467

HAL Id: hal-03748467

<https://hal.inrae.fr/hal-03748467>

Submitted on 9 Aug 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

INRAE

Synthèse bibliographiques des impacts du drainage agricole en contexte de marais

Impacts de la conversion d'un drainage de surface à un drainage enterré sur le régime hydrologique et la qualité des eaux appliqués au Marais Poitevin

Tournebize Julien – UR HYCAR (eq ARTEMHYS), Centre
INRAE Jouy-Antony, France
21/10/2019

Impacts de la conversion d'un drainage de surface à un drainage enterré sur le régime hydrologique et la qualité des eaux.

I. Introduction

Les impacts de drainage agricole ont fait l'objet de nombreuses publications scientifiques, citons Blann et al., 2009, Kladvko et al 2001, Hénine et al 2012, Sloan et al., 2017... De façon générale, les études montrent que l'installation de tuyaux enterrés pour évacuer les excédents d'eau modifie les chemins de l'eau, mais peu le bilan hydrologique de sol hydromorphe, augmente les transferts de soluté soluble et diminue les transferts particuliers.

Les auteurs soulignent que pour évaluer les impacts du drainage, il convient de se situer dans un usage du sol équivalent. En effet, il est évident que la conversion d'une zone humide, ou une prairie naturelle hydromorphe en parcelle cultivable par l'introduction du drainage génère des impacts négatifs notamment sur la qualité des eaux. Ce fut le cas dans les années 1980, lorsque les opérations de drainage ont contribué à la mise en culture de terres traditionnellement conduites en prairie naturelle (Steyaert et al, 1995). Ainsi, comme le souligne la doctrine (cité dans Huet et Martin, 2003), convertir une prairie en une culture drainée a de fortes conséquences environnementales sur le milieu aquatique. En se basant sur un même usage agricole d'un sol, les impacts sont à aborder différemment. D'un point de vue agronomique sur l'intérêt du drainage agricole, Pons (1988) et Damour et al., (1977) confirment que la gestion hydraulique de la nappe perchée en marais de l'Ouest (par drainage de surface ou souterrain), est bénéfique d'une part à la prospection racinaire du blé d'hiver et par conséquent à son rendement. L'élongation racinaire est ainsi favorisée avec une nappe plus basse, notamment dans le cas du drainage souterrain, et ainsi le blé a un rendement supérieur de 10% en moyenne sur 6 ans par rapport à une situation non drainée équivalente¹, et une efficacité d'assimilation de l'azote supérieure, limitant le stock potentiellement lixiviable dans les eaux de drainage. Les auteurs, sans promouvoir le drainage, admettent que les parcelles déjà assainies par ados et avec un sol à bon potentiel agronomique puissent bénéficier du drainage enterré notamment pour réduire les flux de polluants particuliers. Dans le cadre du dossier de régularisation, l'ensemble des parcelles étaient cultivées avant l'implantation de drainage souterrain. Il s'agit dans cette synthèse de préciser scientifiquement les impacts du changement de technique de drainage de surface à un drainage souterrain.

Un corpus de 222 publications a été consulté dont 45 publications ont été retenues dans cette synthèse.

II. Définition et typologie

Le drainage concerne les travaux effectués dans la parcelle agricole et l'assainissement agricole comprend les ouvrages de transferts d'eau des parcelles aux émissaires naturels. Les techniques de drainage comprennent drainage de surface et drainage souterrain. Le drainage de surface consiste à limiter l'infiltration de l'eau de pluie, par profilage du terrain en planches ou ados, et/ou à favoriser l'évacuation des eaux de ruissellement, grâce à des rigoles ou fossés peu profonds : cette technique, présentant des inconvénients pour l'agriculture mécanisées, est en voie de disparition. Le drainage souterrain a pour but de rabaisser le niveau de la nappe dans le sol pour accélérer le ressuyage des terres, au moyen de tuyaux enterrés.

¹ Rappelons que le drainage permet de maintenir un rendement à un niveau quasi-équivalent à un sol sain non drainé, en limitant l'impact de l'hydromorphie

1. Définition des techniques de drainage (Kosuth 1985)

Ados : Type de modelé de surface des champs réalisé par l'homme. Le principe est de surélever, en vue de les assainir, certaines parties de la surface du sol au-dessus d'autres qui évacuent l'eau en excès

Assainissement agricole

- Au sens strict : ensemble des moyens assurant le transport des eaux regroupées naturellement ou à la suite du drainage, jusqu'au réseau hydrographique naturel
- Au sens large : synonyme de « drainage + assainissement agricole »

Collecteur : conduite ou fossé destiné à recevoir les écoulements captés dans les parcelles par plusieurs types d'ouvrages (drains, fossés, galeries drainantes) et à les acheminer jusqu'à l'exutoire.

Drain : dans le sens le plus large, ouvrage servant à intercepter l'eau s'écoulant du sol sous l'effet des forces de gravité. Usuellement, on réserve le terme de drain aux conduits artificiels posés dans le sol (drains plastiques, drains en poterie, ...)

Drainage : en général, ensemble des opérations nécessaires à la suppression des excès d'eau dans les terrains trop humides, agricoles ou non. En pédologie, désigne les mouvements d'eau dans ou sur le sol (drainage naturel interne ou externe).

Drainage agricole : ensemble des opérations nécessaires à la suppression des excès d'eau à l'échelle de la parcelle agricole. En agriculture, le choix de la technique de drainage (fossés ouverts, drains enterrés, techniques associées, modelé de surface, puits, Figure 1) et le dimensionnement des réseaux dépendent des objectifs de l'agriculteur et des caractéristiques du milieu (origine de l'excès d'eau, nature des sols, ...)

Engorgement d'un sol : saturation temporaire ou permanente d'un sol par l'eau, du fait d'un drainage naturel déficient

Excès d'eau : phénomène résultant d'un bilan hydrique excédentaire entre les apports et les exportations d'eau d'un volume de sol donné. Cette notion est donc relative à une surface déterminée (souvent la parcelle, en drainage agricole) et à un intervalle de temps défini. On distingue essentiellement les excès d'eau après : leur étendue (localisée de type « mouillères », ou généralisé comme nappe perchée, alluviale, ...) ; leur origine (interne, eaux météoriques tombées au droit de la surface, ou externe, submersion, ...) ; leur durée (temporaire comme nappe perchée ou permanente comme nappe alluviale). On peut estimer qu'il y a excès d'eau dès que la teneur en eau dépasse la capacité de rétention. Les conséquences d'un excès d'eau ne seront pas les mêmes selon la durée de cet excès et selon les systèmes de culture pratiqués ; elles dépendent notamment des correspondances entre le calendrier des excès d'eau et le calendrier cultural.

Hydromorphie : l'hydromorphie n'est que le résultat visible de l'engorgement antérieur d'un sol, dont la nature et l'intensité sont liées à des phénomènes : d'oxydo-réduction du fer et du manganèse ; d'accumulation et de modification de la matière organique. Les traces d'hydromorphie (taches rouille, teintes bleuâtres-verdâtres de gleys, abondance et aspect de la matière organique) peuvent être absentes ou masquées, alors même que le sol est engorgé, dans les cas suivants : horizons calcaires, horizons déferriés, sol à nappe circulante oxydante. Les traces d'hydromorphie observées peuvent résulter de phases d'engorgement anciennes, qui ont cessé aujourd'hui (hydromorphie fossile).

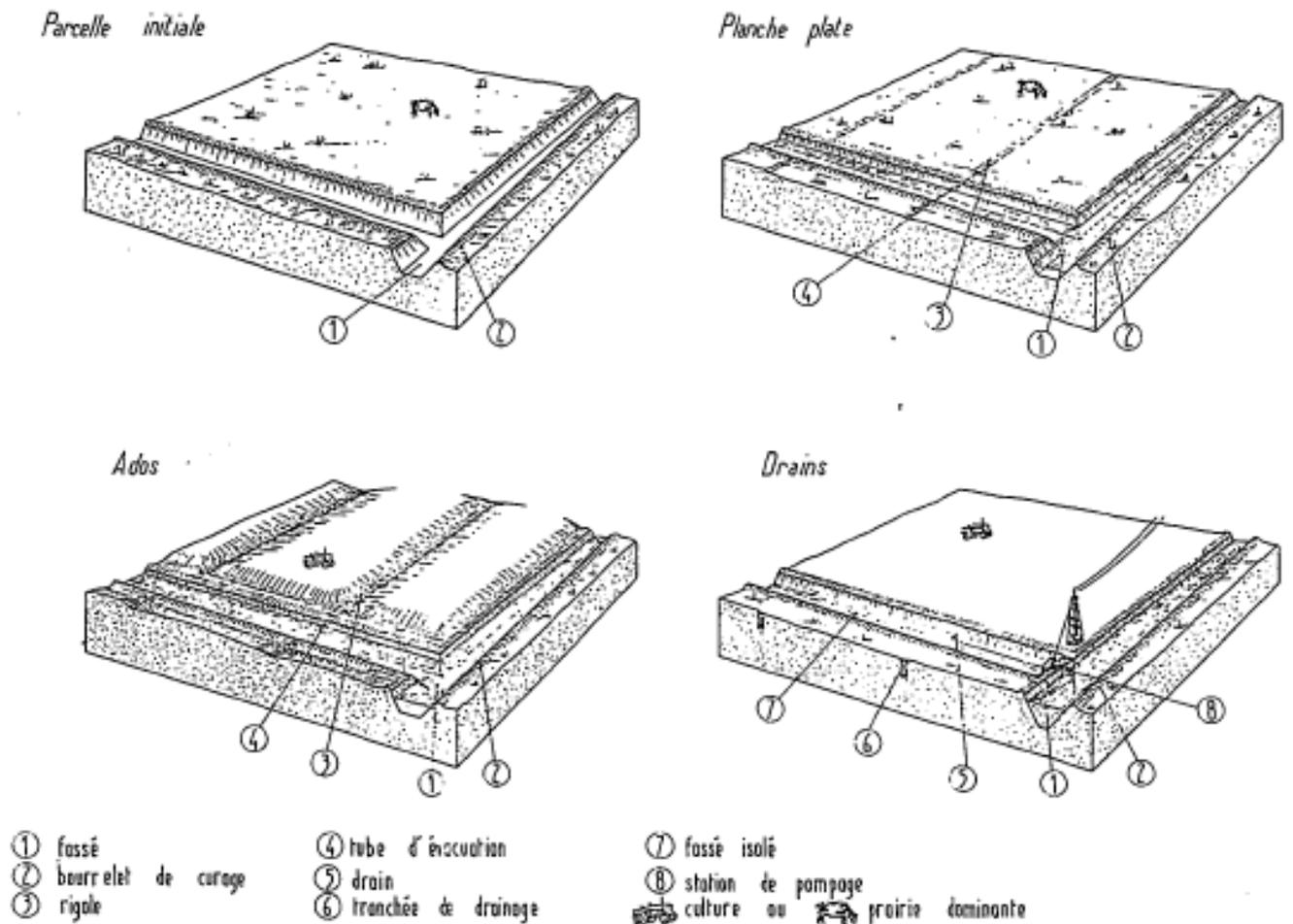


Figure 1. Les différentes techniques de drainage agricole (extrait de Collas 1985)

Sol hydromorphe : Les sols hydromorphes sont caractérisés par des phénomènes de réduction ou de ségrégation locale du fer, liés à une saturation temporaire ou permanente des pores par l'eau, ce qui provoque un déficit prolongé en oxygène. C'est un sol présentant des traces d'hydromorphie. Certains sols affectés actuellement par un engorgement peuvent ne pas présenter de traces d'hydromorphie et inversement la présence de ces traces n'est pas obligatoirement synonyme d'un engorgement actuel d'un sol ; en matière de classification des sols, le caractère hydromorphe apparaît à un niveau plus ou moins élevé selon que l'engorgement est le facteur essentiel de la formation du sol, ou un caractère secondaire, surimposé à d'autres caractères dominants.

2. Le drainage de Marais (extrait de Collas 1985)

Pour le cas des Marais de l'Ouest, une typologie des parcelles a été proposée par Collas en 1985.

Les parcelles non aménagées

Les parcelles sans aménagement bénéficient uniquement du contrôle du niveau d'eau par les canaux. Elles sont, en principe, à l'abri des submersions. Compte tenu du bourrelet dû au dépôt des boues de curage des fossés, elles ont une forme de cuvette et ont tendance à stocker l'eau de pluie hivernale.

Ces parcelles sont donc généralement réservées à la prairie permanente qui ne produit qu'au printemps et en fin d'été. En, hiver, la production d'herbe est nulle à cause des températures trop faibles et d'un engorgement en eau. En été les plantes, du fait de leur enracinement peu profond, souffrent de la sécheresse. La charge en animaux dépasse rarement 0,6 U.G.B./ha.

Les parcelles mises en planches

L'aménagement en planches consiste simplement à créer sur une parcelle une série de files de rigoles ou mini-fossés, destinés à limiter l'engorgement de surface et en particulier à faire disparaître les flaques. Cet aménagement peu coûteux ne nécessite pas un niveau d'exhaure très bas : - 45 cm par rapport au niveau moyen du sol de la parcelle. Cet aménagement, parfois réalisé sans isolement hydraulique, peut être adapté à un système de pompage éolien. Le drainage n'étant effectif que sur 20 à 25 cm, on l'utilise généralement pour l'amélioration des prairies. Suivant le niveau de fertilisation apporté, l'accroissement de la production de la prairie peut aller de 30 % à plus de 200 %.



Figure 2. Parcelle conduite en prairie, aménagée par planche et rigoles connectées à un drain le reliant au fossé tertiaire (site expérimental INRA de Saint Laurent de la Pré, photo prise le 27/04/2018)

L'aménagement par ados ou planches bombées

Ce système consiste à modeler les planches pour leur donner une forme bombée. Il est très ancien. Le profilé réalisé soit à la charrue soit au bulldozer, est maintenu chaque année par un labour en planches (Figure 3). Ce système comme le précédent, crée des obstacles à la circulation des engins agricoles et demande un entretien régulier à chaque campagne (réfection des rigoles au moins). Bien que relativement coûteux à mettre en place, les productions réalisées sur ce système sont bonnes et

pratiquement comparables à celles des parcelles à drainage enterré (rendement potentiel en blé = 90 % de celui obtenu avec un drainage enterré). Le niveau de risque de non fonctionnement est quasi nul. Ce système a pour principal inconvénient d'être mal adapté aux conditions de culture mécanisées.

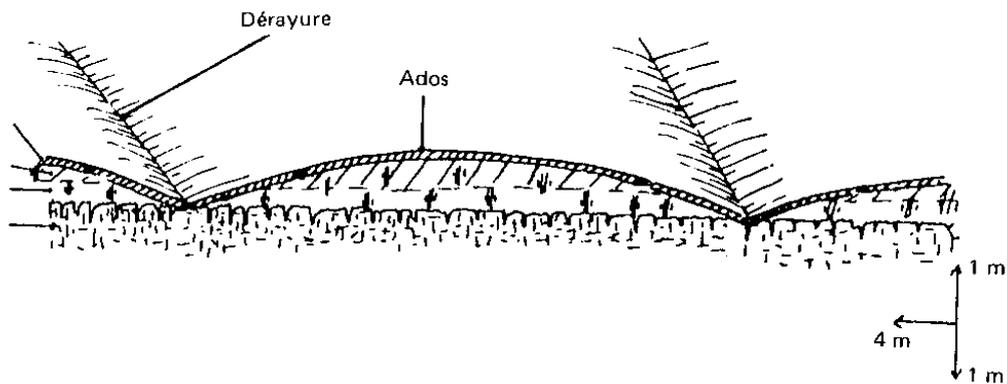


Figure 3. Schéma d'un drainage de surface par planche bombée (extrait de Pons, 1997)

En vue de coupe (Figure 4), la pente créée artificiellement entre le sommet de l'ados et la base de la dérayment ou rigole, favorise les écoulements de surface (ruissellement par refus d'infiltration) ainsi qu'un rabattement de nappe puisqu'un gradient hydraulique s'installe, en période de saturation, entre ce sommet et la rigole. En général la différence de cote s'élève à 30-50cm selon les cas de figure et la topographie de la parcelle. Dans le cas de drainage de surface par planche bombée, deux types d'écoulement sont donc collectés par la rigole : ruissellement de surface et rabattement d'une nappe sur 30-50cm.

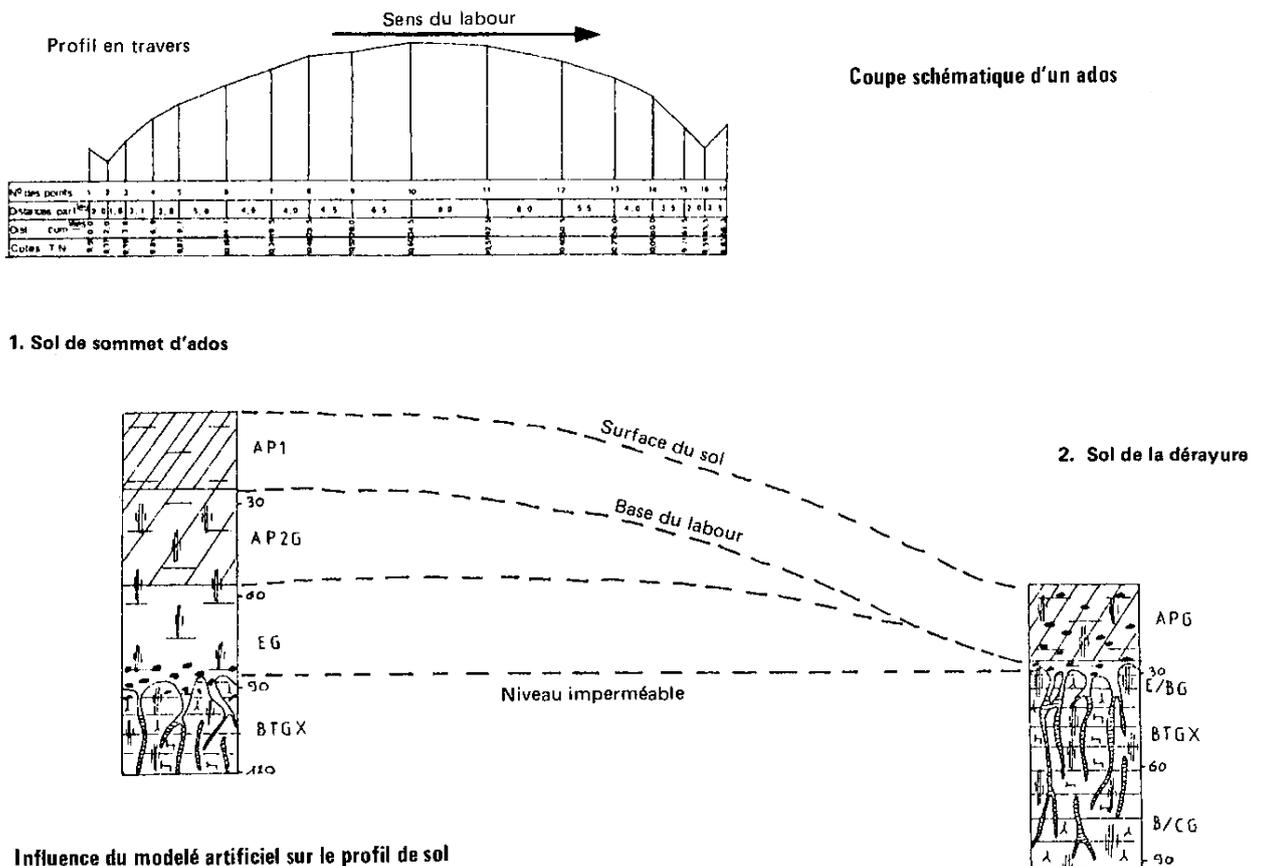


Figure 4. Coupe d'une section de sol aménagée en planche bombée (extrait de Pons, 1997)



Figure 5. Drainage de surface par rigole sur sol nu et en culture (photo prises le 16/03/2019)

Aménagement par drains enterrés

Le principe du drainage par drains enterrés est classique ; il consiste à poser dans le sol des files parallèles de drains perforés avec un écartement généralement compris entre 10 et 20 m en contexte de marais atlantique ; leur profondeur voisinant le mètre. Dans les conditions de sols argileux des Marais souvent instables et humides en profondeur au moment de la pose des drains, il est recommandé de préférer systématiquement comme machine poseuse de drains une trancheuse plutôt qu'une sous-soleuse. Les drains enterrés ont l'avantage de ne pas gêner les travaux culturaux. Contrairement aux rigoles et aux ados, la superficie cultivable est proche de 100 % (pas de pertes dues aux passages des rigoles). Théoriquement la capacité de ce système à évacuer rapidement l'excès d'eau est supérieure aux autres systèmes de drainage.



Figure 6. Sortie de drainage dans un fossé tertiaire avec pompage dans un fossé secondaire, sur le site expérimental de Saint Laurent de la Prée (photo prise le 27/04/2018)

Le drainage par drains enterrés, complété ou non par des techniques associées, a l'inconvénient d'imposer un pompage. Il est coûteux et présente techniquement un certain risque de mauvais fonctionnement (colmatage, problème de circulation de l'eau jusqu'au drain). Ceci peut se traduire par un accroissement de la marge brute inférieur à l'amortissement du drainage, ce qui rendrait le drainage économiquement non rentable. D'où la nécessité d'estimer a priori le comportement du système drainé ; c'est le rôle des études préalables au drainage.

Un système drainé par tuyaux enterrés posés sur une couche moins perméable à 1m de profondeur, crée un rabattement de nappe de forme $\frac{1}{2}$ ellipse qui se reproduit par symétrie entre chaque file de drain. En physique des sols, l'espace interdrain est considéré comme un plan de flux nul.

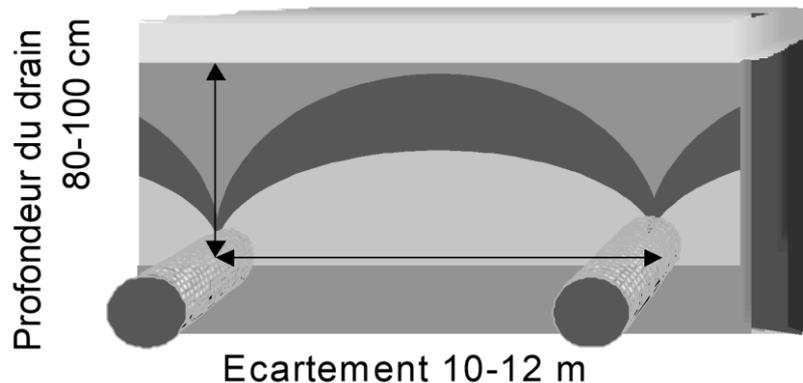


Figure 7. Représentation du drainage par tuyaux enterrés dans le cas le plus classique, en France.

Dans le cas général, le dimensionnement du réseau de drainage se base sur une pluie et un débit de projet définis comme le débit généré par une pluie annuelle de durée de 3 jours. En moyenne, les calculs aboutissent à une pluie journalière de 15mm et un débit à évacuer de 1,2L/s/ha. En considérant les propriétés intrinsèques du sol (conduction hydraulique à saturation, K_{sat} en m/j et la porosité de drainage, μ en %), et les contraintes de temps de ressuyage fixées par l'agriculteur (1 jour en grande culture), l'évacuation d'un volume d'eau excédentaire (μ de 1 à 5% de saturation) dans la partie foncée de la Figure 7, en 1 jour conduit à des écartements entre 10 et 20 m, avec une moyenne à 12m pour le cas général.

3. Bilan « définition »

En considérant les définitions du drainage, les deux techniques par planches / rigoles ou par tuyaux enterrés appartiennent à la terminologie du drainage agricole. Ces deux techniques ont les mêmes objectifs de contrôle des excès d'eau et de la saturation du profil de sol afin de réduire les impacts agronomiques sur la culture en place. Les moyens d'atteindre ces objectifs sont différents, avec des conséquences environnementales qui seront décrites dans la suite de la synthèse. Cependant, il faut considérer le drainage de surface comme un drainage au même titre que le drainage souterrain. Ainsi le changement de technique de surface à souterrain ne doit pas être considéré comme un objectif différent mais bien similaire, la parcelle devant être considérée comme drainée dans les 2 cas.

III. Evaluation des modifications pédologiques du passage de drainage de surface à drainage souterrain

4. Dans le cas général

Des travaux récents ont porté sur les modifications anthropiques dues par exemple au drainage sur l'évolution pédogénétique des sols. Montagne et al. (2009) confirme que le drainage réduit l'érosion des sols en limitant le ruissellement de surface (perte de sol) mais augmente les processus de lessivage

(au sens pédologique du terme : entraînement de particule liée à l'action de l'eau) et l'éluviation autour du drain et limité à ce volume autour du drain. En résumé, ce qui est gagné d'un côté, et partiellement perdu de l'autre, mais pas dans les mêmes proportions. Les auteurs soulignent que le drainage d'un profil de sol accélère des évolutions pédologiques qui auraient lieu naturellement dans un temps beaucoup plus long. En gérant les hauteurs de nappe et en restaurant l'infiltration de l'eau dans le profil, le drainage diminue favorablement les pertes érosives en surface (maintenant donc le carbone), mais augmente les processus d'éluviation notamment des éléments argileux vers la profondeur. Le drainage modifie aussi temporairement le potentiel rédox à l'origine des processus de spéciation des ions ferriques et manganèse, donc par conséquent impliquant des modifications géochimiques d'un niveau équivalent au profil de sol à proximité d'un fossé ou une rivière drainant une zone riparienne.

Ces processus ont été observés expérimentalement et principalement au droit du drain (sur une largeur de 1m), laissant supposer que pour le reste du profil drain interdrain (d'une largeur de 14m), il n'y a pas d'évolution structurale. Montagne et al. (2009) mentionnent aussi que la pose du drain, finalement, améliore la structure du sol en favorisant l'aération qui influence positivement la capacité de stockage en eau et la vie biologique. En effet, les auteurs rapportent qu'une augmentation de population de vers de terre a été observée au dessus du drain, comparativement à une parcelle équivalente non drainée. Une augmentation de la porosité et surtout de la macroporosité a ainsi été observée, ce qui tendrait à dire que le service de stockage d'eau est amélioré (mais avec des conséquences sur le transfert de soluté, cf §V). Frison et al. (2009) sur luvisol hydromorphe, montre une évolution des propriétés de rétention en eau du sol proche du drain (colonne de sol au dessus du drain), et conclut à une évolution plus rapide des débits de drainage. Les gammes d'exportation de matière en suspension étant inférieure en sortie de drainage qu'en ruissellement, il n'y a pas un appauvrissement d'éléments minéraux du profil de sol drainé.

Sur le sujet de l'évolution du sol, le drainage amplifie les processus d'éluviation naturelle notamment de la fraction argileuse et des colloïdes riche en éléments ferriques et manganèse. Montagne et al. (2013 (a et b)) montrent que 16 années après la mise en place d'un drainage, les pertes en masse ne dépassaient pas 5% (avec les erreurs métrologiques) comparativement entre drain et interdrain. Cependant les auteurs soulignent qu'il est difficile de montrer quantitativement l'impact sur les propriétés intrinsèques du sol due à la présence du drain. L'amélioration des propriétés hydrodynamiques, de la circulation de l'eau et des changements redox en sol drainé sont soulignées comme étant des améliorations des sols hydromorphes (Mastrocicco et al 2013).

5. Dans le cas des sols de marais

Les sols de marais ont la particularité de s'être formés à partir de consolidation et de maturation de sédiments marins ou fluviatiles. Ce sont des sols essentiellement argileux dont l'évolution verticale de structure suit les variations verticales de teneurs en eau : état solide en surface (0-60cm), état plastique intermédiaire (60-150cm) à état « pseudo liquide » en profondeur (>150cm). Ces évolutions verticales de structure sont essentiellement dues aux caractéristiques argileuses du sol soumis aux cycles humidification / dessiccation saisonniers. Ces derniers entraînent retrait, fissuration et consolidation de surface, dus à la gestion hydraulique du XIème siècle et pouvant être accentués par les pratiques culturales et la gestion hydrique récente (drainage de surface ou souterrain) (Bernard et al., 2004). Les secteurs drainés se situent principalement dans la zone de marais doux argileux desséchés. Les sols sont formés de sédiments fluvio-marins, appelés Bri. Leurs caractères texturaux et minéralogiques varient peu montrant une relative homogénéité : plus de 95% d'éléments fins (argile et limon), et entre 50 et 60% d'argile (gonflantes illite et montmorillonite). Un gradient de sodicité et de salinité est observable selon la profondeur du sol. Les marais sont souvent sodiques et salés ce qui leur

confère une instabilité structurale, compacte et imperméable, ils présentent une forte aptitude à la fissuration du sol (fente de retrait) lors des phases de dessiccation.



Figure 8. Fente de retrait sur un sol drainé de Saint Laurent de la Pré (site expérimental INRA, photo prise le 27/04/2018)

Si la texture du Bri est relativement homogène sur ces territoires, à l'échelle des profils verticaux étudiés deux niveaux ont été différenciés (Tableau 1):

- l'horizon de surface appauvri en argile (5 - 12.5% de fraction > 2 μm et 75 - 90% de fraction 2 – 80 μm). Celui-ci est limité à 30cm de profondeur.
- les niveaux profonds, sous 30 cm de profondeur, plus riches en argile (40 - 60% de fraction > 2 μm) et plus pauvres en limons (30-50% de fraction 2 - 80 μm).

		Argiles	Limons	Sables			CaCO3	Matière organique	nb échant. MO/A*100 > 7
		%	%	très fins %	fins %	grossiers %	%	%	
Horizons (cm)									
0-30	m	56.8	28.3	7.8	2.3	1.3	5.4	5.2	13/28 = 46%
	et	4.9	10.9	10.6	1.8	1.2	5.2	3.1	
	n	27	27	27	27	27	27	27	
30-60	m	56.8	35.0	3.8	2.0	1.5	7.2	1.7	1/20 = 5%
	et	4.6	7.2	3.2	1.7	1.4	5.4	1	
	n	19	19	19	19	19	19	19	
60-90	m	57.0	37.3	3.4	1.7	1.5	6.3	0.92	0/19 = 0%
	et	6.3	8.4	2.8	1.9	1.6	4.3	0.25	
	n	18	18	18	18	18	18	18	
Ensemble	m	56.8	32.9	5.3	2.0	1.4	6.2	3	17/67 = 25%
	et	5.3	10.0	7.4	1.8	1.4	5	2.9	
	n	64	64	64	64	64	64	64	

Tableau 1. Granulométrie, taux de calcaire et de matière organique des sols des marais de l'Ouest, marais desséchés, ensemble bris récent, intermédiaire, ancien (m, et, n : moyenne, écart type, nombre d'échantillons ; tiré de Pons 1997).

L'université de Poitiers a investigué la pédologie des sols de marais drainés et non drainés, sans forcément caractérisé les sols drainés par aménagement de surface. Les argiles sont à dominante illite, kaolinite et smectite. La comparaison de 2 parcelles de Saint Laurent de la Pré conduites soit en grande culture, drainée P1, soit en prairie non drainée P2 ne permet pas de différencier la texture selon la présence du drainage (Tableau 2). Seul le taux de matière organique diffère, comme il le serait en situation de sol non hydromorphe.

Référence	Depth	Grain-size			Organic matter /%	CEC /cmol _c kg ⁻¹	CaCO ₃ /%
		< 2 μm	2-20 μm /%	> 20 μm			
Morizet <i>et al.</i> (1970)		52-55	35-39	3-4	0.9-2.4	23-35	1-8
P1	83 cm	54.1	37.6	5.6	0.5	24.0	7.2
	100 cm	57.5	37.0	4.6	0.6	21.0	7.7
	200 cm	39.6	53.6	4.6	0.7	21.8	ND
P2	70 cm	42.3	51.4	5.1	0.4	23.0	ND
	120 cm	51.1	41.2	4.3	1.9	21.8	ND
	175 cm	52.3	34.3	5.2	0.7	22.8	ND

Tableau 2. Granulométrie, taux de matière organique, CEC, teneur en carbonate pour une parcelle cultivée drainée P1 et une parcelle en prairie non drainée P2 (tiré de Bernard *et al.*, 2007)

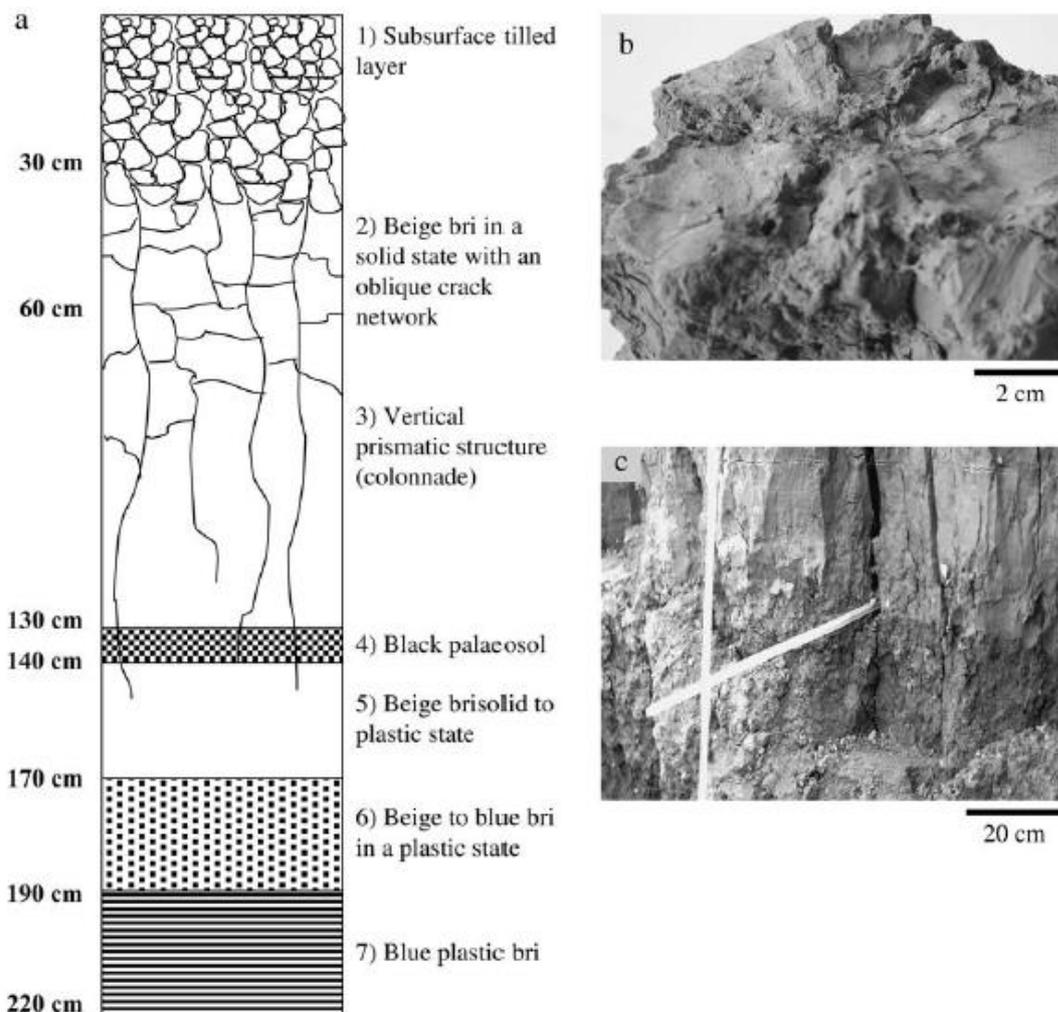


Figure 9. a) Description pédologique d'un profil de sol drainé P1 b) structure prismatique d'un bri consolidé par les cycles de retrait-gonflement des argiles ; c) exemple de contact entre le bri beige et le paléosol noir organique. (site de Saint Laurent de la Pré, extrait de Bernard *et al.*, 2007)

Ces sols à texture homogène (éléments fins > 90 %) ont des comportements hydrauliques bien différents (Colas 1983). Il résulte de l'expérience de l'équipe du domaine de St-Laurent-de-la-Prée que les différences constatées entre les parcelles sont essentiellement liées à une différence structurale, c'est-à-dire d'agencement des diverses unités structurales dans la masse du sol (Figure 9). La stabilité structurale de l'ensemble du profil sera une propriété déterminante dans la classification des sols. Or, la stabilité structurale d'une argile est très dépendante du taux de sodium relativement à la capacité d'échange cationique : l'ion sodium a une action dispersante ; l'ion calcium a une action stabilisatrice. C'est pourquoi, il est important de connaître, pour un sol, le réservoir potentiel d'ion calcium (calcaire total) et le réservoir potentiel de sodium (salinité de la nappe essentiellement due au sel - NaCl marin). La matière organique joue d'autre part un rôle stabilisateur. En conséquence, le taux de calcaire total, la salinité de la nappe, le taux de matières organiques sont autant d'indicateurs, simples à déterminer sur le terrain ou en laboratoire, qui permettent, pour un praticien, d'apprécier la stabilité structurale du terrain. Pons (1997) a alors développé à partir de travaux de recherche de Damour et al., 1984, Pons et Gerbaud (2005) un indice de dispersion traduisant la stabilité texturale à l'aide de mesure simple. Les variables de la structure des sols de marais sont : Na/T, salinité, CaCO₃, MO, pH et ID. Ces familles peuvent être comparées entre elles en terme de conditions de formation et d'évolution du matériau c'est-à-dire de trajectoires d'évolution. Ainsi un taux de calcaire >5%, une sodicité <15% (évaluée par le rapport du taux de sodium échangeable Na_e à la capacité d'échange cationique CEC) contribuent à une stabilité structurale satisfaisante et donc à un fonctionnement durable du sol et par conséquent du profil de sol en condition drainage artificiel. Une dégradation de la macroporosité structurale est favorisée sous l'action des précipitations hivernale, du tassement par les outils agricoles. L'instabilité de la structure des sols sodiques est fortement liée à la présence de sodium échangeable ou sodicité, mais aussi la teneur en calcaire et matière organique (Pons et Gerbaud, 2005). Les agriculteurs ont recours alors à des amendements calcaire et gypse.

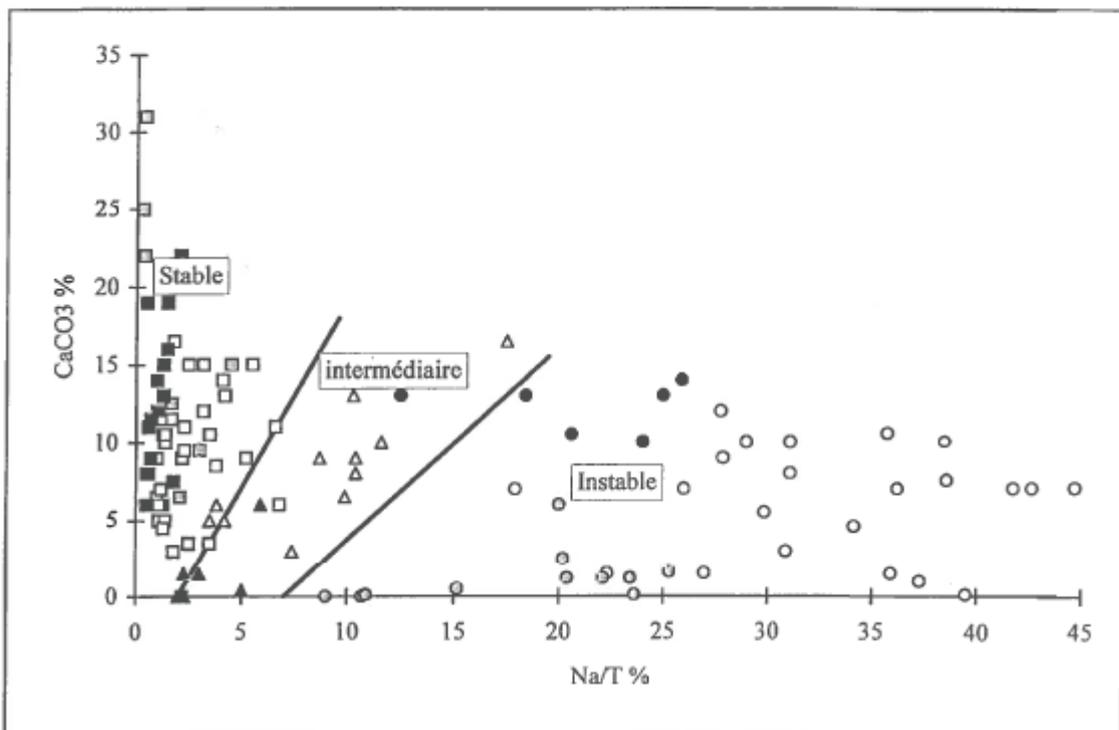


Figure 10. Familles et types de comportement des sols de marais de l'Ouest en fonction de Na/T, CaCO₃, ID. Familles instables 1,2,3' (ronds clairs, gris et noirs) ; familles intermédiaires 3,4 (triangles clairs, noirs) ; familles stables 5,6,7 (carré blanc, gris, noirs) (extrait de Pons 1997)

L'équivalence dans les évolutions minéralogiques et texturales entre le sol sous prairie et le sol cultivé se retrouve sur tout le territoire du marais, quelle que soit la gestion hydraulique du marais (Radimy et al., 2013). La principale différence s'observe sur la profondeur atteinte par le front de dessiccation en parcelle drainée (surface ou souterrain), liée à 3 principales causes : 1) les pratiques agricoles dont le travail du sol ; 2) la prospection racinaire plus profonde dans le cas de culture (céréale ou maïs), 3) dans le contrôle du niveau de la nappe par drainage. Un système en prairie permanente non drainée, du fait d'une circulation de l'eau déficiente, n'entraînera pas d'évolution du profil de sol. Sous l'action de l'activité agricole à l'échelle du marais desséché ou à l'échelle de la parcelle, le profil de sol subira une évolution aussi bien en parcelle de production que celle en utilisation de l'herbe.

Les mécanismes d'évolution commun pour tous les sols de marais sont les échanges chimiques et les phénomènes de gonflement/retrait. L'agent d'évolution des sols est l'eau. Le comportement du profil de sol est l'expression des mécanismes d'évolution mis en action par l'eau (variation de l'état hydrique) et la circulation de l'eau (échange chimique) (Pons, 1997). En reprenant l'exemple des parcelles P1 et P2 de Saint Laurent de la Prée, Bernard et al., (2007) note un comportement similaire des argiles (fentes) sur les 2 sols, aucune différence notable de la microporosité mais la mésoporosité est influencée par la profondeur du front de dessiccation plus prononcé dans P1 (travail du sol + drainage rabattement de nappe). Pour Mathé et al. (2007) l'approfondissement du front de dessiccation en parcelle drainée favorise l'aération du profil de sol, et par conséquent l'oxydation notamment du fer et l'évolution des illites. Les auteurs montrent ainsi qu'au droit du drain (limité à la colonne de sol au dessus du drain), ce front était abaissé de 0,30m à 0,50m (soit 20cm). Aucun changement n'a été observé dans les autres profils en dehors du drain. Dans un autre contexte, Dent et al. (1976) en Norvège, avance que le front de dessiccation (fente de retrait) favorise le transfert vertical de la matière organique pouvant appauvrir si rien n'est fait, le taux de matière organique dans les horizons de surface. Radimy et al. (2013) soulignent l'effet du labour de la couche 0-30cm dans la structure de la macroporosité qui est équivalente entre un sol drainé par technique de surface ou souterrain. Ainsi, si la macroporosité de surface diffère d'un paleosol en prairie d'un paleosol cultivé, elle ne diffère pas entre un paléosol cultivé drainé en surface et un paléosol cultivé drainé en souterrain. Les sols stables définis par Pons, ne sont pas modifiés par la présence du drainage. Pour les sols instables, l'ajout de calcium qui n'est pas systématique, a pour effet de renforcer la stabilité structurale des sols et donc par conséquent, transforme définitivement, non pas la texture des argiles, mais leur structure. Et cela s'applique pour la conversion d'un sol d'une parcelle en prairie en parcelle cultivée. Cela ne s'applique pas pour le cas d'un changement de technique de drainage entre de surface et souterrain, puisqu'il a déjà été effectué pour les sols instables ayant reçu des apports de calcium, cette transformation structurelle (Pons 1997).

Influence sur la salinité : le fait de drainer en souterrain contribue à contrôler le niveau de salinité du profil et limite les remontées salines vers la surface (moins marquée dans le cas d'un drainage de surface). L'augmentation des écoulements verticaux de l'eau de pluie par le réseau de fissures-fracturation (front de dessiccation) favorise la désalinisation des horizons de surface (Radimy et al. 2013). Désaturation et désalinisation ont été les principaux objectifs de opérations historiques de drainage depuis le moyen âge jusqu'à nos jours. Radimy et al. (2017) montrent que le profil de salinité est différent dans les horizons de surface entre parcelles drainée cultivée et non drainée en prairie, mais identique dans les horizons profonds (>0,70m). Collas (1985) indique qu'un sol peu sodique à sa formation pourra évoluer vers un sol non sodique car le processus de lessivage dessodification pourra être enclenché, et bénéfique pour l'agronomie. A l'inverse un sol très sodique et dispersant au départ n'évoluera pas.

Colas et Pons (1980) ont suivi la variabilité de la conductivité électrique avec les débits drainés de plusieurs parcelles. Les auteurs montrent que lors des phases de tarissements de nappe, la conductivité électrique représentait celle du sous sol, et lors des phases de débit de point consécutives aux pluies, la dilution était prononcée, témoin d'un horizon de surface appauvri en sel. Les auteurs ne mettent pas en évidence de différences dans les suivis de conductivité électrique entre une parcelle drainée par tuyau enterré et une parcelle drainée par rigole.

6. Bilan « pédologique »

Huet et Martin, 2003, mentionne que « le drainage du marais asséché est une opération irréversible en ce qu'il transforme définitivement la texture de l'argile des sols. » Cette phrase est à nuancer sur 2 points : c'est le fait d'apporter du calcium à des sols sodiques instables, dans l'objectif d'une meilleure efficacité de drainage qui génère cette irréversibilité². Dans le cas de sol instable, les apports de gypse étant recommandés pour toute activité agricole, les sols drainés en surface ou en souterrain ont été traités par la même technique, la conversion n'entraînant pas conséquent aucune modification pédologique. En revanche dans le cas de sol stable, aucune évolution structurale n'a été notée de façon significative, le drainage gère la sodicité des eaux et évacue les excédents de sel qui limitent les rendements. Le transfert hydrique accélère les processus naturels de lessivage et éluviation des éléments fins sans toutefois modifier la texture, augmentant la porosité dans le profil de sol au droit du drain. Aucune différenciation n'a été observée en dehors de la zone du drain. Damour et al. (1977) précise que le travail du sol et les pratiques culturales ont un impact supérieur sur la structure du sol que la pose et la présence d'un réseau de drainage, dont les faibles impacts sur la structure du sol sont limités spatialement à la zone au dessus du drain.

IV. Impact hydrologique parcellaire : drainage de surface vs drainage souterrain

Nous présentons cette partie hydrologique en 3 points : un cadre général introduisant l'hydraulique du drainage agricole, des éléments chiffrés sur l'hydrologie et enfin le comportement hydraulique et hydrologique en marais.

7. Hydraulique du drainage agricole

Zimmer (1990) propose une typologie de fonctionnement hydraulique des sols hydromorphes drainés. En résumé, le contrôle de la hauteur de nappe perchée se fait selon 2 configurations (Figure 11) :

- Le cas général pour 80% des sols drainés en France, notamment les sols limoneux (luvisol, Arrou), tout le profil de sol entre le drain et l'interdrain participe aux écoulements au drain. Avec une intensité différente selon l'évènement pluvieux, l'eau au dessus du drain et l'eau de la matrice poreuse saturée contribuent aux débits de drainage. Le rabattement de la nappe suit une forme approximativement constante de $\frac{1}{2}$ ellipse (coefficient de forme de nappe introduit par Zimmer 1990). Pendant les débits de pointe, la nappe est légèrement gonflée au dessus du drain, traduisant un effet hydraulique (augmentation du gradient hydraulique) de la présence du drain. Dans ce schéma, les écoulements sont essentiellement horizontaux dans la nappe perchée et verticaux au dessus : l'hypothèse de Dupuit-Forchheimer y est donc valide. Il est caractéristique de sol relativement perméables à faiblement perméables.
- Pour les 20% restant, notamment les sols argileux gonflants, les écoulements sont préférentiellement limités à la couche de labour et sont évacués en traversant la tranchée de drainage jusqu'au drain. Le profil de sol drain interdrain est saturé. Une forme de nappe s'installe cependant dans la couche labourée et le sol fonctionne hydrauliquement comme si un drain était posé à la profondeur du labour (30cm). En période hivernale, très humide, les

² Rappelons que le drainage est aussi une technique fortement utilisée dans les périmètres irrigués – drainés du Maghreb pour gérer la salinité des sols, et préserver la ressource en eau.

sols argileux type argile gonflante (Courcival) propose un fonctionnement hydrologique influencé principalement par la tranchée de drainage. Dans ce cas, la zone d'influence du drain est réduite latéralement à quelques dizaines de centimètres à l'aplomb du drain. Cependant, au printemps, alors que l'évapotranspiration augmente, le schéma d'écoulement de type argile gonflante laisse progressivement la place au schéma de type Luvisol.

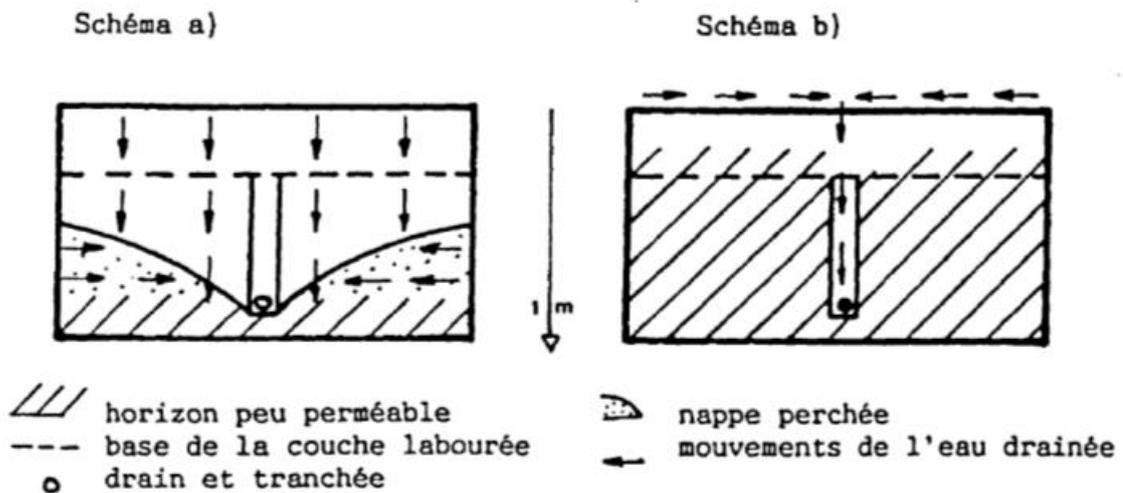


Figure 11. Typologie des écoulements de drainage dans le contexte français (extrait de Arlot et Zimmer 1990) a) schéma de type Arrou sur luvisol b) schéma de type Courcival sur sol argileux gonflant.

A partir des observations de terrain, l'Irstea, dans ses formations et enseignement, a synthétisé l'impact du drainage à la parcelle en 3 points :

- Intensité de drainage
 - Avec des drains moins espacés et plus profond on augmente la capacité de stockage de l'eau dans le sol
 - On diminue d'autant la distance de transfert de l'eau vers les drains
 - En général on considère que pour une forte intensité de drainage les débits de pointe augmentent
- Capacité de stockage du sol
 - Si l'on considère que le drainage augmente la capacité de stockage de l'eau dans le sol, les débits de pointe ne seront atténués que dans les cas où la quantité de pluie d'un événement hydrologique particulier ne dépasse pas la capacité de stockage dans le sol
 - Dès que le sol est saturé, le drainage en général n'a que peu d'influence puisque l'excès d'eau ruisselle à la surface comme sur une parcelle non drainée, même si l'infiltration se poursuit, mais à une vitesse très réduite.
- Intensité de la pluie
 - A très forte intensité, l'effet du drainage sera minime dans la mesure où l'intensité pluviométrique dépassera la capacité d'infiltration du sol

Le drainage des parcelles en marais, se fait superficiellement par rigoles (-0,50 / -0,60m) ou plus profondément par drains (-0,80 à -1,20m). Malgré un taux d'argile important, Zimmer (1990) rapproche le comportement hydrologique des parcelles drainées de Saint Laurent de la Pré au schéma classique de sol drainé de type luvisol (expérimentation de Arrou). L'auteur ajoute que ce comportement classique s'observe sur certains sols argileux comme « sur les champs de Saint Laurent de la Pré, situé dans un marais côtier ». Dans les sols non stabilisés, ce sera le comportement de sol argileux comme Courcival qui s'applique dans le cas du marais Poitevin.

Dans le schéma de fonctionnement hydraulique présenté par Pons (1997, Figure 12), la parcelle drainée en surface ou en souterrain ont des chemins d'écoulement similaire, selon la stabilité du sol et dans les 2 cas, le drain ou la rigole joue le même rôle de collecteur des eaux à évacuer. Dans le cas d'un sol stable drainé par tuyaux enterrés, l'ensemble du profil contribue à faire transiter l'eau, rallongeant ainsi son temps de transfert. Alors que pour les sols instables ou drainé par rigole, seule une fraction superficielle du profil de sol intervient dans les écoulements, accentuant la nervosité hydraulique du système drainé (réponse plus rapide aux écoulements de pointe).

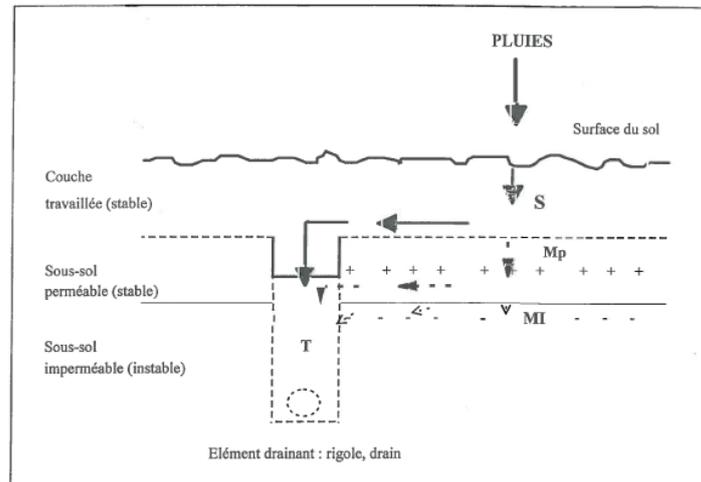


Figure 12. Circulation de l'eau en sol de marais saturé et drainé. S, M, T : circulation de l'eau dans la couche remaniée, dans le sous-sol et dans la tranchée de drainage. Rigole en trait plein, drain en trait tiret. (source Pons, 1997)

Pons (1988) a observé (Figure 13), sur les parcelles de Saint Laurent de la Prée, une différence de contrôle de la nappe selon la stabilité du sol : une hauteur moyenne en dessous de 0,65m pour les sols stables, entre 0,45 et 0,60m pour les sols intermédiaires et entre 0,10 et 0,35m pour les sols instables. Dans le cas du drainage par rigole, une tendance similaire a été observée, soit : 0,50m pour les sols stables, entre 0,25 et 0,55m pour les sols intermédiaires et entre 0,10 et 0,45m pour les sols instables. Cela montre qu'intrinsèquement, le changement de mode de drainage (d'un drainage de surface à un drainage souterrain) ne modifie pas le fonctionnement hydrologique du sol. La différence de niveau de nappe de quelques centimètres entre les 2 modes de drainage, peut entraîner une différence de lame d'eau drainée cumulée de quelques millimètres par an. Le volume de sol exploré par les écoulements (couche de labour ou profil dans son ensemble) jouera sur la nervosité du système drainé et sa réponse hydrologique sur les débits de pointe.

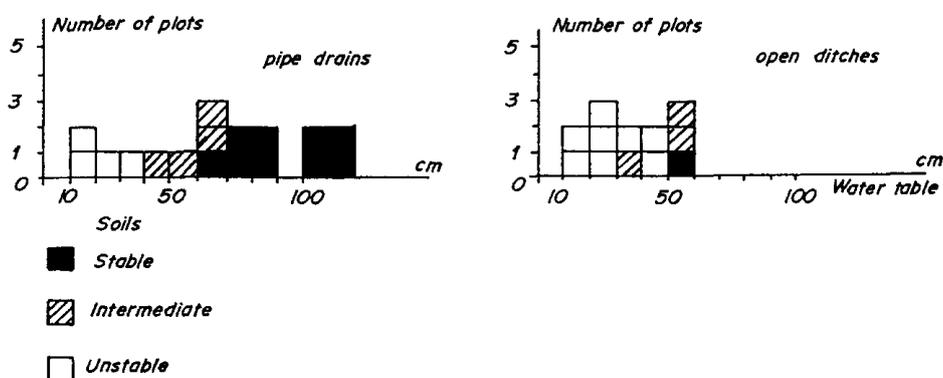


Figure 13. Histogramme des profondeurs de nappe observée entre 1980 et 1982 sur le parcellaire expérimental de Saint Laurent de la Prée (domaine INRA) (tiré de Pons 1988).

8. Comparaison des flux hydrologiques

Au-delà de son intérêt agronomique, le drainage agricole souterrain influence sensiblement la réponse hydrologique des bassins versants concernés. En contexte français, dont la présence du drainage se situe plutôt dans la partie Nord, le solde climatique P-ETP (précipitations et évapotranspiration potentielle) sur la période hivernale (décembre à mars) conduit à générer des écoulements annuels moyens de 180mm par an, avec un fonctionnement hydrologique saisonnier : amorce du drainage entre novembre et décembre (10 à 20mm) ; saison de drainage intense de décembre à mars, période pendant laquelle, due à une évapotranspiration faible, toute pluie génère un débit de drainage (150 mm) ; et enfin des écoulements sporadiques du printemps de avril à juin (10 à 20 mm).

Les écoulements de drainage se caractérisent par une montée des débits pour atteindre un débit de pointe lors d'un évènement pluvieux en saison de drainage intense et suivi une phase de tarissement non influencé (Figure 14). Le débit de dimensionnement est en général de 1,2 L/s/ha, mais les débits de pointe peuvent atteindre ponctuellement 2-3 L/s/ha selon l'intensité de pluie et la connexion avec le réseau aval (autolimitation des débits de drainage par contrôle aval dans le cas où le collecteur est mis en charge cf Hénine et al. 2012 ou Sloan et al., 2017 pour les impacts hydrologiques du drainage sur les crues) ou dans le cas du marais, par le contrôle des pompes à l'aval.

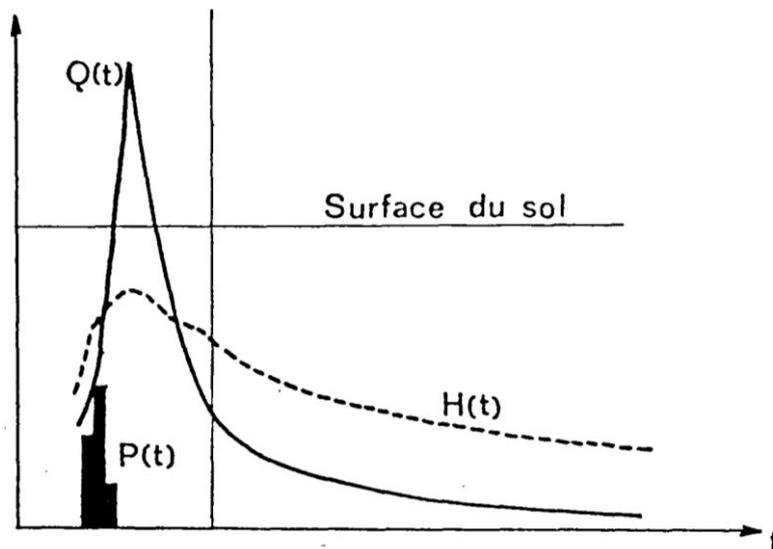


Figure 14. Réponse débitmétrique $Q(t)$ et piézométrique à l'inter-drain $H(t)$ à un évènement pluvieux hivernal simple $P(t)$ (source Lesaffre, 1991).

Il existe peu de données disponibles pour comparer ruissellement de surface et drainage d'un côté, et drainage superficiel et souterrain de l'autre. Dans un contexte de luvisol, le site expérimental de drainage de La Jaillière (47° 27' N, 0° 57' O), géré par Arvalis depuis 1987, fournit un jeu de données exploitable le plus complet en France.

Le site de La Jaillière bénéficie d'une pluviométrie moyenne annuelle de 709mm, d'une évapotranspiration potentielle de 738 mm et une lame drainée de 210 mm sur la période 1988-2011 (Dairon et al., 2017). Le système expérimental mis en place en 1987 et toujours suivi actuellement permet de comparer différentes techniques agronomiques (parcelle hydromorphe non drainée, et drainée, technique avec labour et sans labour, rotation courte, longue, ...). Les parcelles T1 et T3 sont ainsi intéressantes à comparer sur le fonctionnement hydrologique, dans un même contexte pédoclimatique. La parcelle T1 est non drainée munie d'un système d'interception du ruissellement permet de quantifier les flux ruisselant. La parcelle T3 adjacente est drainée par tuyau enterré à 90cm de profondeur et d'écartement 10m. Le drain est positionné sur un horizon moins perméable constitué

d'une altérite de schiste. La Figure 15 compare les flux annuels drainés et ruisselés dans les 2 parcelles. Il ressort que le drainage réduit de 90% le ruissellement de surface, et augmente de 14% le flux d'eau ruisselant vs drainé. Le ruissellement est considéré principalement comme un ruissellement de saturation (refus d'infiltration lié à la saturation du profil de sol). Le drainage, en restaurant l'infiltration, diminue le ruissellement de surface de 90% mais augmente le volume infiltré dans le profil de sol, correspondant à la variable nommée porosité de drainage qui est de l'ordre de 1% de la porosité totale du sol. En dynamique, la succession des régimes d'infiltration tarissement génère donc un surplus de 14% soit pour le cas de la Jaillière de 28mm par an en plus.

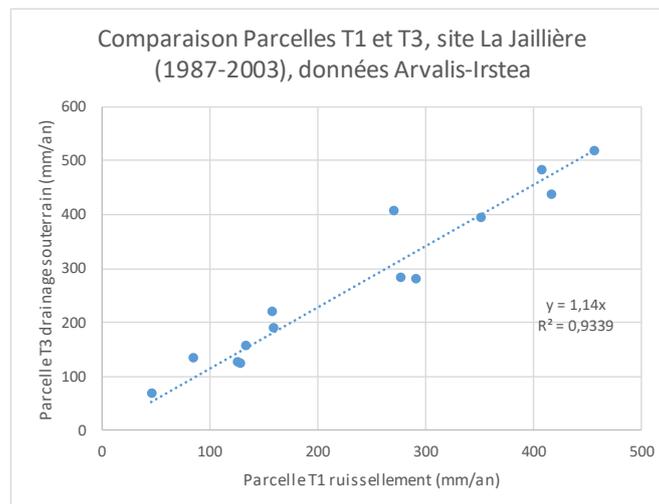


Figure 15. Comparaison des lames d'eau ruisselée (parcelle T1) et lame d'eau drainé + ruisselé (parcelle T3) du site de La Jaillière sur la période 1987-1999 (données ITCF Cemagref)

9. Comportement hydrologique d'une parcelle drainée en contexte de marais

Le schéma hydraulique différencie les 2 types d'écoulement en nappe perchée :

- Classique par l'ensemble du massif poral du profil de sol (forme de nappe elliptique) pour les sols de Bri présentant une stabilité structurale
- Superficiel dans l'horizon de surface, par transfert dans la tranchée de drainage pour les sols instables (se rapprochant d'un drainage de surface par rigole).

Steyaert et al., (1995) introduisent un schéma hydrologique du fonctionnement du drainage en sol lourd argileux pour lequel les techniques classiques de drainage s'appliquent. Des précautions sont cependant à prendre pour tenir compte des spécificités des teneurs en sodium, calcium et taux de matière organique. Collas (1985) présente la saisonnalité des sols hydromorphes drainés en marais (Figure 16), qui est similaire aux autres parcelles drainés dans le cas de luvisol (Hénine et al. 2012). Nous reconnaissons la phase de réhumectation du profil de sol nécessitant environ 150mm de pluviométrie nette que nous nommons amorce du drainage ; à partir d'un état de saturation hydrique du profil de sol, la phase de saturation ou saison de drainage intense pendant laquelle, l'ETP étant faible, toute pluie, sur un sol saturé, se transforme en débit ; enfin une phase de dessèchement caractérisée par une ETP qui devient majoritaire et par l'effet du prélèvement hydrique par la végétation desséchant le profil de sol³. Sur le site de Saint Laurent de la Prée, où le régime «débit fort» se maintient durant un temps assez long, tout se passe comme si l'eau de pluie s'accumulait dans l'horizon travaillé et les horizons sous-jacents (jusqu'à l'horizon compacté), en provoquant leur saturation. Cette nappe perchée est évacuée pendant un temps un peu plus long car la profondeur

³ précisons bien que ce n'est pas le drainage qui dessèche le profil de sol, mais la végétation

intéressée est plus importante. Le phénomène de décrue se retrouve plus de douze heures après la pluie.

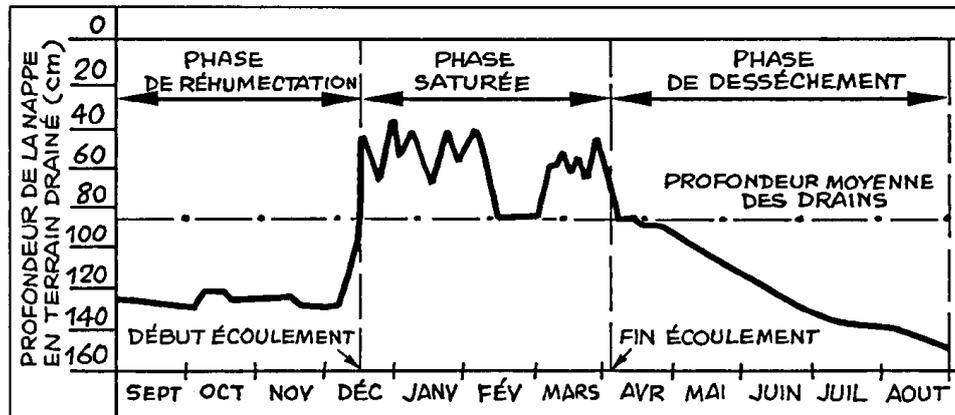


Figure 16. Evolution de la nappe d'eau d'un sol drainé (Saint Laurent de la Prée 1979-1980) (source Collas 1985)

Le site expérimental qui a fait l'objet de nombreuses recherches scientifiques est le site de l'INRA à la station de Saint Laurent de la Prée. Le site a été équipé de stations de mesure de débit dans les années 1970 par les équipes du Cemagref. Nous disposons donc de chroniques de débit sur plusieurs années hydrologiques qui vont nous permettre de valider le comportement hydrologique de ces parcelles drainées par tuyaux enterrés, par confrontation avec l'approche de simulation du drainage de SIDRA-RU (modèle développé par Cemagref-Irstea, Lesaffre 1991). Le modèle SIDRA est un modèle à base physique qui résout par changement de variable l'équation des écoulements en milieu saturé de Boussinesq. Des hypothèses sont nécessaires sur l'application de Dupuit Forseimer, la forme de nappe constante. L'intégration de l'équation aboutit à une équation simple analytique dans laquelle on reconnaît le terme de Hooghoudt et un terme lié au débit de pointe.

$$Q = AK \frac{H^2}{L^2} + (1 - A)R(t)$$

Q le débit au pas de temps t , A le coefficient de forme de nappe ($=0,87$), H la hauteur de nappe, L le demi écartement, $R(t)$ la recharge nette issue de P -ETP ou du module RU selon la version.

Le module couplé RU permet de prendre en compte la partie non saturée par analogie avec la réserve utile. La particularité du modèle SIDRA-RU est sa simplicité, sa robustesse et son recours à peu de paramètres d'entrée (K_{sat} , μ , S_{max} , Sinter).

Le modèle SIDRA-RU a été appliqué à une parcelle de Saint Laurent de la Prée et les résultats de simulation comparative (simulation et observation) sont présentés en Figure 18. Les paramètres du modèle sont Ecartement des drains=20m, profondeur du drain 0,90m, $K_{sat} = 1,1m/j$, Porosité de drainage 5,4% (valeurs cohérentes avec les données mesurées par la méthode de référence d'essai de pompage Guyon, Collas 1983), seuil de saison de drainage intense (équivalent à la RU)=145mm (valeur cohérente de celles proposées par Radimy et al 2013). Avec un critère de performance Nash moyen supérieur à 0,5⁴ et malgré la teneur en argile des sols des marais supérieure à 50%, le modèle reproduit bien le comportement hydrologique de la parcelle de marais du site expérimental de Saint Laurent de

⁴ critère de Nash classiquement utilisé en hydrologie pour évaluer la performance d'un modèle, la valeur maximale est 1, une valeur négative démontre l'incapacité du modèle à reproduire les observations, une valeur supérieure à 0,5 montre un comportement très satisfaisant du modèle

la Pré, ce la valide le comportement par nappe du drainage tel que vue précédemment (schéma de type Arrou Luvisol représentatif de 80% des sols drainés). Les simulations confirment aussi que l'infiltration sous drain, reste faible voire négligeable du fait de la présence d'une couche pédologique moins perméable, responsable de l'engorgement temporaire du profil de sol.



Figure 17. Expérimentation de Saint Laurent de la Préé : point de mesure des débits (site INRA, photo prises le 27/04/2018)

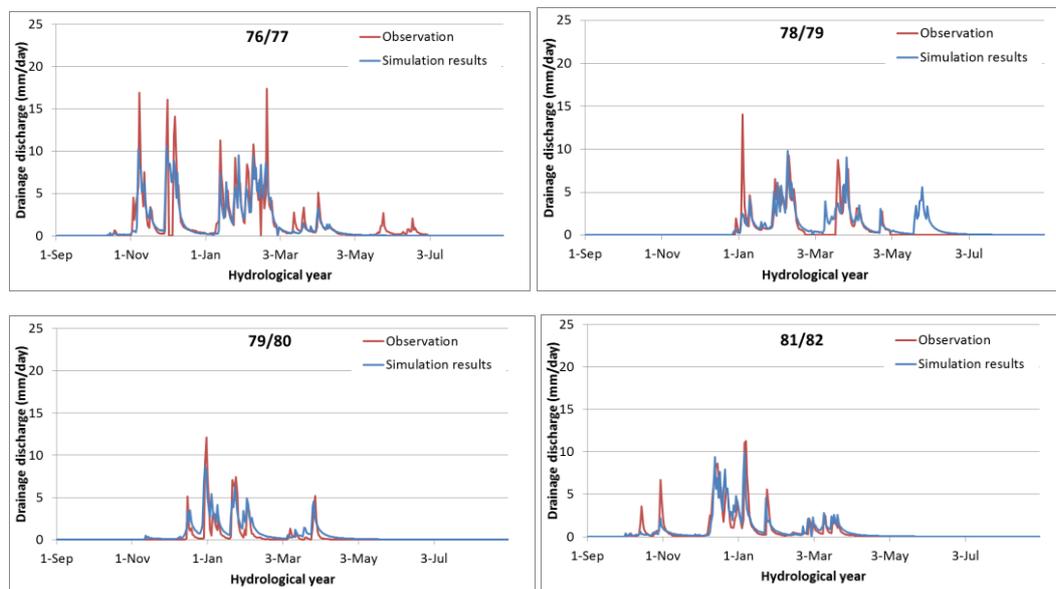


Figure 18. Débit de drainage par tuyaux enterrés par simulation SIDRA-RU et observation du site expérimental de Saint Laurent de la Préé.

La lame d'eau de drainage moyen sur la période 1972-1987 (données débitmétriques disponibles à Irstea) s'élève à 213mm (pluie moyenne 749mm, ETP moyenne 756mm)⁵, avec une variabilité inter-annuelle liée à la pluviométrie (Figure 19).

⁵ Possibilité avec les données SAFRAN de MétéoFrance de faire les simulations sur la période 1959-2018 au besoin.

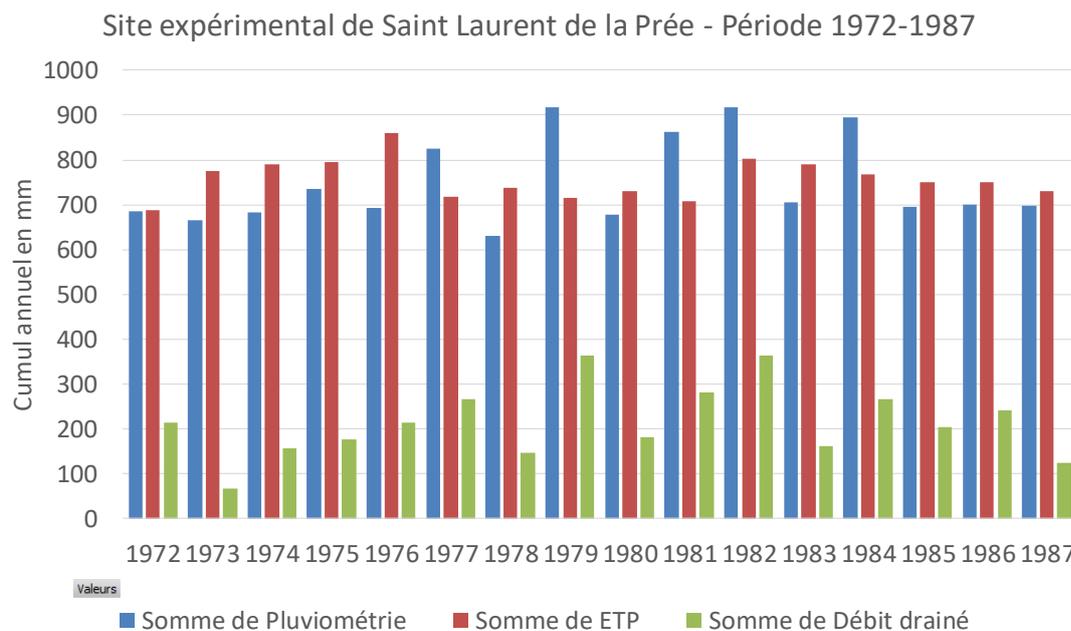


Figure 19. Termes du bilan climatique sur la période de 1972 à 1987 sur une parcelle drainée à Saint Laurent de la Prée (Pluviométrie et ETP mesurées, Débit drainé simulé par SIDRA-RU).

Dans le drainage de surface, l'évacuation rapide de l'eau est favorisée par les rigoles aménagées et les pics de crue peuvent être augmentés. Le drainage souterrain introduit un délai en favorisant l'infiltration. De plus la capacité hydraulique limitée des tuyaux de drainage peut limiter les pics de débit. Dans le cas d'un sol instable (noté Gab dans le travail de Collas, 1983), la comparaison des débits drainés sur 2 parcelles voisines (Gab rigole et Gab drain) conclut à considérer que la restitution est sensiblement identique dans les 2 cas (Figure 20).

- la rigole réagit presque immédiatement à toute pluie, quelle que soit son intensité. La réaction est d'autant plus forte que la pluie est importante. Après la pluie, le débit chute rapidement.
- la réponse du drain est très voisine de celle de la rigole. Toutefois, les petites pluies n'engendrent pas des variations notables de débits.

Les drains de la parcelle Gab ont un comportement très proche d'une rigole, c'est-à-dire que tout se passe comme si le drain était une rigole enterrée : la quasi imperméabilité des horizons situés sous la couche travaillée bloque les écoulements dans la masse; les circulations sont essentiellement «épidermiques», une forte pluie étant évacuée par l'horizon travaillé et ensuite par la tranchée de drainage.

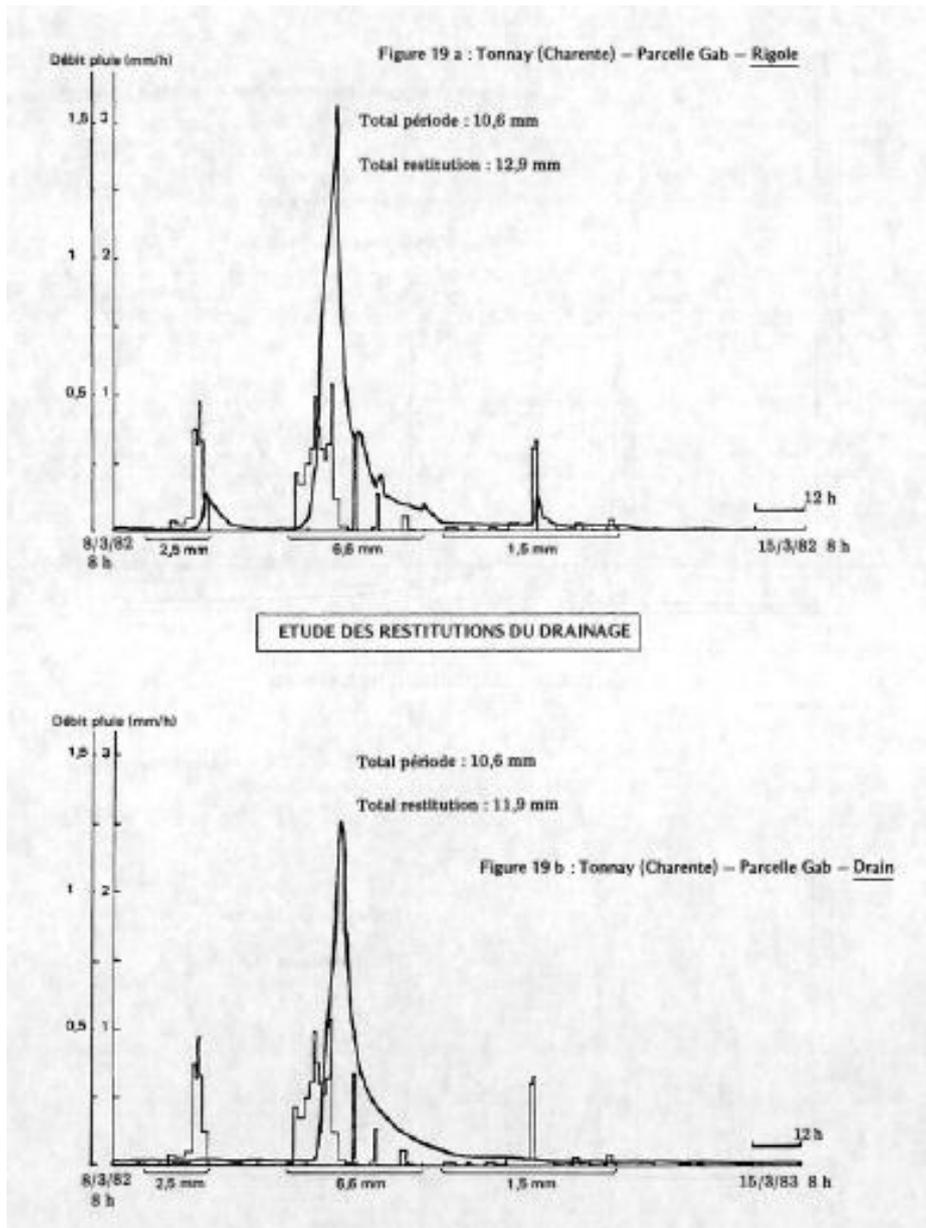


Figure 20. Comparaison des débits de drainage par rigole a) et drain b) sur sol instable en marais atlantique, de Tonnay (source Collas, 1983).

En sol stable, sur le site de Saint Laurent de la Prée, Collas et al, (1984) compare les débits de drainage par rigoles et par tuyaux enterrés. Les résultats montrent un effet seuil à 0,05 L/s/ha pour que la rigole joue son rôle, et au-delà, le débit drainé par tuyaux est égal à celui drainé par rigole (linéarité de la relation, Figure 21). Brugnot (2004) dans son rapport d'expertise, avance que le drainage de surface augmente les débits de pointe en réduisant le stockage au niveau de la microtopographie du sol. Ceci pourrait être expliqué par le profil de sol réduit traversé par l'eau évacuée comparé à un profil de sol drainé par tuyaux enterrés. Ceci se traduit par une nervosité du système accrue en drainage de surface par rapport au drainage souterrain.

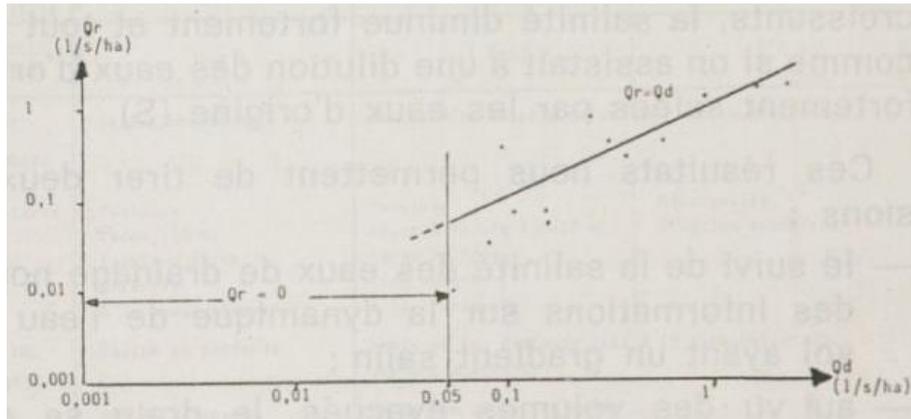


Figure 21. Relation débit de drainage par drain (Q_d écartement 15m, profondeur 1m) versus débit de drainage par rigole (Q_r écartement 15m, profondeur 0,4m) sur sol stable à Saint Laurent de la Prée (source Collas et al., 1984).

En terme de bilan hydrique annuel, à partir des éléments rassemblés précédemment, en considérant 3 étapes de calcul :

- 1) en sol limoneux de type luvisol (site de la Jaillière), la différence annuelle est de 20 à 30 mm (incluant drainage et ruissellement) par an entre une parcelle hydromorphe non drainée et une parcelle hydromorphe drainée
- 2) en sol de marais, le comportement hydrologique du drainage de surface est comparable au drainage souterrain, avec des débits de pointe supérieures en drainage de surface et un tarissement plus soutenu en drainage souterrain
- 3) le volume de profil de sol influencé par le drainage souterrain étant plus important (rigole 0,4m et drain 0.9m en moyenne), le rabattement de nappe en période tarissement sera supérieur en parcelle drainée par tuyaux enterrés (seuil de 0,05L/s/ha). La hauteur de nappe diminuant plus rapidement en parcelle drainée par tuyaux enterrés sur une profondeur de 50cm en période printanière, avec une porosité de drainage de 5.4%, le surplus de lame drainée principalement à la fin de la période hivernale, de 27mm, soit un différentiel estimé à 12% de la lame d'eau annuelle.

10. Bilan « hydrologique »

Le passage d'un drainage de surface par rigole à un drainage souterrain par tuyaux enterrés

- Sur les sols instables, n'entraîne pas de différence de comportement hydrologique ni volumétrique. La nappe peu profonde en saison de drainage intense, est peu profonde et se trouve dans la couche travaillée quels que soient le mode de drainage.
- Dans le cas de sol intermédiaire, la profondeur de nappe en saison de drainage intense, dépasse rarement 0,60m. les drains ont une efficacité légèrement supérieure à celle des rigoles.
- Sur les sols stables, contribue à diminuer les pics de débit de pointes et donc laminar les crues. Les drains abaissent plus le niveau de la nappe en saison de drainage intense (0,70 à 1m) que les rigoles (0,40 à 0,60cm).
- Augmente le volume du profil de sol contrôlé hydrauliquement ayant pour conséquence d'augmenter la capacité de stockage de l'eau dans le profil de sol
- Augmente annuellement le volume drainé de 12% principalement aux périodes de tarissement et de hauteur de nappe inférieure à la profondeur de la rigole (0,4m), soit à partir du printemps

- **Augmente la distance parcourue par les écoulements dans le profil de sol et ainsi augmente le temps de séjour hydraulique favorable aux réactions biogéochimiques, sur la salinité**

V. Impact sur la qualité des eaux

Les eaux de drainage contiennent des éléments chimiques provenant du sol qu'elles traversent. Elles entraînent principalement les éléments très solubles (nitrates, chlore et calcium) ; les autres éléments, plus liés au sol, et donc moins mobiles (sodium, potassium, magnésium, phosphates, pesticides peu mobiles et ammonium, ...) sont faiblement exportés par le drainage. En revanche, les eaux de ruissellement sont plus riches de ces derniers éléments liés au transport solide, et plus faiblement pourvues en éléments solubles. Le rejet des eaux de drainage et/ou ruissellement dans le milieu récepteur peut donc conduire à en augmenter la charge en éléments chimiques potentiellement polluants : ce sont essentiellement les nitrates dans les eaux de drainage, et les phosphates, l'ammonium et les pesticides dans les eaux de ruissellement (Lesaffre et Arlot, 1991). Le drainage, en contrepartie, favorise la valorisation de l'azote (approfondissement racinaire, réduction des jours ennoyés, ...) et par conséquent diminue l'azote potentiellement lixiviable. Cependant l'impact sur les flux de drainage à la réduction ou à l'augmentation est déterminé in fine par une combinaison de facteurs climatiques (année humide ou sèche), pédologiques (propriétés du sol, teneur en matière organique) et surtout culturaux (les pratiques agricoles). Les flux de polluant en sortie de drainage agricole est principalement le reflet des pratiques agricoles en surface, c'est la notion introduite par Arlot en 1999 « Drainage acteur ! Drainage témoin ! », en effet par l'introduction des tuyaux enterrés, le drainage est acteur en acheminant directement les flux de la parcelle à l'exutoire, mais le drainage est surtout témoin de l'intensivité de l'agriculture menée en surface. Adapter et gérer agronomiquement les intrants réduisent fortement les flux de matière transféré à l'exutoire.

Les points détaillés ci-dessous se placent dans le cas d'une agriculture de type grande culture associant dans la rotation culture d'hiver (céréales, colza) et cultures de printemps, conduites en agriculture conventionnelle, n'entraînant pas de modification profonde de la conduite parcellaire. Pour une conduite en agriculture biologique, le passage d'une technique à une autre conduira aux mêmes conclusions sur MES, azote et phosphore, mais n'aura aucun sens pour le paramètre pesticide, non appliqué.

11. Matière en suspension

En réduisant le ruissellement érosif de surface, le passage au drainage souterrain conduira à une réduction des exportations de matières en suspension et des éléments associés comme le phosphore total, l'azote organique, les pesticides (Figure 22).

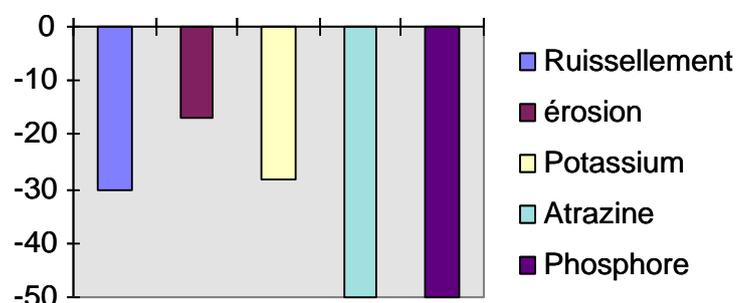


Figure 22. Synthèse des réductions des paramètres eau de ruissellement, éléments peu solubles tirée de Bengtson et al. 1984.

En contexte de Marais, Racault et al. (1990) ont mesuré un taux annuel de 400kg/ha de MES, soit une quantité érodée équivalente de 0,1mm/an de sol, ce que les auteurs considèrent comme faible.

12. Nutriments

Les conséquences pour les nutriments liés aux matières en suspension et au ruissellement de surface sont résumées dans Figure 22. L'impact du drainage sur les exportations de nutriments dépend de l'intensité relative entre drainage de surface et drainage souterrain. Le drainage souterrain oblige, dans la grande majorité des cas, une plus grande proportion de l'eau de pluie à traverser le profil de sol, ce qui a pour conséquence d'augmenter les exportations des constituants mobiles du sol comme les nitrates et les sels solubles. Au drainage souterrain est quasi universellement associé une augmentation des pertes en nitrates du sol, à cause de l'augmentation de la lixiviation du sol. L'effet de rabattement de la nappe par le drainage peut théoriquement se traduire par la diminution de la dénitrification, l'augmentation de la minéralisation et de l'absorption végétale, sources et puits des nitrates dans le sol. En réalité, il semble que ces effets sur la fonction de production du nitrate se compensent.

Nitrate

La dynamique des exportations de nutriments de la parcelle agricole au réseau superficiel est connue, elle se découpe en trois périodes distinctes : la première phase a lieu en début de saison de drainage, lors de l'entraînement des polluants d'un reliquat de la culture précédente, puis la seconde phase pendant la saison de drainage intense, les eaux de drainage exportent les polluants de façon diluée et la troisième phase lors des épisodes printaniers, (Arlot, 1999, Blann et al., 2009, Tournebize et al., 2008, Figure 23) pendant laquelle des épisodes de dilution mais aussi d'entraînement consécutivement aux pratiques de fertilisation cohabitent. En terme de flux (38kgN/ha/an en moyenne), la première phase exporte 42% en moyenne des flux annuels, la seconde 50% et la dernière environ 8%. Les exportations de nutriment par drainage avec de fortes concentration ont plutôt lieu en automne-hiver. Cette typologie est généralisable à l'ensemble des sites drainés suivis expérimentalement et confirmée aussi dans le cas du Marais Atlantique par Racault et al., (1990), qui soulignent l'importance des premiers écoulements dans le flux annuel exporté d'azote. Les suivis expérimentaux montrent aussi, en lien avec le fonctionnement hydrologique du drainage, que la contribution du drainage aux écoulements printaniers et estivaux est faibles voire négligeables. La part des flux annuels à partir du mois de mai représente moins de 1% des flux annuels avec des concentrations très variables d'une parcelle à l'autre selon le mode de conduite agronomique. La dégradation de la qualité de l'eau du milieu récepteur par les eaux de drainage présente un risque d'occurrence à l'automne et en hiver.

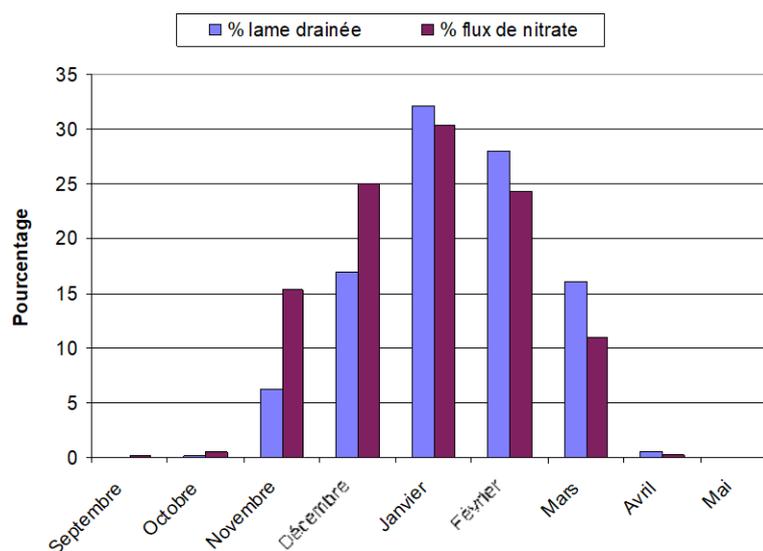


Figure 23. Moyenne des contributions mensuelles des flux d'une saison complète de drainage, site de La Jaillière (eau: 220 mm/saison et nitrate: 38kgN/ha/saison, soit 76mg NO₃/l moyenne de 1989 à 1997) (source Tournebize et al., 2008)

Phosphore

Le phosphore dont la fraction particulaire, est préférentiellement transféré par écoulement de surface (ruissellement), pour lesquels les concentrations dans les eaux de ruissellement sont supérieures à celles mesurées dans les eaux de drainage. Les flux exportés par les eaux de drainage sont en général 50% plus faibles que les flux exportés par ruissellement (4kgPt/ha/an contre 9kgPt/ha/an). De ce fait le passage du drainage de surface au drainage enterré réduit les flux de phosphore autant dissout que particulaire dans le réseau hydrographique.

Masse et al., (2000) évoque le rôle joué par le système de marais dans le cycle de l'azote et du phosphore. En effet, leur suivi en marais breton, montre de faibles valeurs (<1,7 mg/L pour le phosphore, <1mgN/L pour l'ammoniac, et <6 mgN/L pour le nitrate) dans la majorité des cas pendant la période estivale et automnale, la plus critique pour les milieux aquatiques du marais. Or ce ne sont pas les périodes d'écoulement des réseaux de drainage. En période estivale, la limitation des écoulements, les températures élevées et les nutriments présents contribuent à générer occasionnellement des phénomènes d'eutrophisation. Cependant, les processus in stream notamment de dénitrification benthique (un temps de séjour hydraulique supérieur à 5 jours, à 20°C) favorise la dénitrification de plus de 80% des nitrates des eaux du fossé, comme le rapportent Merle et al., (1997) dans le cas du marais Breton.

13. Pesticides

La dynamique des produits phytosanitaires est différente due aux quantités appliquées et aux propriétés physico-chimiques des molécules mises en jeu. Les conditions d'application des produits phytosanitaires doivent être raisonnées afin de limiter les exportations nuisibles. Les pertes en produits phytosanitaires se concentrent sur la période post traitement, principalement par la volatilisation (hors sujet), le ruissellement (le principal vecteur de pollution) et la lixiviation (entraînement des molécules dans le sol avec l'eau d'infiltration). Pour limiter les exportations, les moyens efficaces sont connus. En effet il suffit de réduire les doses apportées et d'améliorer les conditions d'application (pulvérisateur, ...) afin de limiter les pollutions ponctuelles responsables en terme de bilan de masse d'une bonne partie des exportations.

Racault et al, (1990), présentent un suivi de quelques pesticides (de la famille des urées substituées maintenant interdites sur parcelle drainée) sur un îlot de 100ha dans le marais de Brouage. Le taux mesuré moyen d'exportation annuel est inférieur à 0,5% de la dose appliquée, cohérent avec les résultats mesurés en parcelle drainée sur luvisol (site La Jaillière, Arvalis, Dutertre et al. à paraître, et Dairon et al., 2018). Les résultats de comparaison parcelle non drainée (ruissellement) et parcelle drainée démontrent que le transfert de pesticides se fait principalement par ruissellement (glyphosate, et AMPA, 2,4-D, diflufenicanil, flurtamone, pendiméthaline, époxiconazole, boscalid, ...) , sauf pour quelques molécules plus solubles transférées préférentiellement dans les eaux de drainage (isoproturon cyprosulfmanide atrazine). 3 molécules sur 4 appliquées sont détectées dans les eaux de drainage sur le site de La Jaillière. Les pesticides solubles se retrouvent rapidement dans les eaux de drainage non pas du fait de la présence du drain comme tuyau enterré, mais principalement du fait de la macroporosité reliant la surface du sol au tuyau (Dairon et al., 2018). Cependant, même si les concentrations peuvent excéder les 0,1µg/L, les flux annuels restent faibles. Le taux moyen d'exportation (masse exportée sur masse appliquée) est inférieur à 0,1%, ce qui signifie que 99,9% des pesticides appliqués ne se retrouvent pas dans les eaux de drainage. La masse exportée est de l'ordre de 1 à 2 g de matières actives/ha drainé/an. Un effet indirect de la conversion du drainage de surface au drainage souterrain porte sur l'usage des pesticides. Ainsi le meilleur accès aux parcelles permet une réduction des pesticides appliqués par facilité de traitement et de réduction des surfaces recoupées, estimée à 10% (com. Pers. CA17).

Flux moyens annuels par type d'écoulement

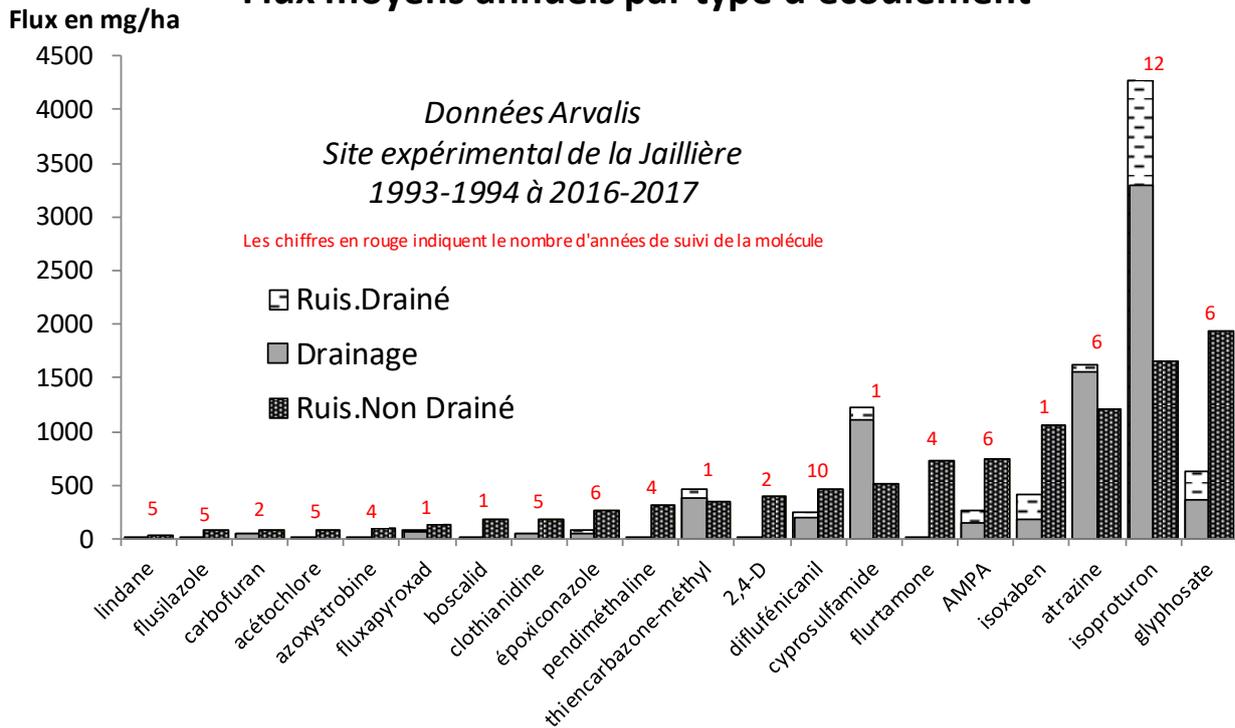


Figure 24. Flux de pesticides comparés en parcelles expérimentales drainée et non drainée (site La Jaillière, Arvalis, Source Dutertre et al, 2019),

14. Autres paramètres

Sur les aspects températures, le rapport de Huet et Martin, 2003, mentionne un impact fort du drainage sur la température en sortie drainage souterrain, plus basses que celles des eaux drainées en surface. C'est en fait plus complexe que cela. Les suivis sur l'observatoire ORACLE montrent une inversion saisonnière d'écart de température entre le cours d'eau et les contributions par drainage enterré, dû à l'inertie tampon du profil de sol. En hiver, les eaux de drainage, tamponnées par le sol, ont une température plus élevée que les eaux de surface. A partir du printemps, cet écart s'inverse, et les eaux de drainage sont plus froides que les eaux de surface, limitant ainsi leur réchauffement.

Les exportations salines des parcelles drainées par tuyaux enterrés peuvent nuire aux fonctionnements biologiques selon les espèces, même si à l'aval le gradient salin augmente fortement. Cependant peu de suivis permettent de quantifier la différence de salinité générée entre une parcelle drainée par rigole et une parcelle drainée par tuyaux enterrés. Colas et Pons (1980) ont montré que le comportement salin était similaire (cf § III).

15. Bilan « qualité des eaux »

Le drainage, en diminuant le ruissellement et le transport solide qui lui est lié, réduit les exportations de polluants liées au ruissellement (phosphates, pesticides peu mobiles, ammoniacque). En corollaire, cette eau s'infiltre dans le sol, grâce au rabattement de la nappe, et peut se charger de nitrates lors du transfert vers les drains, suite au contact avec le stock de nitrate lixiviable et certains pesticides mobiles. Les concentrations mesurées en sortie de drain sont très variables et fortement dépendantes des débits drainés. Les impacts sur la qualité des eaux du drainage de surface ou souterrain sont proches avec une différenciation sur la proportion d'éléments soluble ou particuliers selon le type d'écoulement de surface ou souterrain (Figure 25). Ce sont les excès notoires de fertilisation (> 200-250 kg/ha) qui sont les plus préjudiciables, surtout s'ils sont suivis

d'un incident climatique ou de culture. Toute technique raisonnée visant à stabiliser le rendement peut-être vue comme favorable à une limitation de la lixiviation l'année hydrologique suivante. Comme dans tout système agricole, réduire l'impact du transfert de nitrate et de pesticides requière de bonnes pratiques agricoles, le recours au CIPAN (délicat en sol argileux > 35%) et une adaptation des stratégies de traitement pesticides.

Nature des éléments entraînés	Couverture végétale pérenne (prairie)				Sol nu en hiver (cultures)			
	Rigoles		Rigoles + ados		Rigoles + ados		Drains	
	BS	MS	BS	MS	BS	MS	BS	MS
Eléments solubles	0	+	0	+	++	+	+++	++
Particules	0	+	0	+	++	+++	+	++
BS : Sol à bonne structure MS : Sol à mauvaise structure				Entraînements : 0 : nuls ; + : faibles ; ++ : moyens +++ : forts				

Figure 25. Risques d'entraînement selon les modes d'assainissement et les systèmes de production agricole dans les marais de l'Ouest. (source Steyaert et al., 1995)

VI. Impact sur le réseau hydrographique

La gestion des eaux de drainage nécessite un système hydraulique en trois niveaux. Le réseau tertiaire est alimenté par les eaux des parcelles et alimente le réseau secondaire, lui-même relié au réseau primaire. Le contrôle hydraulique est piloté soit par des vannes, batardeaux soit par un système de pompes activées avec des capteurs de hauteur d'eau. Si le fonctionnement hydraulique parcellaire peut être connu, l'exploration du fonctionnement hydrologique aux échelles des réseaux secondaires et primaires est peu documentée (Masse et al., 2000). Steyaert et al. (1995) soulignent qu'à l'échelle de l'îlot drainé, la réorganisation foncière liée aux opérations de remembrement accompagnant souvent les opérations de drainage, a entraîné une diminution du maillage de canaux et fossés (de 200m/ha à 80m/ha), mais d'un autre côté, cela a permis de structurer leur gestion (association foncière, association autorisée, syndicat, ...). La présence de parcelles en ados, à l'intérieur d'un casier, nécessite de gérer l'ensemble des circulations gravitaires à un niveau bas donc évacuant plus rapidement les eaux de drainage, sauf à procéder à des isolements hydrauliques par la création d'un système de fossés indépendant pour ces seules parcelles et pompage. L'homogénéisation des techniques de drainage faciliterait donc la gestion hydraulique des casiers sans pénaliser ni le milieu ni les agriculteurs. Si le marais mouillé sert de stockage d'eau douce, le marais desséché est "géré" saison par saison⁶:

- de la fin de l'automne au début du printemps, par un système d'ouverture pour évacuer des excédents d'eau de pluie et/ou de nappes,
- de la fin du printemps au début de l'automne, le taux d'évapotranspiration entraîne une forte demande hydrique qui peut être équilibrée par alimentation d'eau douce à partir des fossés ou canaux creusés dans un Bri argileux quasi imperméable.

La complexité des réseaux et leur interaction ne permettent pas de construire des modèles dynamiques de surface à plus grande échelle. Une publication aborde, spécifiquement, la thématique hydraulique à l'échelle du marais poitevin de plusieurs km² (Giraud et al., 1997). Giraud et al. 1997, en

⁶ Suivi des niveaux d'eau dans le marais poitevin : <http://siemp.epmp-marais-poitevin.fr/>

couplant les modèles SIDRA et MAGE, ont évalué des scénarios de pression drainage sur les pics de crue, les débits et les lames d'eau de casiers hydrauliques dans le marais de Moëze. Les auteurs ont fait varier le taux de drainage de 0 à 88% pour une surface totale de 2574ha. Les auteurs se placent dans le pire cas de conversion de prairie à parcelles drainées en souterrain. Le cas intermédiaire de passage de drainage de surface à drainage souterrain n'est pas spécifiquement étudié. Les auteurs concluent sur plusieurs points (Tableau 3) :

- L'évolution du temps de concentration hydrologique est faible quand la surface drainée varie de 973 à 1381ha voire diminue quand la surface de drainage augmente de 82 à 88% (1814 à 1956ha). Avec pour conséquence de l'augmentation du temps de concentration hydrologique, des conditions plus favorables à la dégradation dans le réseau d'assainissement.
- Variation des pics de débit entre un passage de 64 à 88% de 10%, et de +8% entre 81 à 88%. Aucune modification hydrologique significative simulée pour une augmentation des surfaces drainées de 973 à 1381ha (de 44 à 62%).

Taux de drainage	44 à 62%	44 à 81%	62 à 81%	81 à 88%	64 à 88%
Modification des écoulements annuels en volume	0%	+2%	+2%	+8%	+10%

Tableau 3. Evolution par simulation des volumes drainés par augmentation de la pression surfacique de drainage par tuyaux enterrés en marais de Moëze (Tiré de Giraud et al., 1997).

Les résultats des simulations montrent qu'une augmentation de la part des parcelles drainées, passant de 44 à 62% de la surface totale, n'influençait pas l'hydrologie du casier.

Dans la publication de Weng et al 2003, étudiant les influences hydrogéologiques du Marais de Rochefort, le réseau est alimenté artificiellement par la Charente en été, et par les excès d'eau hivernaux. La nappe et le système aquifère ne contribuent alors qu'à 2% des flux hydriques annuels. Le drainage dans le premier mètre du sol, quelle que soit sa forme (surface ou souterrain) ne semble pas interagir avec le fonctionnement sous jacent d'aquifère.

16. Bilan « réseau hydrographique »

Peu d'information sont disponibles pour aborder les impacts de la conversion du drainage de surface à souterrain à large échelle, au-delà de la parcelle. Les travaux publiés montrent cependant que le passage à l'échelle casier hydraulique d'un taux de drainage souterrain de 62 à 81% ne modifie pas l'hydrologie du système à l'aval.

VII. Conclusions sur les impacts de la conversion drainage de surface vs drainage enterré

Dans le cadre du Marais Atlantique, l'impact du drainage par changement de technique est limité. Différencier le drainage de surface et le drainage souterrain, d'un point de vue hydrologique et contrôle de l'hydromorphie n'a pas de sens. Drainage souterrain vs drainage de surface, l'objectif d'assainir le sol est le même, avec des conséquences similaires. En période hivernale les dynamiques hydrologiques sont semblables. Une évaluation de l'augmentation annuelle des écoulements notamment au printemps conduit à avancer les chiffres de 27mm soit 12% du bilan annuel. Ce surplus d'eau peut être une opportunité en gérant au mieux le fonctionnement des pompes notamment en appliquant les techniques de drainage contrôlé. Du point de vue pédologique, les faibles interactions sont observables dans la zone au dessus du drain en augmentant la macroporosité qui contribue aussi à un meilleur stockage d'eau. D'un point de vue géochimique, les avantages de la conversion se situent sur la réduction des MES, phosphores et de la plupart des pesticides. Les inconvénients à remédier se

focalisent sur les nitrates et certains pesticides solubles en jouant sur 2 leviers : les pratiques agricoles et les aménagements compensateurs à intégrer dans le système agricole (Figure 26). Localement, le changement de technique de drainage (de surface à souterrain) ne modifie pas la pression intensive de l'agriculture.



Figure 26. Photo de l'intégration d'une zone tampon humide artificielle dans un système agricole de marais alimentée par pompage des eaux de drainage souterrain (prise le 27/03/2019).

VIII. Références bibliographiques

- Arlot, M. P. and D. Zimmer (1990). Drainage agricole et lessivage des nitrates. Colloque nitrates agriculture eau, Paris, 7-8 novembre 1990: 263-268.
- Bengtson, R. L., C. E. Carter, H. F. Morris and J. G. Kowalczyk (1984). "Reducing Water-Pollution with Subsurface Drainage." Transactions of the Asae **27**(1): 80-83.
- Bernard-Ubertosi, M., P. Dudoignon and Y. Pons (2009). "Characterization of Structural Profiles in Clay-Rich Marsh Soils by Cone Resistance and Resistivity Measurements." Soil Science Society of America Journal **73**(1): 46-54.
- Bernard, M., P. Dudoignon, C. Chevallier and Y. Pons (2006). "Shrinkage and subsidence in a marsh soil: Measurements and preliminary model." Soil Science Society of America Journal **70**(6): 1834-1842.
- Bernard, M., P. Dudoignon and F. M. Pellerin (2004). "Caractérisation de la structure des sols de marais par coupage pénétromètre / résistivimètre." 4p.
- Bernard, M., P. Dudoignon, Y. Pons, C. Chevallier and L. Boulay (2007). "Structural characteristics of clay-dominated soils of a marsh and a palaeosol in a crossed diagram." European Journal of Soil Science **58**(5): 1115-1126.
- Blann, K. L., J. L. Anderson, G. R. Sands and B. Vondracek (2009). "Effects of Agricultural Drainage on Aquatic Ecosystems: A Review." Critical Reviews in Environmental Science and Technology **39**(11): 909-1001.
- Brown, C. D. and W. van Beinum (2009). "Pesticide transport via sub-surface drains in Europe." Environmental Pollution **157**(12): 3314-3324.
- Brugnot, G. (2004). Le drainage dans le Marais Poitevin. Rapport d'expertise scientifique. Cemagref: 49p.
- Collas, P. (1985). Le drainage des sols lourds plus ou moins sodiques des marais de l'ouest de la France : Etude expérimentale et modélisation: 243.
- Collas, P., L. Damour and Y. Pons (1984). "Types de sol et dynamique de l'eau : incidence sur la mise en valeur des marais de l'Ouest." C.R. Acad. Agri. de France **70**(12): 1577-1586.
- Collas, P. H. and Y. Pons (1980). Conductivités électriques des eaux de drainage en sol de marais : Leurs principaux facteurs de variation - Leur utilité dès la localisation des écoulements en sol argileux salé: 25.

Dairon, R., A. Dutertre, J. Tournebize, J. Marks-Perreau and N. Carlier (2017). "Long-term impact of reduced tillage on water and pesticide flow in a drained context." Environmental Science and Pollution Research **24**(8): 6866-6877.

Damour, L., J. Duprat, J. L. Janin and L. Rolland (1977). Commission internationale des irrigations et du drainage: Le drainage des sols lourds dans le marais de Charente-Maritime : 10ème Congrès: 30.

Dent, D. L., E. J. B. Downing and H. Rogaar (1976). "CHANGES IN THE STRUCTURE OF MARSH SOILS FOLLOWING DRAINAGE AND ARABLE CULTIVATION." Journal of Soil Science **27**(2): 250-265.

Dudoignon, P., S. Causseque, M. Bernard, V. Hallaire and Y. Pons (2007). "Vertical porosity profile of a clay-rich marsh soil." Catena **70**(3): 480-492.

Dutertre, A., D. Renault, J. Marks-Perreau and B. Réal (sous presse). "Influence des itinéraires techniques et qualité de l'eau en sortie de drainage." Science Eau et Territoire **18p**.

Frison, A., I. Cousin, D. Montagne and S. Cornu (2009). "Soil hydraulic properties in relation to local rapid soil changes induced by field drainage: a case study." European Journal of Soil Science **60**(4): 662-670.

Giraud, F., J. B. Faure, D. Zimmer, J. C. Lefeuvre and R. W. Skaggs (1997). "Hydrologic modeling of a complex wetland." Journal of Irrigation and Drainage Engineering **123**(5): 344-353.

Hénine, H., C. Chaumont, J. Tournebize, B. Augéard, C. Kao and Y. Nédelec (2012). "Le rôle des réseaux de drainage agricole dans le ralentissement dynamique des crues : interprétation des données de l'observatoire Orgeval." Sciences Eaux et Territoires(spécial n°3): 16-23.

Huet, P. and X. Martin (2003). Le drainage dans le Marais Poitevin. MEDD. R. d. l. i. g. d. l'Environnement: 42p.

Hurtado, M. D., L. Andreu, J. M. Abril and A. Delgado (2011). "Nitrate loss from a tile-drained reclaimed marsh soil from SW Spain amended with different products." Nutrient Cycling in Agroecosystems **91**(3): 255-267.

Kladivko, E. J., L. C. Brown and J. L. Baker (2001). "Pesticide Transport to Subsurface Tile Drains in Humid Regions of North America." Critical Reviews in Environmental Science and Technology **31**(1): 1-62.

Kosuth, P. (1985). Vocabulaire de l'hydraulique du drainage agricole. T. d. l. a.-E. d. Cemagref. Antony, France, Cemaref: 39.

Lesaffre, B. (1991). Fonctionnement hydrologique et hydraulique du drainage souterrain des sols temporairement engorgement : débits de pointe et modèle SIDRA. Le fonctionnement du drainage : approche pédo-hydraulique, étude du Cemagref "hydraulique agricole" n° 10: 107-120.

Lesaffre, B. and M. P. Arlot (1991). Maîtrise de l'excès d'eau dans les sols et effets sur l'environnement impact du drainage sur le milieu. Carrefour scientifique et technique H2O 91 eau agriculture et environnement, Montpellier, 1991: 147-156.

Masse, J., C. Rigaud, P. Castaing, A. Dutertre, A. Moreau, J. F. Marchais, J. L. Bourdais, V. Merle, S. Le Floch, T. Nasr, J. C. Chossat, G. Lechapt, C. Puech, F. Martin and D. Raclot (2000). "Elaboration d'un système d'information à références spatiales pour l'aide à la gestion des zones humides littorales atlantiques." Ingénieries - E A T(spécial Agriculture et environnement): 35-59.

Mastrocicco, M., N. Colombani, D. Di Giuseppe, B. Faccini and M. Coltorti (2013). "Contribution of the subsurface drainage system in changing the nitrogen speciation of an agricultural soil located in a complex marsh environment (Ferrara, Italy)." Agricultural Water Management **119**: 144-153.

Mathé, V., A. Meunier and F. Lévyque (2007). "Anthropic acceleration of a natural clay mineral reaction in marshland soils (Atlantic Coast, France)." Clay Minerals **42**(1): 1-12.

Merle, V., C. Rigaud and J. Masse (1997). "La gestion de l'eau et des milieux aquatiques en zone humide littorale endiguée : une dimension multi-usages à affirmer et de nouvelles démarches à mettre en oeuvre ; l'exemple du marais Breton." Cahiers nantais(47-48): 275-280.

Montagne, D., S. Cornu, L. Le Forestier and I. Cousin (2009). "Soil Drainage as an Active Agent of Recent Soil Evolution: A Review." Pedosphere **19**(1): 1-13.

Montagne, D., I. Cousin and S. Cornu (2013). "Dégradation morphologique et agriculture : quantification des évolutions pédologiques à court terme sous contraintes anthropiques." Etude et Gestion des Sols **20**(2): 137-149.

Montagne, D., I. Cousin, O. Josiere and S. Cornu (2013). "Agricultural drainage-induced Albeluvisol evolution: A source of deterministic chaos." *Geoderma* **193**: 109-116.

Pons, Y. (1988). "Effect of watertable on yield and root depth of winter wheat in the French West Central Atlantic Marshlands." *Agricultural Water Management* **14**: 35-42.

Pons, Y. (1997). Comportements physiques et aptitudes à la mise en culture des sols des marais de l'ouest. PhD.

Pons, Y., A. Capillon and C. Cheverry (2000). "Water movement and stability of profiles in drained, clayey and swelling soils: at saturation, the structural stability determines the profile porosity." *European Journal of Agronomy* **12**(3-4): 269-279.

Pons, Y. and A. Gerbaud (2005). "Classification agronomique des sols de marais à partir de la relation entre sodicité et stabilité structurale." *Etude et Gestion des Sols* **12**(3): 229-244.

Racault, Y., C. Chevallier and P. Collas (1990). Drainage et qualité des eaux dans les marais du littoral atlantique français. 14 th congress on irrigation and drainage : transactions-actes vol.1-B Q.42 (R24-R44). New Delhi, IND Rio de Janeiro, BRA, International Commission on Irrigation and Drainage: 381-394.

Radimy, R. T., P. Dudoignon, L. Caner and J. M. Hillaireau (2017). "Moisture and salinity profiles in the French Atlantic coastal marshes and consequences on plant available water." *Journal of Hydrology: Regional Studies* **9**: 1-17.

Radimy, R. T., P. Dudoignon, J. M. Hillaireau and E. Deboute (2013). "Polder Effects on Sediment-to-Soil Conversion: Water Table, Residual Available Water Capacity, and Salt Stress Interdependence." *Scientific World Journal*.

Sloan, B. P., R. Mantilla, M. Fonley and N. B. Basu (2017). "Hydrologic impacts of subsurface drainage from the field to watershed scale." *Hydrological Processes* **31**(17): 3017-3028.

Steyaert, P., C. Chevallier and Y. Pons (1995). "Drainage et environnement en marais de l'Ouest." *Géomètre*(7): 46-48.

Tanton, T. W., D. W. Rycroft and M. Hashimi (1995). "Leaching of salt from a heavy clay subsoil under simulated rainfall conditions." *Agricultural Water Management* **27**(3-4): 321-329.

Tournebize, J., M. P. Arlot, C. Billy, F. Birgand, J. P. Gillet and A. Dutertre (2008). "Quantification et maîtrise des flux de nitrates : de la parcelle drainée au bassin versant." *Ingénieries - E A T*(spécial Azote, phosphore et pesticides. Stratégies et perspectives de réduction des flux): 5-25.

Weng, P., F. Giraud, P. Fleury and C. Chevallier (2003). "Characterising and modelling groundwater discharge in an agricultural wetland on the French Atlantic coast." *Hydrology and Earth System Sciences* **7**(1): 33-42.

Zimmer, D. (1990). Acquis récents de la recherche française en drainage. Modélisation des débits de pointe en sols temporairement engorgés drainés et typologie des schémas d'écoulement. Séminaire international sur le drainage, Rabat, MAR, 27-30 novembre 1990: 20